



ocean-climate.org

OCÉAN ET CLIMAT

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 CO₂ 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 CO₂, 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, des 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^e 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@cnrs-dir.fr

AVEC LE CONCOURS DE :

Nausicaá : **Christine Causse**

Tara Expéditions : **Marion Di Méo, Marc Domingos, Eloïse Fontaine**

Surfrider Foundation Europe : **Elodie Bernollin**

Institut Océanographique, Prince Albert I^{er} de Monaco : **Corinne Copin**

Plateforme Océan et Climat : **Ludovic Frère Escoffier**

UMR AMURE : **Marianne Biron**

Traduction : **Joséphine Ras, Patrick Chang, Dana Sardet**

Maquette graphique : **Elsa Godet**

CITATION

OCÉAN ET CLIMAT, 2015 – Fiches scientifiques. www.ocean-climate.org, 128 pages.

Octobre 2015

Cette publication a bénéficié du soutien de



Table des matières

Avant-propos

Françoise Gaill.....06

L'océan, réservoir de chaleur

Sabrina Speich, Gilles Reverdin, Herlé Mercier et Catherine Jeandel.....08

L'océan, pompe à carbone

Laurent Bopp, Chris Bowler, Lionel Guidi, Éric Karsenti et Colombar de Vargas.....14

La hausse de la mer au xx^e siècle : observation et causes

Benoît Meyssignac et Gilles Reverdin.....20

Comment l'océan acquiert-il sa composition chimique ?

Valérie Chavagnac et Catherine Jeandel.....24

L'acidification des océans

Jean-Pierre Gattuso et Lina Hansson.....28

L'océan est à bout de souffle

Kirsten Isensee, Lisa Levin, Denise Breitburg, Marilaure Gregoire, Veronique Garçon et Luis Valdés.....31

Les grands fonds océaniques, quels enjeux climatiques

Nadine Le Bris.....38

L'océan Austral

Philippe Koubbi, Gabriel Reygondeau, Claude De Broyer, Andrew Constable et William W.L. Cheung.....44

Arctique : opportunités, enjeux et défis

Emmanuelle Quillérou, Mathilde Jacquot, Annie Cudennec et Denis Bailly.....55

L'océan, biodiversité et climat

Gilles Boëuf.....68

Services écosystémiques et conservation

Denis Bailly, Rémi Mongrue et Emmanuelle Quillérou.....73

Les coraux et le changement climatique

Denis Allemand.....81

Biodiversité marine exploitée et changement climatique

Philippe Cury.....88

Aquaculture et changements globaux

Marc Metlan.....92

Les petites îles, l'océan et le climat

Virginie Duvat, Alexandre Magnan et Jean-Pierre Gattuso.....98

Définir les investissements climatiques prioritaires pour les populations côtières

Adrien Comte, Linwood Pendleton, Emmanuelle Quillérou et Denis Bailly.....112

Modes de vie et de penser l'événement à Taïteuea : un barrage contre le Pacifique ?

Guigone Camus.....121



Avant-propos

Françoise Gaill

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 CO₂ 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 un état des connaissances sur la question des variations de la concentration en oxygène des eaux marines.

L'humanité va devoir faire face à l'évolution du climat qui affectera les populations côtières, les activités industrielles en Arctique ou encore les secteurs de la pêche et de l'aquaculture. Les insulaires sont aux avant-postes de ces bouleversements liés au réchauffement climatique. 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 évaluer l'impact sur les services écosystémiques, en appréhender le fonctionnement d'ensemble, et en inférer les conséquences pour nos sociétés.

Peut-on raisonnablement moyenner 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,
Gilles Reverdin,
Herlé Mercier,
Catherine Jeandel

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 radiatifs, 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, l'Océan est 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 à effet 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 à effet 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 était connu à leur sujet. Cependant, notre capacité à comprendre et d'anticiper l'évolution du climat terrestre, dépend de notre connaissance fine des océans et de leur rôle 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 phase, l'Océan est en bonne part responsable de la douceur du climat de notre planète ainsi que des apports d'eau 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 de

par ses 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, 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 de la surface vers les profondeurs ont lieu lorsque les eaux de surface se refroidissent dans ces régions (elles deviennent plus denses et plongent alors vers les abysses). Le mécanisme de plongée de ces eaux (dû à des modifications

de densité, la conjonction entre leur température et la 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 de conditions climatiques (vents, ensoleillement...). Le temps de ces transferts et de ces redistributions est très variable, couvrant de la saison à l'année dans les régions tropicales, à la décennie dans les couches de surface, jusqu'à plusieurs centaines, voire des 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 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 cette évaporation, mais pas forcément dans les mêmes régions. Depuis, l'Océan est salé, ce qui modifie ses propriétés physiques, 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 glaciaires contribuent donc aux variations de la densité de l'eau de mer, et à la circulation océanique ainsi qu'aux transferts verticaux dans l'Océan.

D'une manière générale, les gaz sont plus solubles dans les eaux froides que dans les eaux chaudes. Par conséquent, les eaux de surface 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 due aux activités humaines n'affecte pas que les basses couches

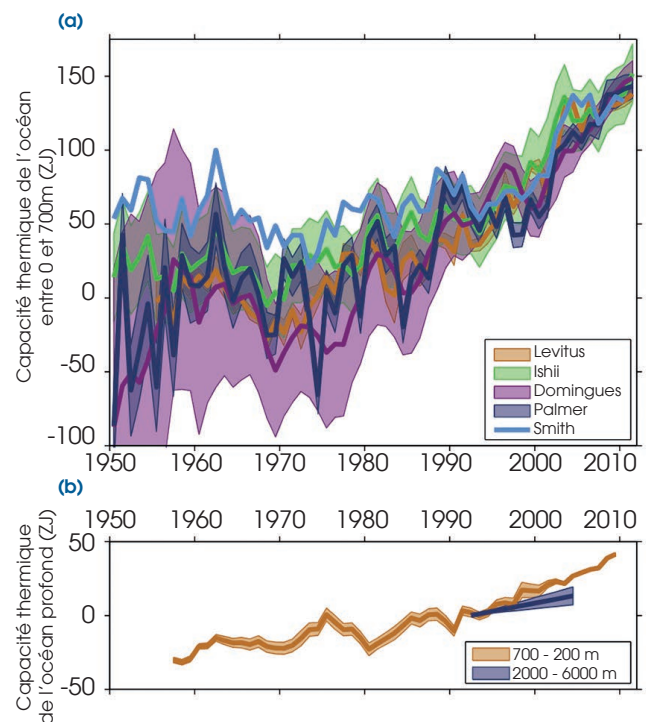


Fig.1 — (a) Évaluations de la moyenne annuelle du contenu de chaleur en Zétaj ($1 \text{ Zétaj (ZJ)} = 10^{21} \text{ Joules}$) pour la couche supérieure de l'océan (de 0 à 700 m de profondeur) calculées à partir d'observations. Ces estimations sont la mise à jour des évaluations des travaux de Levitus *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 en 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.

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

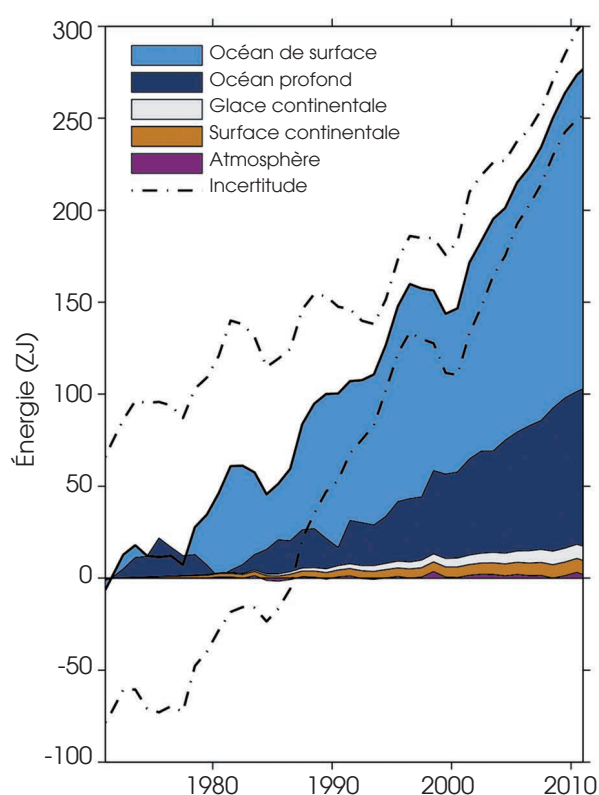


Fig.2 — Courbe d'accumulation de l'énergie in ZJ faisant référence à 1971 et calculée entre 1971 et 2010 pour des différentes composantes du système climatique terrestre. Le réchauffement océanique (exprimé ici en tant que changement du contenu de chaleur) domine. L'océan des couches de surface (couleur 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.

la chaleur 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 que 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 1970.

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 El Niño - Southern Oscillation (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 dans 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 du niveau moyen de la mer qui est actuellement de 1 mm/an. (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 l'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^e 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 affectera les bilans biogéochimiques de l'Océan et de sa biosphère¹. 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 (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 de stocker l'essentiel du flux radiatif solaire et du surplus d'énergie générée par les activités humaines.

¹ Se référer aux textes sur la pompe de carbone et celui sur l'acidification et la déoxygenation des océans



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).

De plus, les écoulements océaniques sont loin d'être des fleuves tranquilles : leur dynamique est très turbulente et leurs interactions avec l'atmosphère et le climat sont très complexes. Réduire ces inconnues et ces incertitudes est indispensable pour prévoir avec plus de 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'observations 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 5TH 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*,
Chris Bowler*,
Lionel Guidi,
Éric Karsenti,
Colomban de Vargas

* 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 le 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 CO₂ atmosphérique et de notre climat.

UN RÔLE MAJEUR POUR L'OCÉAN DANS L'ÉVOLUTION DU CO₂ 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 CO₂ atmosphérique a augmenté de près de 40 % au cours des 200 dernières années, 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 ciment, par la déforestation et autres changements dans l'utilisation des terres. On considère aujourd'hui qu'un changement de cette rapidi-

té 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 CO₂ atmosphérique en absorbant une part significative du CO₂ 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 quantité de carbone absorbée par l'océan s'élève à 150 milliards de tonnes – également 30 % des émissions anthropiques sur cette période. En absorbant ce CO₂, 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 carbone, sous forme de CO_2 , avec l'atmosphère.

Ce carbone dans l'océan, en grande majorité sous forme d'ions bicarbonates (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 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 CO_2 avec l'atmosphère.

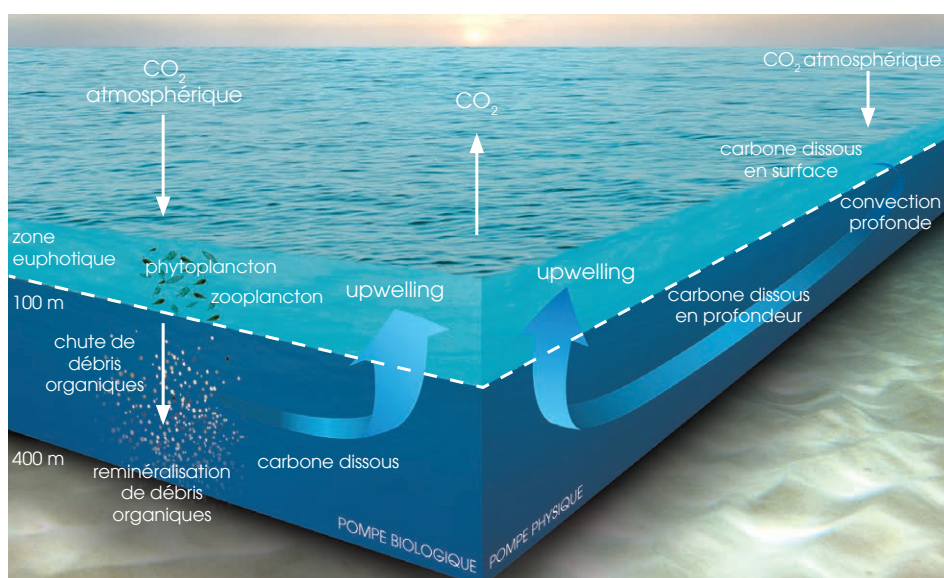
Ce gradient vertical de carbone dans l'océan s'explique à la fois par des processus physico-chimiques et des processus biologiques.

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 le 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 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.

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 mangées 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, débris, pelotes fécales...), transférant ainsi le carbone de surface vers les couches profondes de l'Océan. Chaque année, près de 10 milliards de tonnes de carbone sont ainsi exportées à partir de la couche de



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



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 constituent ce que l'on appelle la pompe biologique de carbone (Figure).

Seule une toute petite fraction ($\sim 0,2 \text{ PgCyr/an}$) du carbone exporté par des processus biologiques atteint le fond des océans et peut être stockée 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 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 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 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 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 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 PUIT DE CARBONE OCÉANIQUE ?

Jusqu'à ce jour, et ce depuis les débuts de la période industrielle, l'océan a continué à absorber chaque année une part à peu près constante du 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 CO_2 , HCO_3^- et 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 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ est généralement un facteur limitant de la photosynthèse, l'augmentation du CO₂ 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 (CID). 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 CO₂. 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)¹¹, 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 CO₂ 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

11 Un micromètre (µm) vaut 0,001 millimètre.



d'une augmentation « supplémentaire » du CO₂ atmosphérique de plusieurs dizaines de ppm² 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 de son rôle dans le cycle du carbone et dans l'évolution du CO₂ 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 température 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, tout comme les bactéries, protistes et la biosphère en général qui 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 CO₂. Par exemple, la productivité primaire du phytoplancton pour-

2 Une partie par million (ppm) correspond à un rapport de 10⁻⁶, soit par exemple, un milligramme par kilogramme.

rait 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 CO₂ séquestré chaque jour. Cela ne peut se faire qu'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., ANDREAE 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^e siècle : observation et causes

Benoît Meyssignac,
Gilles Reverdin

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^e 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 de la montée du niveau de la mer à un rythme plus rapide qu'au xx^e 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^e 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^e siècle. Bien que peu nombreux et mal répartis sur la planète, les séries marégraphiques "historiques" nous indiquent que depuis le début du xx^e 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 moyenne de 3,2 soit plus ou moins 0,4 mm/an (Cazenave *et al.*, 2014).

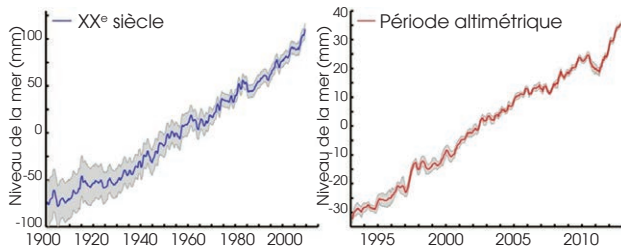


Fig.1 — Évolution du niveau moyen global de la mer, estimée à partir de la reconstruction de Church and White (2011) sur le xx^e siècle (à gauche) et à partir de l’altimétrie spatiale sur la période 1993-2012 (source: AVISO). Le grisé représente l’incertitude associée à chacune des courbes. Les cycles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

Cette hausse est deux fois supérieure à celle enregistrée par les marégraphes au cours du xx^e 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.

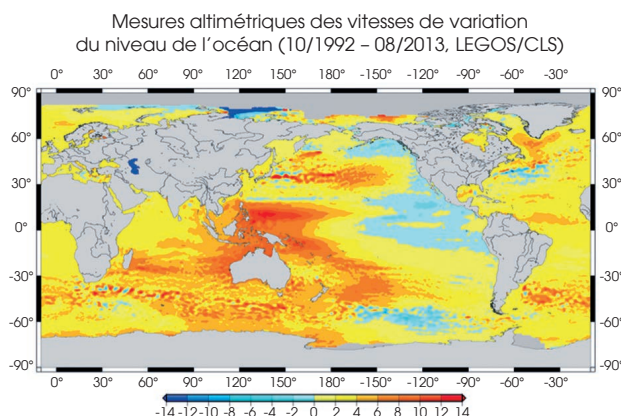


Fig.2 — Carte globale de la distribution géographique des vitesses de variation du niveau de la mer (1993-2013) d’après les mesures altimétriques de Topex/Poseidon, Jason-1/2, ERS-1/2, et Envisat (source: LEGOS).

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 supplémentaires 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 (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 km² 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 presque toutes les chaînes de mon-

tagnes. 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 « coulant » 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

Au niveau régional, c'est le stockage de la chaleur dans l'océan et l'expansion thermique associée qui génèrent 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 l'approfondissement de la thermocline dans la partie ouest du bassin, induisant une couche d'eau chaude

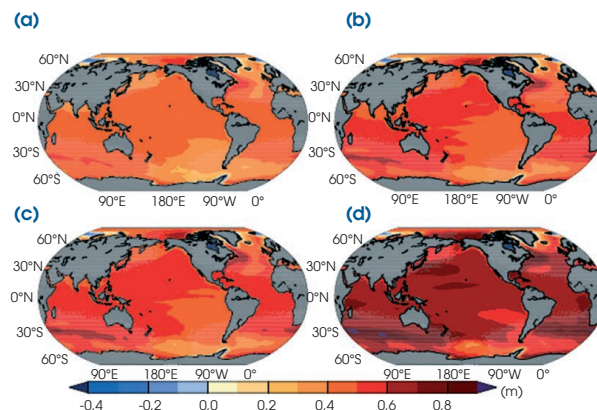


Fig.3 — Moyenne d'ensemble (21 modèles CMIP5) du changement du niveau des mers relatif pour les scénarios RCP2.6 (a), 4.5 (b), 6.0 (c) et 8.5 (d). L'impact de l'expansion thermique des océans, de la masse des glaces continentales, des stocks continentaux d'eau liquide, et du rebond post-glaciaire sont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

superficielle plus épaisse et donc une hausse du niveau 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 majeures : d'une part de la mauvaise connaissance de certains processus climatiques qui affectent les variations du niveau de la mer (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'émissions 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 température 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 montrent 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 scénario RCP2.6) et 82 cm (cas le moins favorable scénario 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^e 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 ne sont pas uniformes, on s'attend à ce que les variations du niveau de la mer pour la fin du xxi^e 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 19th to the Early 21st 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 5th 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 – *A 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.
- TIMMERMAN 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.

Comment l'océan acquiert-il sa composition chimique ?

A toute époque géologique, l'état chimique de l'océan détermine sa capacité à absorber du gaz carbonique, donc à participer à la régulation du climat. Cet état dépend du bilan entre les apports et départs d'éléments chimiques à l'océan, deux termes particulièrement complexes à quantifier. Cet article dresse l'état de nos connaissances sur les apports dissous et solide entre océan et continent d'une part et océan et croûte océanique (soit les flux hydrothermaux) d'autre part.

UN OCÉAN EN CONTACT

Depuis 150 ans, la concentration de gaz carbonique dans l'atmosphère augmente de façon exponentielle en raison des activités humaines, induisant un réchauffement du climat. L'océan soustrait annuellement 25 % du flux anthropique de CO₂. Cette capacité de « puits » dépend de son état chimique global. Or l'océan échange en permanence de la matière et de l'énergie avec les autres enveloppes superficielles de la Terre que sont l'atmosphère, les calottes polaires ainsi que les croûtes terrestres continentale et océanique. Ces échanges en font un acteur majeur de notre environnement planétaire. L'identification et la quantification de ces échanges restent cependant un enjeu pour les océanographes.

La géochimie peut apporter des réponses sur la nature de ces échanges. La composition chimique de l'océan représente un état d'équilibre budgétaire élémentaire entre *i)* les sources – *i.e.* les produits d'érosion continentale, l'inte-

raction océan-atmosphère, les réactions hydrothermales à l'interface croûte océanique-océan, et les apports anthropiques – et *ii)* les puits – *i.e.* la précipitation de minéraux secondaires, l'enfouissement sédimentaire, l'évaporation et les processus biologiques et physico-chimiques de la colonne d'eau (Figure 1). Les premiers bilans budgétaires établis à la fin des années 1970s suggéraient des flux hydrothermaux du même ordre de grandeur que les apports continentaux (Edmond *et al.*, 1979). De nos jours, le bilan élémentaire de l'océan est constamment remis en question en raison des progrès des observations. L'une des missions fondamentales des océanographes est de quantifier les apports d'éléments chimiques à l'océan et de comprendre leur comportement au sein de celui-ci, en d'autres termes comprendre les cycles biogéochimiques globaux, en particulier mieux quantifier les flux d'origines continentale et hydrothermale, étape incontournable pour évaluer la réponse de ces cycles au changement global.

L'OCÉAN, BIEN PLUS QUE DE L'EAU SALÉE

Les géochimistes tracent le transport, la dispersion et le comportement de tout élément chimique dans le domaine marin. L'océan est composé d'eau et de sel, sel dont la composition chimique est relativement constante. La salinité de l'eau de mer est d'environ 35 grammes par litre d'eau mais peut varier significativement d'une région du globe à l'autre (10 g/l dans la Mer Baltique, 275 g/l dans la Mer Morte). La composition chimique de l'eau de mer est fonction du temps moyen de séjour (temps de résidence) de chaque élément dans l'océan. Ce temps de résidence représente l'abondance d'un élément dans le réservoir océanique divisée par le bilan des flux entrants (sources) ou sortants (puits). Tous les ions majeurs inertes chimiquement (dit éléments conservatifs) ont des temps de résidence de l'ordre du million d'années – soit bien supérieur au temps de mélange de l'océan, de l'ordre de 1 000 ans, alors que les ions mineurs – dont la distribution est modifiée par les réactions chimiques (adsorption, oxydo-réduction...) et l'activité biologique au sein du milieu marin – ont des temps de résidence de l'ordre de quelques dizaines aux milliers d'années. Ces espèces chimiques à l'état de traces dans l'eau de mer sont donc des éléments clés dans notre compréhension de la composition chimique de

l'océan, puisque leurs distributions et comportements différenciés nous informent sur les processus qui déterminent ces distributions. En analysant des masses d'eau actuelles ainsi que des matériaux géologiques (qui enregistrent la composition chimique de l'eau de mer), il est possible d'évaluer la variation temporelle et spatiale des apports élémentaires à l'océan. Cependant, une telle approche ne permet pas de déterminer l'origine de ces flux et d'éventuels processus d'échange ou de mélange. Cette limitation des traceurs chimiques est comblée en associant les systèmes isotopiques qu'ils soient radiogéniques, c'est-à-dire descendants d'éléments radioactifs naturels (Sr, Nd, Hf, Pb) ou stables (O, C, N, Li, Cr, Fe, Mo...).

En résumé, notre compréhension des cycles biogéochimiques globaux a fortement gagné en efficacité ces dernières années en associant les approches élémentaires et isotopiques pour un certain nombre d'éléments chimiques présentant des réactivités différentes aux conditions environnementales. Parmi les découvertes les plus récentes, les apports continents-océan et les flux d'origine hydrothermale sont en passe d'être complètement réévalués (Jeandel et Oelkers, 2015; Resing *et al.*, 2015; Chavagnac, 2015).

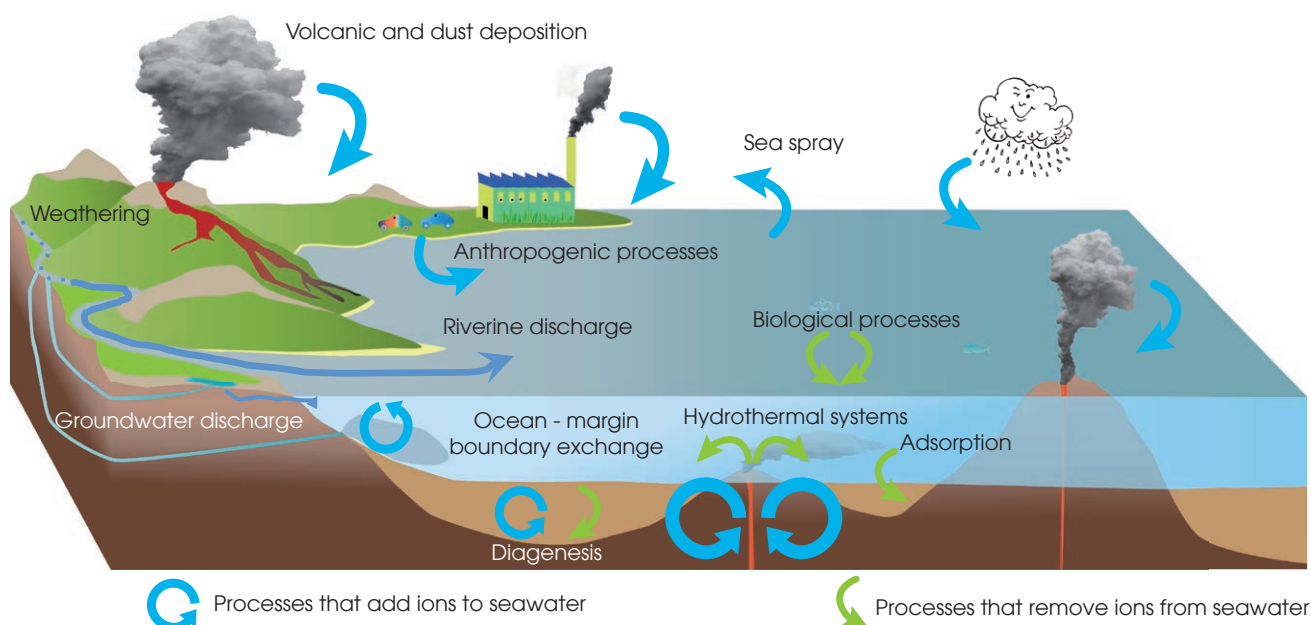


Fig. 1 — Sources et puits des éléments chimiques contrôlant la composition chimique de l'océan.

FLUX ENTRE CONTINENTS ET OCÉANS

Les terres émergées qu'elles soient récentes ou anciennes, subissent des processus d'altération mécanique et chimique. Les produits dérivés de l'érosion continentale entrent dans le domaine marin sous forme dissoute ou particulaire, organique ou minérale et sont transportés par les vents ou les fleuves. Si les lieux privilégiés de ces interactions entre océan et continent sont les zones côtières, les vents et les courants marins font que l'océan ouvert est aussi largement affecté. Jusque récemment, les bilans océaniques des éléments chimiques ne prenaient que deux types d'apport en considération : les apports dissous des rivières et pluies auxquelles vient s'ajouter une fraction de quelques pourcents (selon l'élément), libérée par dissolution des poussières. Cette fraction peut avoir un effet local important : par exemple, l'exportation du flux de carbone particulaire dans l'océan Atlantique équatorial peut être multipliée par 4 en cas de tempête de poussière provenant du Sahara, car ces eaux se trouvent soudainement fertilisées en fer, élément nutritif apporté par cette matière (Chavagnac *et al.*, 2007). Cependant, ces types d'apport sont sporadiques dans le temps et l'espace, contrastant avec les plateaux continentaux et marges océaniques, exutoires de la matière érodée d'origine continentale. En effet, les flux de matière solide déchargés par les fleuves représentent 50 fois les apports atmosphériques (Milliman et Farnsworth, 2011). En outre, une fois déposés les sédiments subissent des réactions qui libèrent des éléments chimiques vers la mer alors que d'autres viennent s'y piéger ; ils sont donc à la fois des sources et/ou des puits d'éléments ou de certains composés pour le milieu marin ouvert. Déterminer les flux nets d'apports à l'océan est par conséquent une gageure, d'autant plus importante que cette interface continent-océan est aussi celle qui véhicule les apports anthropiques.

Les travaux les plus récents suggèrent que les sédiments sont une source très significative d'éléments chimiques tels que le fer, source jusqu'ici négligée (Jeandel et Oelkers, 2015; Tagliabue *et al.*, 2014). Cette évolution récente de la quantification des flux entre continent et océan aura

pour conséquence de modifier les modèles biogéochimiques, en particulier ceux qui décrivent le cycle du carbone. Ceci illustre combien la recherche en océanographie est vivante et toujours susceptible de se questionner.

LES FLUX HYDROTHERMAUX

La circulation hydrothermale est due à la pénétration et la percolation dans la croûte océanique et les sédiments marins d'eau de mer. Lors de ce trajet, de nombreuses réactions chimiques prennent place et altèrent les roches traversées, transformant l'eau de mer initiale en un fluide hydrothermal acide, réduit et chaud (jusqu'à 410 °C). Ainsi, certains éléments majeurs de l'eau de mer, tels que le magnésium sont stockés dans la roche pour former un assemblage minéralogique secondaire – il s'agit d'un puits de Mg, alors que les métaux lourds (Fe, Mn, Cu, Zn...) et alcalins s'enrichissent jusqu'à des facteurs 10^6 – il s'agit d'une source. À la surface du plancher océanique ces fluides hydrothermaux se mélangent avec l'eau de mer ambiante neutre, froide et oxygénée produisant la formation d'un panache hydrothermal, d'où le nom de « fumeurs noirs » pour décrire ces systèmes. Une grande proportion des flux de métaux dissous (>90%) précipitent sous forme de particules poly-métalliques, de sulfures, de sulfates et d'oxy-hydroxydes, entraînant souvent d'autres éléments dissous dans l'eau de mer environnante qui sont adsorbés par ces particules (REE, V, P...). En outre, la source hydrothermale de Fer peut être détectée et tracée dans la colonne d'eau profonde depuis son site d'émission à l'axe des dorsales sur une distance de plus de 4300 km (Resing *et al.*, 2015). Le bilan élémentaire n'est donc pas aussi simple en terme de puits et de source, tout reste à déterminer les facteurs clefs organiques et minérales contrôlant le devenir des éléments dans le domaine océanique. Ces systèmes hydrothermaux de haute température se localisent à l'axe des dorsales océaniques et aux arcs volcaniques. Ces derniers sont associés à des gros volcans sous-marins dont les sommets peuvent se situer à quelques centaines de mètres sous la surface de l'océan, modifiant de ce fait la composition chimique de la partie supérieure de la colonne d'eau.

À côté de ces circulations de fluides chauds, il existe une circulation de fluide froid ($T^{\circ} < 100^{\circ}\text{C}$) dans les flancs de dorsales, dans les plaques océaniques plongeantes. Ces fluides hydrothermaux froids présentent une composition chimique radicalement différente de celle des fumeurs noirs puisqu'ils sont basiques, enrichis en alcalins mais appauvris en métaux. Ces systèmes hydrothermaux de basse température sont encore méconnus (extension géographique, variabilité temporelle des décharges, etc.) parce qu'ils ne génèrent pas des anomalies physiques et chimiques dans la colonne d'eau comme le font les systèmes « chauds » traçables avec l'instrumentation marine actuellement disponible. Les détecter dans l'océan profond est une tâche extrêmement difficile à réaliser. Pourtant, de tels systèmes peuvent être d'une importance fondamentale pour les bilans et les grands cycles géochimiques.

On voit donc qu'en cinquante ans de recherche, on est passé de la découverte des premières manifestations de l'activité hydrothermale du fond océanique, à celle d'une grande variété de phénomènes, à la fois de hautes et de basses températures. Il est donc clair que la circulation des fluides dans la croûte océanique et dans les sédiments marins est un phénomène d'une grande diversité et d'une grande ampleur. Elle reste cependant mal connue et ses implications sur la composition chimique de la croûte océanique et de l'océan et sur les transferts de matière et de chaleur sont peu contraintes. Par exemple, on estime ainsi que la quantité d'eau circulant hors axe est de 10 à 100 fois plus importante que celle liée aux systèmes hydrothermaux à l'axe (Bickle et Elderfield, 2004; Elderfield et Schultz, 1996). Une meilleure quantification des flux hydrothermaux ne pourra se réaliser que si la caractérisation de la géométrie et le moteur (thermique? tectonique?) de circulation hydrothermale ainsi que les mécanismes des interactions eaux-roches sont parfaitement compris.

RÉFÉRENCES

- BICKLE M. and ELDERFIELD H. – *Hydrothermal Fluxes in a Global Context*. In *Hydrogeology of the Oceanic Lithosphere*. Eds DAVIS E. and ELDERFIELD H., Cambridge University Press, 677-690, 2004.
- CHAVAGNAC V. – *When the Crusts Meet the Ocean...* Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Toulouse, 201 pp, 2015.
- CHAVAGNAC V., WANIEK J.J., ATKIN D., MILTON J.A., LEIPE T., GREEN D.R.H., BAHLO R., HAYES T.E.F. and SCHÜLTZ-BULL D.E. – *Source of Lithogenic Derived Element Fluxes to the Deep Subtropical North East Atlantic Ocean*. Geophysical Research Letters, 34, L21604, doi:10.1029/2007GL030985, 2007.
- EDMOND J.M., MEASURES C., MAGNUM B., GRANT B., SCLATER F.R., COLLIER R., HUDSON A., GORDON L.I. and CORLISS J.B. – *On the Formation of Metal-Rich Deposits at Ridge Crests*. Earth Planetary Science Letter, 46: 19-30, 1979.
- ELDERFIELD H. and SCHULTZ A. – *Mid-Ocean Ridge Hydrothermal Fluxes and the Chemical Composition of the Ocean*. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 24: 191-224, 1996.
- JEANDEL C. and OELKERS E.H. – *The Influence of Terrigenous Particulate Material Dissolution on Ocean Chemistry and Global Element Cycles*. Chemical Geology, 404 : 41-51, 2015.
- MILLIMAN J.D. and FARNSWORTH K.L. – *River Discharge to the Coastal Ocean. A Global Synthesis*. Cambridge University press. 382 pp, 2011.
- RESING J.A., SEDWICK P.N., GERMAN C.R., JENKINS W.J., MOFFETT J.W., SOHST B.M. and TAGLIABUE A. – *Basin-Scale Transport of Hydrothermal Dissolved Metals across the South Pacific Ocean*. Nature, 523(9), doi : 10.1038/nature14577, 2015.
- TAGLIABUE A., WILLIAMS R.G., ROGAN N., ACHTERBERG E.P. and BOYD P.W. – *A Ventilation-Based Framework to Explain the Regeneration-Scavenging Balance of Iron in the Ocean*. Geophysical Research Letters, 41, 7227-7236, 2014.



Acidification des océans

Jean-Pierre Gattuso,
Lina Hansson

Chaque jour, les océans absorbent un quart du 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 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 (CO_3^{2-}) qui sont l'une des briques nécessaires aux plantes et animaux marins pour fabriquer leurs squelettes, coquilles et autres structures calcaires. L'acidité des océans a augmenté de 30 % en 250 ans et ce phénomène continue à s'amplifier. Ses effets et son interaction avec d'autres modifications environnementales restent mal connus. L'acidification menace directement des espèces comme les huîtres et les moules consommées 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 (CO_2) produit par l'homme. Le résultat ? Une acidification des océans qui n'est pas sans conséquence 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 (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 CO_2 le responsable. En fait, l'acidification des océans est parfois appelée « l'autre problème du CO_2 ».

LA CHIMIE

La totalité du CO_2 que nous produisons tous les jours ne reste pas dans l'atmosphère. Environ un quart du CO_2 émis est absorbé par nos océans. Sans les océans, la quantité de 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 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 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 (CO_3^{2-}) qui sont l'une des briques nécessaires aux plantes et animaux marins pour fabriquer leurs squelettes, 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 CO_2 est un gaz acide.



Il est présent dans les boissons gazeuses: les petites bulles dans le soda sont des bulles de CO_2 . Lorsque le 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 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 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°C à -10°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 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 CO_2 par l'eau de mer entraîne donc une augmentation de protons (ions H^+) mais aussi la diminution de certaines molécules, comme les ions carbonates (CO_3^{2-}), nécessaires à de nombreux organismes marins pour fabriquer leur squelette ou coquille calcaire (coraux, moules, huîtres...). La plupart des plantes et animaux calcaires auront de plus en plus de 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. Ces derniers 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 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. 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 du plancton, des coraux, comme source de nourriture, ou d'habitat. Ainsi, l'acidification pourrait avoir des conséquences sur les réseaux alimentaires, la biodiversité de certains écosystèmes et des conséquences économiques pour l'Homme. Par exemple, le ptéropode est mangé par le saumon dans le



Pacifique nord et l'océan Arctique. Or, le saumon du Pacifique représente une ressource très importante 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 CO₂. Il est cependant parfaitement possible de limiter la progression de l'acidification et de limiter ses impacts. Des techniques de géo-ingénierie plus ou moins réalistes ou désirables ont été proposées pour limiter l'acidification, tel que l'ajout de com-

posés 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 source du problème, c'est-à-dire à l'augmentation du CO₂. La réduction des rejets 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 des combustibles fossiles. Mais chacun d'entre nous peut y contribuer, en limitant nos émissions, par exemple en prenant le train plutôt que la voiture, en économisant de l'électricité. On peut aussi en parler autour de nous en motivant nos proches et nos amis à en faire autant.

POUR EN SAVOIR PLUS

- Laboratoire virtuel – http://i2i.stanford.edu/AcidOcean/AcidOcean_Fr.htm
- Animation sur l'acidification en français – www.youtube.com/watch?v=KqtxGZKItS8
- Animation projet BNP Paribas eFOCE – www.youtube.com/watch?v=QhgQ4unMVUM
- Animation « Hermie the hermit crab » – www.youtube.com/watch?v=RnqJMIhH5yM Great Barrier Reef Marine Park Authority
- Brochures en français – 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



L'océan est à bout de souffle

Kirsten Isensee,
Lisa Levin,
Denise Breitburg,
Marilaure Gregoire,
Véronique Garçon,
Luis Valdés

La diminution du contenu en oxygène (désoxygénation) des eaux marines et côtières s'est aggravée ces dernières décennies dans différentes régions de l'océan mondial. Les causes principales sont d'une part le changement climatique (les eaux plus chaudes contiennent moins d'oxygène et l'augmentation de la stratification en surface réduit la ventilation et donc l'oxygénation de l'intérieur des océans et des estuaires) et d'autre part l'eutrophisation (enrichissement des eaux en nutriments) des zones côtières, due à l'intensification des activités humaines. La désoxygénation en océan ouvert, le réchauffement et l'acidification – tous liés à l'augmentation de dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère – constituent ainsi des stress multiples sur l'écosystème océanique et une menace globale dont les conséquences socio-économiques commencent juste à être reconnues.

La problématique de la diminution du contenu en oxygène (désoxygénation) des eaux côtières et océaniques s'est aggravée durant les dernières décennies dans différentes régions de l'océan mondial. Les causes principales de cette désoxygénation à grande échelle sont le changement climatique et l'eutrophisation des eaux résultant de l'intensification des activités humaines affectant les zones côtières (e.g. agriculture, urbanisation, industrialisation).

On s'attend à une aggravation de la situation dans le futur en raison du réchauffement global et de l'augmentation de la population mondiale avec des conséquences multisectorielles. L'oxygène est absolument nécessaire pour le maintien de la vie des organismes aérobies depuis l'estran jusqu'à l'océan profond. C'est un élément critique à la santé de notre planète qui est directement impliqué dans les cycles biogéochimiques du carbone, azote et autres éléments de base. Le problème de la désoxygénation affecte aussi bien la zone côtière et estuarienne que de larges régions de l'océan

ouvert, appelées zones de minimum d'oxygène (OMZs pour « Oxygen Minimum Zones »). Les effets d'un phénomène de désoxygénation local peuvent se traduire à plus grande échelle notamment à travers la migration des organismes avec des conséquences écologiques, économiques et sociétales résultant de l'effondrement des pêcheries et de l'aquaculture au sein des habitats affectés par le manque d'oxygène. La désoxygénation des océans a été discutée dans le dernier rapport du GIEC (2014) mais la nature globale de cette menace émergente n'est pas encore pleinement reconnue et n'est notamment pas intégrée dans l'agenda des responsables politiques et des parties prenantes au niveau global. La désoxygénation en lien avec l'eutrophisation a généralement été gérée à l'échelle locale ou régionale tandis que la présence de faibles quantités d'oxygène dans les eaux profondes et de résurgences a souvent été considérée comme un phénomène naturel. C'est seulement depuis peu que ce déficit en oxygène est reconnu comme étant la conséquence du changement climatique.

BASE SCIENTIFIQUE DE LA DÉSOXYGÉNATION

L'océan est un acteur majeur dans la médiation du cycle global de l'oxygène. Au moins 50 % de l'oxygène que nous respirons provient de l'océan. Les organismes photosynthétiques marins produisent de l'oxygène tandis que la respiration dans la colonne d'eau et le sédiment ainsi que l'équilibration des eaux de surface avec l'atmosphère constituent des puits d'oxygène. Ces puits sont exacerbés par l'eutrophisation des eaux côtières et par le réchauffement global causé par la croissance du dioxyde de carbone dans l'atmosphère.

Des conditions hypoxiques à anoxiques voire sulfidiques ont été répertoriées dans divers systèmes aquatiques, depuis les systèmes côtiers comme les lacs, estuaires et régions côtières jusqu'aux régions profondes du large dans lesquelles l'apport et la production d'oxygène ne sont pas capables de compenser sa consommation (IPCC, 2014). La valeur seuil de la concentration d'oxygène souvent utilisée pour définir la présence d'hypoxie dans les estuaires et zones côtières est de $60 \mu\text{mol kg}^{-1}$ (environ $1,5 \text{ ml l}^{-1}$ ou 2 mg l^{-1}) (Gray *et al.*, 2002). Les régions avec des niveaux d'oxygène en dessous de ce seuil sont souvent mentionnées comme « zones mortes ». Cependant, des expériences ont révélé que la tolérance au manque d'oxygène varie fortement en fonction du taxon marin considéré. En effet, certaines espèces ont un besoin en oxygène bien supérieur au seuil de $60 \mu\text{mol kg}^{-1}$ pour assurer leur croissance et reproduction, tandis que d'autres peuvent s'adapter à la vie dans des faibles conditions d'oxygène (e.g. bactéries). En général, les poissons mobiles et crustacés ont tendance à être plus sensibles au manque d'oxygène (Vaquer-Sunyer & Duarte, 2008). Les animaux plus grands deviennent généralement plus rares lorsque la concentration en oxygène tombe en dessous du seuil de $60 \mu\text{mol kg}^{-1}$ et finissent par disparaître du système.

Dans l'océan côtier, le nombre de zones mortes répertoriées a augmenté exponentielle-



Fig.1 — Cartographie des régions côtières affectées par l'hypoxie et l'eutrophisation (Figure non publiée communiquée par Diaz, 2015, et résultant d'une mise à jour de la Figure 1 de Diaz et Rosenberg, 2008).

ment depuis les années 60 avec actuellement plus de 479 systèmes recensés comme étant hypoxiques (e.g. la mer Noire, Baltique, de Cattégat, le Golfe de Mexico, la mer de Chine) (Diaz and Rosenberg, 2008)¹. Une partie de cette augmentation peut être attribuée à une amélioration des stratégies d'observation et de surveillance ainsi qu'à une prise de conscience grandissante de la problématique, mais la plus large partie est le résultat d'une utilisation accélérée et inefficace des fertilisateurs chimiques, et de la pollution intensifiée par l'augmentation de la population humaine. Dans les régions peu profondes comme les zones côtières, les plateaux continentaux et les estuaires, où le fond est peuplé par des communautés benthiques d'une grande valeur économique et écologique, les événements hypoxiques/anoxiques peuvent être catastrophiques. Parmi les événements hypoxiques les plus sévères, on note ceux qui ont (eu) lieu dans les estuaires recevant les eaux usées non traitées émanant de grands centres urbains. Cette situation représente une menace inquiétante pour la santé humaine et environnementale qui s'étend bien au-delà des problèmes de sécurité alimentaire liés aux effets potentiels de l'hypoxie sur les pêcheries et l'aquaculture.

Dans l'océan ouvert, les upwellings (résurgences) qui ont lieu le long de la façade Est des océans (EBUS pour « Eastern Boundary

¹ WorldResources Institute : Interactive Map of Eutrophication & Hypoxia <http://www.wri.org/media/maps/eutrophication/>

Upwelling Systems») sont le siège d'une production primaire soutenue donnant lieu à un export vertical vers le fond de matière organique. La dégradation de cette production intense cause des zones dépourvues naturellement en oxygène et entraîne le développement de zones de minimum d'oxygène (OMZs) dans les eaux intermédiaires. Dans ces régions, on trouve des eaux (en dessous de la thermocline) avec des concentrations d'oxygène inférieures à $20 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ($< 0,5 \text{ ml l}^{-1}$), tandis que la plupart des espèces subissent une limitation de leur développement à des valeurs bien supérieures du niveau d'oxygène (Gilly *et al.*, 2013). Par exemple, les grands marlins ressentent le manque d'oxygène pour des concentrations de l'ordre de $150 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ($3,5 \text{ ml l}^{-1}$; Prince and Goodyear, 2006).

À travers l'émission de gaz traces radiativement actifs, les OMZs jouent un rôle critique dans la composition chimique de l'atmosphère et dans le climat (Law *et al.*, 2013). Elles affectent également le fonctionnement et la structure de l'écosystème dans la colonne d'eau et le fond. Ce sont des régions qui ont une dynamique marquée sur les périodes glaciaires-interglaciaires, mais leur taille semble augmenter dans les régions tropicales et subtropicales ainsi que dans la partie nord-est de l'océan Pacifique en raison du changement climatique. Le réchauffement climatique contribue à la désoxygénation de différentes façons: les eaux plus chaudes contiennent moins d'oxygène tandis que l'augmentation de la stratification résultant du réchauffement en surface réduit la ventilation (et donc l'oxygénation) de l'intérieur des océans (Keeling *et al.* 2010, Stramma *et al.* 2008a, 2008b, 2010) et des estuaires (Altieri and Gedan 2014). De plus, le réchauffement de l'atmosphère crée un différentiel de température entre le continent et la mer qui peut intensifier l'upwelling des eaux pauvres en oxygène (Bakun, 1990).

Des travaux récents suggèrent une expansion potentielle de l'hypoxie côtière. Cela veut dire que l'on s'attend à ce que la désoxygénation des océans maintienne une pression croissante sur les écosystèmes aquatiques vivant dans les habitats côtiers et l'océan profond. Cette ex-

pansion des zones anoxiques et hypoxiques va affecter le fonctionnement et les cycles biogéochimiques des écosystèmes aquatiques ainsi que la provision des biens et services par ces écosystèmes. Les régions océaniques en état de suffocation voient leur capacité à fournir un environnement favorable à la vie diminuer. Les modèles ont des difficultés à représenter fidèlement les données historiques d'oxygène des 40 dernières années (Cabrè *et al.*, 2015) ce qui signifie que nous devons encore améliorer notre compréhension des mécanismes en jeu dans la distribution de l'oxygène de l'océan global. Les projections des modèles climatiques suggèrent une intensification de la désoxygénation dans le futur (e.g. Matear *et al.* 2000; Bopp *et al.* 2002, 2013; Oschlies *et al.* 2008). Les capacités prédictives de ces modèles ont été testées en comparant les résultats de leurs simulations des événements passés à des données géologiques. Les prédictions des modèles ainsi que les données géologiques illustrent l'expansion des événements anoxiques en réponse aux excursions climatiques et aux périodes glaciaires-interglaciaires (Moffitt *et al.*, 2015).

STRATÉGIES POUR LE FUTUR

La désoxygénation, le réchauffement et l'acidification des océans forment un trio de menaces qui sont d'une importance critique pour les écosystèmes marins de par leur accélération drastique sur des échelles de temps courtes (Gruber 2011, Mora *et al.* 2013, Bopp *et al.* 2013). Les scénarios futurs de distribution des concentrations d'oxygène dans l'océan côtier

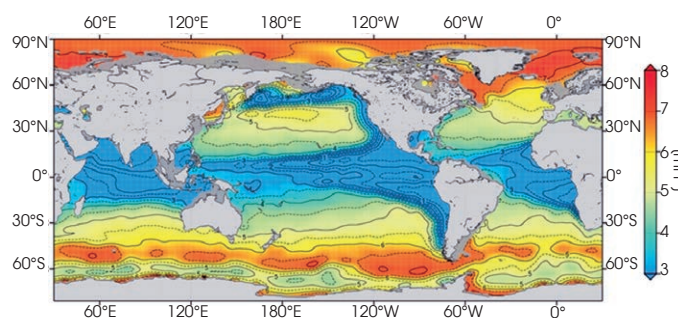


Fig.2 — Concentration d'oxygène (valeur moyenne annuelle, en ml l^{-1}) à une profondeur de 200 m (résolution $1^\circ \times 1^\circ$, espacement des isocourbes: $0,5 \text{ ml l}^{-1}$) (World Ocean Atlas 2013, Garcia *et al.*, 2014).

et hauturier vont dépendre en grande partie d'une combinaison de facteurs reliés au changement global et à l'utilisation des sols, incluant le réchauffement climatique, une démographie mondiale croissante, en particulier le long des côtes, et les pratiques agricoles. Dans le cas d'un scénario de développement socioéconomique semblable au modèle actuel (« business as usual »), il est prévu une augmentation de 50 % en 2050 (Noone *et al.* 2012) de la quantité d'azote réactif arrivant à l'océan, induisant ainsi un accroissement de la fréquence, de l'intensité et de la durée de l'hypoxie côtière. Simultanément, l'intensification des vents dans les upwellings (Sydeman *et al.* 2014, Wang *et al.* 2015) et la circulation océanique ainsi modifiée (Bograd *et al.* 2008, 2014) amènent les eaux des OMZs plus près des côtes et sur la plateforme où elles peuvent interagir avec les eaux provenant du continent et les sources côtières d'hypoxie (Feely *et al.* 2008, 2010). Une action intégrée est urgente pour prévenir et remédier à l'hypoxie.

La plupart de l'information que nous avons sur l'hypoxie est basée sur les activités scientifiques de chercheurs d'Amérique du Nord, d'Europe et d'Asie, mais des travaux récents indiquent que les marges continentales du Pérou-Chili, d'Afrique de l'Ouest, de l'océan Indien Nord et de la Baie du Bengale sont de plus en plus vulnérables aux événements hypoxiques sur la plateforme (Hofmann *et al.* 2011). Nous pouvons remonter dans le passé pour trouver des exemples d'hypoxie sévère résultante des activités humaines, par exemple l'estuaire de la Tamise au Royaume-Uni ou la rivière Delaware aux États-Unis et dans l'actuel, plus particulièrement dans les pays émergents à industrialisation accélérée, comme l'estuaire de la rivière Pearl en Chine. Moins d'information est disponible sur les conditions dans les régions du monde les moins peuplées – l'océan ouvert et les îles océaniques, toutefois il est clair que certains de ces systèmes sont aussi fortement affectés.

Un réseau global d'observations faciliterait et améliorerait les capacités de surveillance de l'oxygène océanique et permettrait d'identifier les lacunes dans notre connaissance afin d'orienter les recherches futures. Un nouvel ef-

fort collaboratif est requis pour étendre la couverture globale des données océaniques d'oxygène, pour réviser les prévisions des modèles et standardiser les méthodes appliquées afin d'améliorer les prédictions associées à la sécurité alimentaire et au tourisme, et pour évaluer les impacts sur les services écosystémiques de support tels que la séquestration du carbone, les cycles des nutriments, la biodiversité et les habitats marins. L'ampleur et la menace globales de la désoxygénation pour la santé humaine et les services écosystémiques marins commencent juste à être appréciées et beaucoup d'inconnues subsistent en ce qui concerne ses conséquences socio-économiques. Ainsi, un des plus grands défis auquel les actions scientifiques futures devront faire face est l'estimation des coûts de la désoxygénation. À l'heure actuelle, la monétarisation des conséquences économiques et écologiques de la décroissance des concentrations en oxygène est nécessaire mais est toujours très rare, trop générale (Mora *et al.*, 2013) ou restreinte à certaines régions du monde, e.g. le Golfe du Mexique (Rabotyagov *et al.*, 2014). La bonne nouvelle est que lorsque l'eutrophisation est à l'origine de l'hypoxie, il est possible de revenir à des niveaux d'oxygène normaux même dans les régions les plus touchées. Cependant, les sédiments introduisent un délai dans le processus de rétablissement du système. Ce délai est difficilement estimable en raison de la complexité du système et varie d'une région à l'autre. De plus, le réchauffement va ralentir la récupération/restauration de ces zones et peut exiger des réductions encore plus drastiques des charges en nutriments dans les cours d'eau (Capet *et al.*, 2013). Le traitement des déchets et une efficacité accrue de l'utilisation des fertilisants sont nécessaires. Des infrastructures institutionnelles pour la gestion des déchets et des charges en nutriments doivent être renforcées voire mises en place aux niveaux local, régional, national et global. De nouveaux partenariats publics-privés doivent se créer au sein des secteurs clés pour stimuler l'innovation technologique en matière de réduction et/ou recyclage des nutriments. Les solutions pour l'atténuation et l'adaptation à la désoxygénation doivent être diversifiées. Elles peuvent inclure la gestion de la qualité des eaux, la réduction ou l'arrêt

de la pêche pendant les périodes de désoxygénation, la création de zones protégées (e.g. aires marines protégées (AMPs), zones refuges bien oxygénés), le rétablissement de la ventilation et le contrôle des dommages causés par les maladies, les contaminants, la dégradation des habitats ou les espèces invasives.

La désoxygénation en océan ouvert, le réchauffement et l'acidification des océans sont

tous induits par la croissance du dioxyde de carbone dans l'atmosphère. En conséquence, la seule solution efficace pour atténuer le changement environnemental global est la réduction des émissions de carbone. Il est devenu impératif de reconnaître et comprendre l'impact combiné de ces facteurs climatiques multiples de stress avec d'autres activités humaines, et de gérer les conséquences de ces pressions sur les écosystèmes océaniques.

Le défi de la gestion des multiples pressions affectant l'océan : Réchauffement global, acidification, désoxygénation

Toutes les régions océaniques sont sous l'influence de pressions multiples. La réponse biologique à ces facteurs est très variable et complexe. La réduction de facteurs locaux de stress peut potentiellement influencer sur l'impact des facteurs globaux. Une restriction des pêches peut parfois compenser la mortalité et la production perdue en raison de l'hypoxie (Breitburg et al. 2009) mais aura des conséquences socio-économiques. De façon à gérer nos océans durablement, il convient de considérer l'impact de ces facteurs multiples pour une prédiction avisée de notre environnement marin futur. Alors que les changements physiques et biogéochimiques associés au réchauffement océanique, à l'acidification et à la désoxygénation ont lieu partout dans l'océan global, la signature de ces facteurs de stress globaux peut être de nature très régionale voire locale. Ainsi, la coalescence de différents facteurs de stress globaux dans certaines régions crée déjà un nombre de « *hot spots* », par exemple les systèmes d'upwelling (résurgences) de bord Est. En addition à ces « *hot spots* » régionaux, certains écosystèmes marins sont hautement vulnérables aux facteurs de stress multiples, par exemple les récifs coralliens. D'autres exemples montrent que les prédateurs supérieurs marins de la chaîne trophique de l'océan Pacifique Est, organismes importants pour le développement économique des régions littorales, sont altérés par la désoxygénation, l'acidification et le réchauffement océanique.

Les différents niveaux de réponse nécessitent une estimation de la prise en compte des impacts des facteurs multiples de stress aux niveaux physiologique/biogéochimique, de l'organisme et de l'écosystème. Cette estimation doit inclure la collecte d'observations, la réalisation d'expériences et le développement de modèles fiables de prévision.

En accord avec les résultats des scientifiques, les décideurs doivent agir pour gérer les ressources marines au vu des facteurs multiples de stress. Des modes de gouvernance à différentes échelles (du local au global) pour les ressources marines doivent être développés et mis en place. Des changements de comportement au niveau de la société devraient se traduire par des réductions de menaces locales et simultanément, une approche du principe de précaution devrait être adoptée à l'échelle globale. Enfin, l'éducation et la formation d'une jeune génération de scientifiques dans les régions du globe sévèrement affectées par ces menaces multiples sont primordiales, ceci d'autant plus que la connaissance et la compréhension des processus en jeu peuvent y être encore très limitées. Des programmes d'échange appropriés pourraient être mis en place afin de faciliter le transfert de connaissances entre les différentes régions du globe confrontées à la désoxygénation.

RÉFÉRENCES

- ALTIERI, A.H. and GEDAN, K.B., 2014 – *Climate Change and Dead Zones*. Global change biology, doi: 10.1111/gcb.12754.
- BAKUN, A., 1990 – *Global Climate Change and Intensification of Coastal Ocean Upwelling*. Science, 247: 198-201.
- BOGRAD, S.J., CASTRO, C.G., DI LORENZO, E., PALACIOS, D.M., BAILEY, H., GILLY, W. and CHAVEZ, F.P., 2008 – *Oxygen Declines and the Shoaling of the Hypoxic Boundary in the California Current*. Geophys. Res. Lett., 35, L12607.

- BOGRAD, S.J., BUIL, M.P., DI LORENZO, E., CASTRO, C.G., SCHROEDER, I.D., GOERICKE, R., ANDERSON, C.R., BENITEZ-NELSON, C. and WHITNEY, F.A., 2015 – *Changes in Source Waters to the Southern California Bight*. Deep-Sea Res. Pt II, 112, 42-52.
- BOPP, L., LE QUERE, C., HEIMANN, M., MANNING, A.C. and MONFRAY, P., 2002 – *Climate Induced Oceanic Oxygen Fluxes: Implications for the Contemporary Carbon Budget*. Global Biogeochem. Cycles 16, doi: 10.1029/2001GB001445.
- BOPP, L., RESPLANDY, L., ORR, J.C., DONEY, S.C., DUNNE, J.P., GEHLEN, M., HALLORA, P., HEINZE, C., ILYINA, T., SÉFÉRIAN, R., TJIPUTRA, J. and VICHI, M., 2013 – *Multiple Stressors of Ocean Ecosystems in The 21st Century: Projections with Cmp5 Models*. Biogeosciences, 10, 6225-6245.
- BREITBURG, D.L., CRAIG, J.K., FULFORD, R.S., ROSE, K.A., BOYNTON, W.R., BRADY, D.C., CIOTTI, B.J., DIAZ, R.J., FRIEDLAND, K.D., HAGY, J.D., HART, D.R., HINES, A.H., HOUDE, E.D., KOLESAR, S.E., NIXON, S.W., RICE, J.A., SECOR, D.H. and TARGETT, T.E., 2009 – *Nutrient Enrichment And Fisheries Exploitation: Interactive Effects On Estuarine Living Resources And Their Management*. Hydrobiologia, 629 (1), 31-47.
- CABRÉ, A., MARINOV, I., BERNARDELLO, R. and BIANCHI, D., 2015 – *Oxygen Minimum Zones in the Tropical Pacific across Cmp5 Models: Mean State Differences and Climate Change Trends*. Biogeosci. Discuss. Special Issue on Low Oxygen Environments.
- CAPET, A., BECKERS, JM, BARTH A., GREGOIRE M., 2013 – *Drivers, Mechanisms and Long-Term Variability of Seasonal Hypoxia on the Black Sea Northwestern Shelf – Is there any Recovery after Eutrophication ?* Biogeosciences, 10, 3943-3962.
- DIAZ, R.J. and Rosenberg, R., 2008 – *Spreading Dead Zones and Consequences for Marine Ecosystems*. Science, 321 (5891), 926-929.
- FEELY, R.A., SABINE, C.L., HERNANDEZ-AYON, J.M., IANSON, D. and HALES, B., 2008 – *Evidence For Upwelling Of Corrosive" Acidified" Water Onto The Continental Shelf*. Science, 320 (5882), 1490-1492.
- FEELY, R.A., ALIN, S.R., NEWTON, J., SABINE, C.L., WARNER, M., DEVOL, A., KREMBS, C. and MALOY, C., 2010. *The Combined Effects of Ocean Acidification, Mixing, and Respiration on Ph and Carbonate Saturation in an Urbanized Estuary*. Estuar. Coast. Shelf Sci., 88 (4), 442-449.
- GARCIA, H.E., LOCARNINI, R.A., BOYER, T.P., ANTONOV, J.I., BARANOVA, O.K., ZWENG, M.M., REAGAN, J.R. and JOHNSON, D.R., 2014 – *World Ocean Atlas 2013, Volume 3: Dissolved Oxygen, Apparent Oxygen Utilization, and Oxygen Saturation*. S. LEVITUS, Ed., A. Mishonov Technical Ed.; NOAA Atlas NESDIS 75, 27 pp.
- GILLY, W.F., BEMAN, J.M., LITVIN, S.Y. and ROBISON, B. H., 2013 – *Oceanographic and Biological Effects of Shoaling of the Oxygen Minimum Zone*. Ann. Rev. Mar. Sci., 5, 393-420.
- HOFMANN, A.F., PELTZER, E.T., WALZ, P.M. and BREWER, P.G., 2011 – *Hypoxia by Degrees: Establishing Definitions for a Changing Ocean*. Deep-Sea Res. Pt I, 58 (12), 1212-1226.
- IPCC - FIELD, C.B., BARROS, V.R., MACH, K. and MASTRANDREA, M., 2014 – *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- GRAY, J.S., WU, R.S.S. and OR, Y.Y., 2002 – *Effects of Hypoxia and Organic Enrichment on the Coastal Marine Environment*. Mar. Ecol.-Prog. Ser., 238, 249 – 79.
- Gruber, N., 2011 – *Warming Up, Turning Sour, Losing Breath: Ocean Biogeochemistry under Global Change*. Philos. T. Roy. Soc., 369, 1980-1996.
- KEELING, R.F., KÖRTZINGER, A. and GRUBER, N., 2010 – *Ocean Deoxygenation in a Warming World*. Annu. Rev. Mar. Sci., 2, 199 – 229.
- LAW, C.S., BRÉVIERE, E., DE LEEUW, G., GARÇON, V., GUIEU, C., KIEBER, D.J., KONTRADOWITZ, S., PAULMIER, A., QUINN, P.K., SALTZMAN, E.S. STEFELS, J., VON GLASOW, R., 2013 – *Evolving Research Directions in Surface Ocean – Lower Atmosphere (Solas) Science*. Environ. Chem, 10, 1-16. <http://dx.doi.org/10.1071/EN12159>.
- LEVIN, L.A., 2003 – *Oxygen Minimum Zone Benthos: Adaptation and Community Response to Hypoxia*. Oceanogr. Mar. Biol. 41, 1-45.



- LEVIN, L.A. and BREITBURG, D.L., 2015 – *Linking Coasts and Seas to Address Ocean Deoxygenation*. Nat. Clim. Chang. 5.
- LEVIN, L.A. EKAU, W., GOODAY, A., JORRISEN, F., MIDDELBURG, J., NEIRA, C., RABALAIS, N., NAQVI, S.W.A. and ZHANG, J., 2009 – *Effects Of Natural And Human-Induced Hypoxia On Coastal Benthos*. Biogeosciences 6, 2063-2098.
- MATEAR, R.J., HIRST, A.C., MCNEIL, B.I., 2000 – *Changes in Dissolved Oxygen in the Southern Ocean With Climate Change*. Geochem. Geophys. Geosyst., 1 2000GC000086.
- MOFFITT, S.E., MOFFITT, R.A., SAUTHOFF, W., DAVIS, C. V., HEWETT, K. and HILL, T.M., 2015 – *Paleoceanographic Insights on Recent Oxygen Minimum Zone Expansion: Lessons for Modern Oceanography*. PloS one, 1, 39.
- MORA, C., WEI, C.-L., ROLLO, A., AMARO, T., BACO, A.R., BILLET, D., BOPP, L., CHEN, Q., COLLIER, M., DANOVARO, R., GOODAY, A.J., GRUPE, B.M., HALLORAN, P.R., INGELS, J., JONES, D.O.B., LEVIN, L.A., NAKANO, H., NORLING, K., RAMIREZ-LLODRA, E., REX, M., RUHL, H.A., SMITH, C.R., SWEETMAN, A.K., THURBER, A.R., TJIPUTRA, J.F., USSEGLIO, P., WATLING, L., WU, T. and YASUHURA, M., 2013 – *Biotic and Human Vulnerability to Projected Changes in Ocean Biogeochemistry over The 21st Century*. PLoS Biology, 11 (10): e1001682. doi: 10.1371/journal.pbio.1001682.
- NOONE, K., SUMAILA, R. and DÍAZ, R.J., 2012 – *Valuing the Ocean Draft Executive Summary*. Stockholm Environmental Institute.
- OSCHLIES, A., SCHULTZ, K.G., RIEBESELL, U. and SCHMITTNER, A., 2008 – *Simulated 21 Century's Increase in Oceanic Suboxia in CO_2 -Enhanced Biotic Carbon Export*. Global Biogeochem. Cycles, 22, GB4008, doi: 10.1029/2007GB003147.
- PRINCE, E.D. and GOODYEAR, C.P., 2006 – *Hypoxia-Based Habitat Compression of Tropical Pelagic Fishes*. Fish. Oceanogr., 15, 451-464.
- RABOTYAGOV, S.S., KLING, C.L., GASSMAN, P.W., RABALAIS, N.N. and TURNER, R.E., 2014 – *The Economics of Dead Zones: Causes, Impacts, Policy Challenges, and a Model of the Gulf of Mexico Hypoxic Zone*. Rev.. Environ. Econ. Pol., 8 (1), 58-79.
- STRAMMA, L., BRANDT, P., SCHAFSTALL, J., SCHOTT, F., FISCHER, J. and KÖRTZINGER, A., 2008 – *Oxygen Minimum Zone in the North Atlantic South and East of the Cape Verde Islands*. J. Geophys. Res., 113, doi: 10.1029/2007JC004369.
- STRAMMA, L., JOHNSON, G.C., SPRINTALL, J. and MOHRHOLZ, V., 2008 – *Expanding Oxygen-Minimum Zones in the Tropical Oceans*. Science, 320, 655 – 658.
- STRAMMA, L., SCHMIDTKO, S., LEVIN, L.A. and JOHNSON, G.C., 2010 – *Ocean Oxygen Minima Expansions and their Biological Impacts*. Deep-Sea Res. Pt. I, 57 (4), 587-595.
- SCHEFFER, M., BARRETT, S., CARPENTER, S.R., FOLKE, C., GREEN, A.J., HOLMGREN, M., HUGHES, T.P., KOSTEN, S., VAN DE LEEMPUT, I.A., NEPSTAD, D.C., VAN NES, E.H., PEETERS, E.T.H.M. and WALKER, B., 2015 – *Creating a Safe Space for Iconic Ecosystems*. Science, 347, 1317-1319.
- SYDEMAN, W.J., GARCÍA-REYES, M., SCHOEMAN, D.S., RYKACZEWSKI, R.R., THOMPSON, S.A., BLACK, B.A., BOGRAD and S.J., 2014 – *Climate Change and Wind Intensification in Coastal Upwelling Ecosystems*. Science, 345 (6192), 77-80.
- VAQUER-SUNYER, R. and DUARTE, C. M., 2008 – *Thresholds of Hypoxia for Marine Biodiversity*. Proc. Natl. Acad. Sci., 105, 15452 – 15457.
- WANG, D., GOUHIER, T., MENGE, B. and GANGULY A., 2015 – *Intensification and Spatial Homogenization of Coastal Upwelling under Climate Change*. Nature, 518, 390-394.
- WORLD RESOURCES INSTITUTE – www.wri.org/our-work/project/eutrophication-and-hypoxia/interactive-map-eutrophication-hypoxia.



Les grands fonds océaniques : quels enjeux climatiques ?

L'océan profond de 200 m 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* », points chauds, 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 CO₂ atmosphérique libéré par les activités humaines et par 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-

male 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 de l'atmosphère, et dont les propriétés chimiques (oxygène, nitrate, pH, CO₂) évoluent très lentement au fur et à mesure que la matière organique y est consommée par les micro-organismes.

À cette vision à grande échelle de l'océan correspond celle de grands fonds biologiquement peu actifs, peuplés d'espèces aux métabolismes lents, adaptés aux fortes pressions ainsi qu'à un environnement obscur, froid et pauvre en ressources nutritives. Considérées comme uniforme et quasi-désertiques, 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 alimentées 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 annuels dans la productivité photosynthétique à la surface de l'océan.

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 comparés aux 8 500 m de l'Everest) sur lequel 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 chauds de biodiversité et de productivité, dont le fonctionnement et les services associés pourraient se révéler particulièrement vulnérables aux effets du changement climatique 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 refuge et nurserie pour de nombreuses espèces de poissons, crustacés, et invertébrés

(Roberts *et al.*, 2006). Les "services rendus" identifiés pour ces écosystèmes sont largement en lien avec les ressources des pêcheries artisanales ou industrielles, mais il est clair que ce patrimoine recèle des richesses encore largement inconnues, comme 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 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 CO₂ 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 dans le cycle du carbone reste à quantifier, notamment pour le méthane puissant gaz à effet de serre dont une fraction y est piégée sous forme de carbonates. Alors que leur vulnérabilité est mal évaluée, leur valeur patrimoniale sur le plan scientifique (évolution de la vie) et sur le plan 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 décennies. 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 en Méditerranée dont la température ne descend pas en dessous de 12 °C.

L'acidification de l'océan, l'autre problème du CO₂, est d'autant plus critique que le pH des eaux profondes est déjà faible du fait du CO₂ 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 ballast 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 en cours (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, le bassin caribéen profond est ventilé par le passage d'eaux atlantique froides par un seuil à 1 850 m de profondeur dont le débit semble diminuer depuis les années 1970. De même les eaux au large du Groenland tendent à devenir moins oxygénées, 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 l'échelle locale et régionale. L'un des exemples les mieux documentés concerne le phénomène de « *cascading* ». Ces cascades sont formées par les eaux de surface qui lorsqu'elles se refroidissent et s'enrichissent en sel deviennent plus denses que les eaux pro-



fondes, et finissent par « couler » vers les profondeurs en entraînant une couche superficielle de 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 des 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 tout juste à être décrits.

LES SÉDIMENTS PROFONDS : RÉSERVOIRS OU SOURCE DE GAZ À EFFET DE SERRE (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 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. Sous l'effet du réchauffement climatique, la dissociation de ces hydrates pourrait aggraver considérablement la concentration des GES dans l'atmosphère, lorsque ce gaz est émis massivement (train de bulles). Le méthane dissous est lui totalement consommé par des micro-organismes présents dans l'eau et dans les sédiments. La dissociation des hydrates impacte également en cascade les écosystèmes asso-

ciés, 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 un inventaire de plus en plus précis et détaillé de ces points chauds et des flotilles de flotteurs dérivants, ont apporté une vision large 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.

Aujourd'hui, la connaissance de la variabilité écologique en milieu profond s'appuie 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. 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 « *hot spots* » 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 Niño et La Niña, 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

- ADAMS D. 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 WENZHOFFER 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 21st 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.

L'océan Austral

Philippe Koubbi
Gabriel Reygondeau
Claude De Broyer
Andrew Constable
William W.L. Cheung

La partie australe de l'océan mondial est la plus isolée de toute activité industrielle ou anthropique. Pourtant, depuis plusieurs décennies, de nombreux observateurs rapportent des changements significatifs aussi bien des écosystèmes que des espèces qui y vivent. Ces perturbations ont été dans la majorité des cas attribuées aux conséquences de l'activité humaine qu'elles soient indirectes (augmentation de la température, modification de la saisonnalité de la banquise, conséquences du trou dans la couche d'ozone, acidification des eaux) ou directes (exploitation des ressources vivantes par les pêches). La magnitude de ces pressions varie en fonction des régions de l'océan Austral. Si l'image d'un océan peu diversifié est gravée dans l'esprit collectif, il n'en est rien comme le montre l'Atlas biogéographique de l'océan Austral (De Broyer *et al.*, 2014) où plus de 9064 espèces ont été identifiées. Les perturbations déjà observées sont supposées altérer le fonctionnement de ces écosystèmes et des réseaux trophiques. Cela concerne la modification des habitats des espèces pélagiques et benthiques, des producteurs primaires jusqu'aux prédateurs supérieurs, des organismes côtiers aux espèces des profondeurs, de la zone subantarctique sans glace aux zones couvertes par la banquise. Un exemple connu est la modification du régime de la glace de mer autour de la péninsule Antarctique. Cependant, l'intensité de ce changement s'observe à des degrés différents autour du continent. Cette banquise est pourtant nécessaire à l'accomplissement du cycle de vie de nombreuses espèces comme le krill antarctique dont la biomasse exceptionnelle est à la base de l'alimentation de nombreux prédateurs comme les oiseaux ou les mammifères marins. Les icebergs ou la dislocation récente d'importantes plateformes glaciaires sont également connus pour avoir un impact majeur sur les communautés benthiques. Enfin, les zones subantarctiques, à la limite nord de l'océan Austral seraient les plus concernées par le réchauffement climatique. Dans ce contexte, il est important d'estimer comment la biodiversité de cet océan, habituée à des conditions extrêmes depuis près de 34 millions d'années, pourra s'adapter à ces nouvelles conditions.

INTRODUCTION

L'océan Austral fut le dernier océan à être exploré. Situé au sud de la planète, c'est le seul océan qui ne soit pas entouré par des continents (figure 1). Il entoure le continent Antarctique, terre de science, gérée au niveau international par le traité de l'Antarctique. Cet océan est donc l'opposé de l'autre océan polaire, l'océan Arctique, qui est entouré par les continents américain et eurasien avec des pays limitrophes exerçant leur souveraineté.

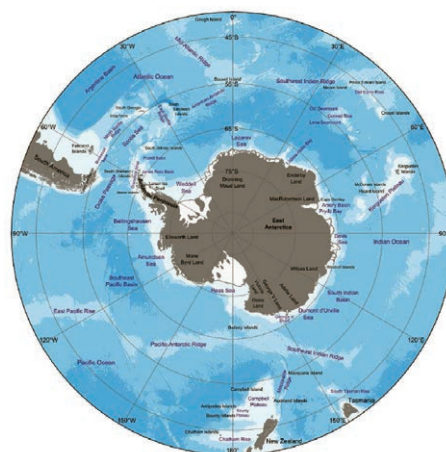


Fig.1 — L'océan Austral (De Broyer *et al.*, 2014).

L'Antarctique et l'océan Austral n'ont pas toujours été des milieux extrêmes. L'Antarctique était plus tempérée quand il appartenait au super-continent austral, le Gondwana. Il y a près de 34 millions d'années (Crame, 2014), il s'est progressivement détaché des autres continents de l'hémisphère sud ce qui a permis l'ouverture du passage de Drake. L'océan Austral s'est isolé hydrologiquement vis-à-vis des autres océans avec un refroidissement de plus de 4 °C des eaux de surface. C'est à ce moment qu'on suppose la formation de la glace de mer. Plusieurs refroidissements ont ensuite été observés entraînant d'importants changements faunistiques dont la disparition de plusieurs espèces (Crame, 2014).

Cette histoire est importante pour comprendre quelles pourraient être les conséquences du changement climatique sur une biodiversité s'étant adaptée à des conditions extrêmes sur une si longue période. Il est donc nécessaire d'avoir un état de la biodiversité marine. Le récent Atlas biogéographique de l'océan Austral (De Broyer *et al.*, 2014) regroupe l'ensemble des connaissances sur cette biodiversité. Nos connaissances commencent avec les explorations scientifiques menées en 1772-1775 par l'explorateur James Cook. Elles se sont poursuivies par de nombreuses missions illustres (De Broyer *et al.*, 2014) jusqu'à la récente année polaire internationale (2007-2009) avec le programme "Census of Antarctic Marine Life" (2005-2010). Durant ce programme, 18 navires scientifiques ont sillonné l'océan Austral afin d'étudier la biodiversité de celui-ci sous toutes ses formes. Il s'agissait aussi de préciser la phylogénie de ces espèces. Au niveau global, il fallait préciser la biogéographie des espèces en étudiant les habitats potentiels de celles-ci par l'analyse statistique et la modélisation comme l'ont fait, par exemple, Cuzin *et al.* (2014) pour les euphausiacés (krill), Duhamel *et al.* (2014) pour les poissons ou Eléaume *et al.* (2014) et Saucède *et al.* (2014) pour les échinodermes. Il va de soi que la température est l'un des éléments majeurs expliquant la biogéographie de ces espèces. Plusieurs travaux ont également tenté de définir des écorégions qui se distinguent les unes des autres en fonction de leurs caractéristiques abiotiques hydrologique ou géographique (Longhurst, 2007; Raymond, 2014) et par les différences d'assemblages d'espèces

y vivant (Koubbi *et al.*, 2011; Hosie *et al.*, 2014). Malgré ces efforts, il existe de nombreux secteurs inexplorés tant le long des côtes de l'Antarctique qu'en zone océanique et les grandes profondeurs sont globalement peu connues malgré de multiples études récentes (Brandt *et al.*, 2014; Rogers et Linse, 2014).

S'il est nécessaire de considérer les conséquences des changements environnementaux, cette préoccupation doit se transcrire rapidement dans la gestion des écosystèmes par l'évaluation de zones à protéger. Cependant, en premier, nous devons définir quelles sont les limites de l'océan Austral et pourquoi cette biodiversité est exceptionnelle.

COMMENT VONT SE MODIFIER LES LIMITES DE L'OCÉAN AUSTRAL

La définition des régions océaniques commence par l'analyse des données océanographiques (Post *et al.*, 2014). L'océan Austral communique au nord avec les océans Atlantique, Indien et Pacifique.

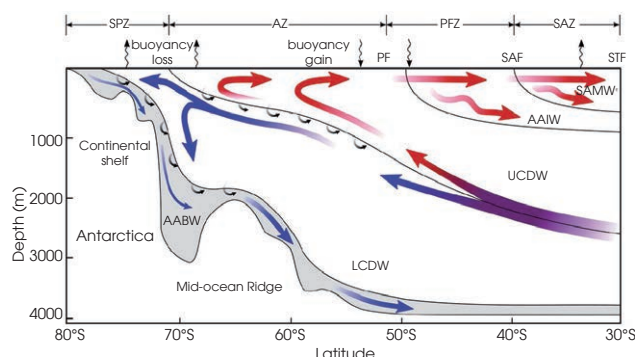


Fig.2 — Section latitudinale montrant les masses d'eaux et les fronts en fonction de la profondeur du continent Antarctique jusqu'au Front subtropical (FST) (Post *et al.*, 2014). Le Front polaire antarctique (FPA) et le Front subantarctique (FSA) sont indiqués. Les fronts délimitent différentes zones: la zone subantarctique (ZSA), la zone frontale polaire (ZFP), la zone antarctique (ZA) et la zone subpolaire (ZSP). Les masses d'eaux sont indiquées: l'eau de mode subantarctique (SAMW); l'eau antarctique intermédiaire (AAIW); l'eau profonde circumpolaire supérieure (UCDW); l'eau profonde circumpolaire inférieure (LCDW); l'eau antarctique de fond (AABW). Les flèches indiquent la direction des masses d'eaux. On note que l'eau de fond antarctique se crée au niveau du continent et circule ensuite en profondeur.

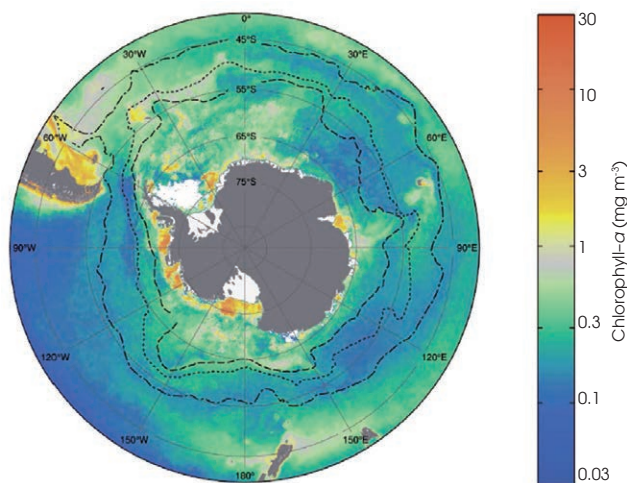


Fig.3 — Concentrations moyennes estivales entre 2002 et 2010 de chlorophylle-a estimées par les données satellites MODIS Aqua (Post *et al.*, 2014). Du sud au nord, on observe en pointillés, le front lié à la limite sud du courant circumpolaire antarctique, la position moyenne du Front polaire antarctique et le Front subantarctique.

Plusieurs fronts majeurs sont présents dans l'océan Austral (figure 2). En premier, le Front subtropical (FST) que nous définirons comme la limite nord de cet océan. En allant vers le sud, on trouvera le Front subantarctique (FSA) puis le Front polaire antarctique (FPA). La zone subantarctique s'étend entre le FST et le FSA, la zone frontale polaire entre le FPA et le FSA et la zone antarctique au sud du FPA. Plus au sud, d'autres fronts marquent la limite sud du courant circumpolaire antarctique. Il ne faut pas considérer ces fronts comme des barrières fixes, ils varient latitudinalement en fonction des forçages climatiques saisonniers. Certains de ces fronts sont le siège d'une forte production phytoplanctonique qui favorise la production secondaire planctonique (figure 3). C'est le cas autour des îles subantarctiques qui enrichissent le milieu en fer et en éléments nutritifs utiles à la croissance du phytoplancton. Au sud de ces îles, entre la limite nord du FPA et la limite de la zone de glace saisonnière, se trouve la zone océanique jamais couverte de glace, qui est sous l'influence du courant circumpolaire antarctique. Cette zone

est particulière puisque classée comme HNLC (High Nutrient Low Chlorophyll) soit une région avec de fortes concentrations en nutriments mais de faibles concentrations en chlorophylle soit en phytoplancton. Cela s'explique par le manque de certains éléments essentiels au phytoplancton comme le fer.

Cependant, plus de la moitié de l'océan Austral est marquée par la zone de glace saisonnière (figure 4) autour du continent Antarctique. On y observe en été les plus fortes concentrations en chlorophylle-a (figure 3). Des modifications importantes de l'étendue, de la durée de présence de la banquise ou de son épaisseur ont été constatées en péninsule Antarctique ouest où une diminution de la superficie de 5 à 6 % par décade a été observée. Cependant, cette tendance n'est pas globale autour du continent puisqu'à l'inverse, en mer de Ross, on observe une augmentation de 4,5 à 5 % (Constable *et al.*, 2014). L'étendue n'est pas le seul facteur à prendre en compte, la durée de présence saisonnière de la glace de mer a également diminué dans la région ouest de la péninsule Antarctique avec une perte

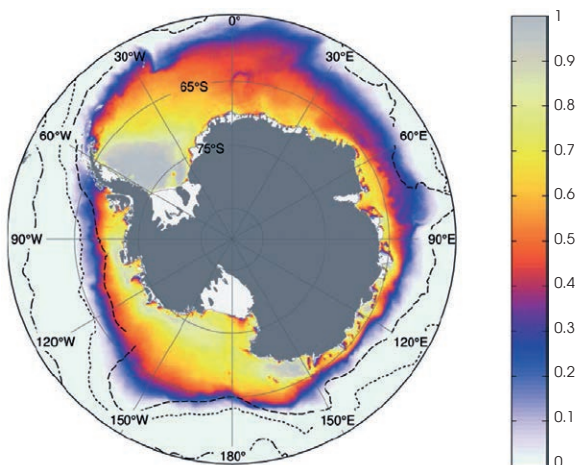


Fig.4 — Cartographie de la proportion de durée annuelle de banquise de 85 % de concentration (Post *et al.*, 2014). Les polynies sont visibles le long du continent (couleurs bleues). Les tirets indiquent la position du front sud du courant circumpolaire antarctique, le pointillé la position moyenne du Front polaire antarctique et le pointillé avec tirets au nord, la position du Front subantarctique.

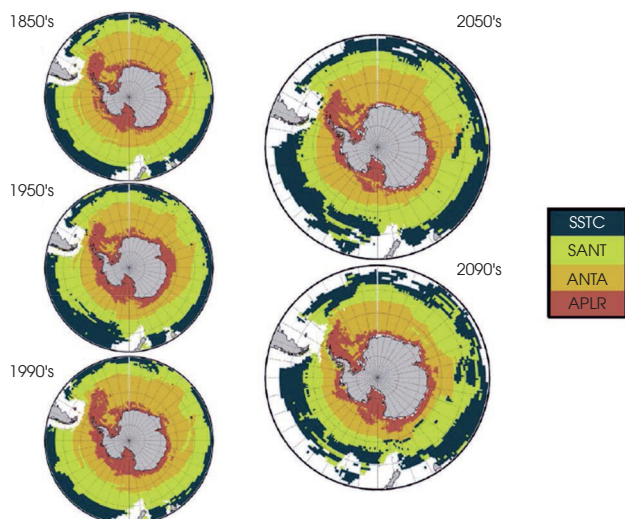


Fig.5 — Distribution des provinces biogéochimiques de l'océan Austral pour les décennies 1850, 1950 et 1990 et leur projection pour 2050 et 2100 (Reygondeau et Huettmann, 2014). Les provinces actuelles ont été définies par Longhurst (2007).

en nombre de jours équivalente à ce qui est observé en Arctique. Là aussi, il s'agit d'observations régionales puisque l'inverse est constaté dans d'autres secteurs montrant bien que divers facteurs sont impliqués pour expliquer le régime de la glace de mer. Proche du continent, diverses zones nommées polynies sont exemptes de banquise toute l'année ou périodiquement. Ces zones sont souvent situées près des côtes où l'action de la topographie et des vents empêche la glace de mer de se maintenir localement (figure 4). Les polynies sont très importantes pour la production biologique puisqu'au printemps, elles permettent la pénétration de la lumière dans l'eau alors que les zones adjacentes couvertes de glace restent dans la pénombre. Dès les premiers signes printaniers et de début de rupture de la banquise, la production primaire commence et alimente autant les écosystèmes pélagiques que benthiques.

Dans son livre nommé « Ecological Geography of the Sea », Longhurst a identifié 4 provinces dites biogéochimiques dans le biome polaire auquel appartient l'océan Austral. Ces provinces ont été nommées respectivement : South SubTropical Convergence province (SSTC), SubANTarctic water ring province (SANT), ANTArctic province (ANTA) et Austral PoLaR province (APLR) (figure 5). Chacune de ces provinces délimite conceptuellement les différents types de forçages environnementaux ou hydrologiques majeurs pouvant être rencontrés. Longhurst délimita spatialement la distribution de ces provinces à partir d'observations satellites combinées aux échantillons océanographiques et biologiques prélevés lors de missions. Récemment, Reygondeau et Huettmann (2014) ont pu caractériser statistiquement ces provinces biogéochimiques. La méthodologie mise au point a permis d'évaluer les changements

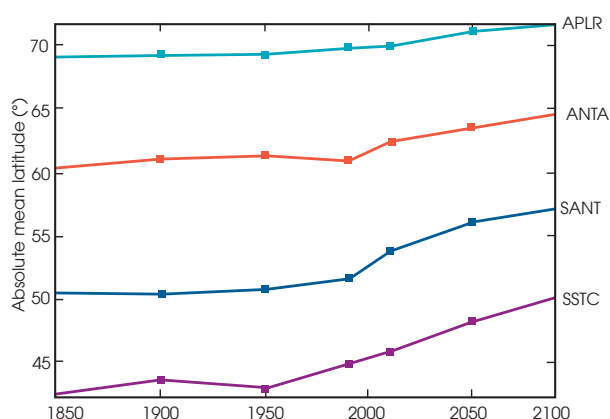
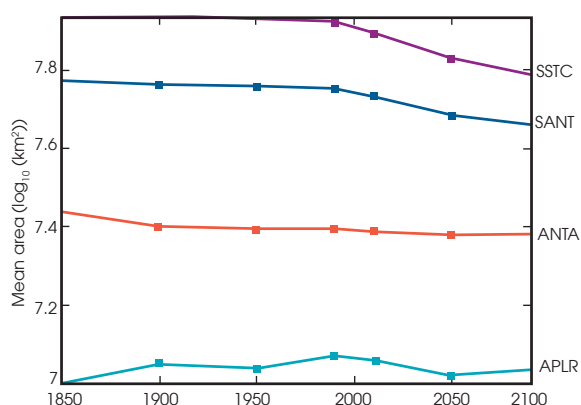


Fig.6 — Evolution de la surface et de la latitude moyenne de chacune des provinces biogéochimiques (Reygondeau et Huettmann, 2014).

de distribution spatiale des 4 provinces en fonction des variations saisonnières et interannuelles (Reygondeau *et al.*, 2013) ou à long terme. Les résultats de l'étude présentée en figure 5 montrent un déplacement vers les pôles de l'ensemble des provinces australes. Toutefois, la vitesse du changement apparaît différente entre les provinces (figure 6). En effet, les provinces dites subantarctiques (SSTC et SANT) apparaissent comme étant les plus altérées par les changements des conditions environnementales liées aux changements climatiques. Leurs centres de distribution se trouvent plus rapidement déplacés vers le sud que les provinces dites polaires (ANTA et APLR). Ces changements ont pour conséquence une diminution drastique (de l'ordre de 15 %) de la surface totale de la zone subantarctique qui se voit écrasée face à la résilience des zones *stricto* australes (perte < 5 % de leurs aires) et par l'expansion des systèmes subtropicaux au nord.

Ces modifications des provinces biogéochimiques de l'océan Austral peuvent être directement attribuées aux différents effets provoqués par le changement climatique. Les analyses menées dans le cadre du consortium NEREUS (figure 7) à partir de nombreux paramètres environnementaux structurant l'environnement marin (température, salinité, concentration en oxygène, production primaire, pH, % de couverture de glace et composantes de direction U et V du courant) confirment l'hétérogénéité spatiale de l'amplitude et des paramètres forçants du changement climatique au niveau de l'océan Austral. Il apparaît que les zones situées plus au nord (zones subantarctiques) sont affectées plus durement par les différents effets du changement climatique (figure 7a) et particulièrement par l'augmentation des températures de surface de l'océan (figure 7b). Les zones les plus australes (ANTA et APLR) apparaissent comme des zones plus préservées par la sévérité des changements globaux. Néanmoins, certains paramètres structurants pour le développement des espèces marines apparaissent modifiés dans ces zones (figure 7b). En effet, malgré une variation moindre comparée aux zones subantarctiques, les zones australes montrent un changement marqué de la couverture de glace, de la température de surface ainsi que du pH et de la production primaire. Bien que l'amplitude de ces changements apparaît moindre comparée aux zones subantarctiques, les effets sur des organismes endémiques adaptés aux conditions extrêmes, apparaissent comme une « épée de Damoclès » pour la biodiversité de ces zones.

térogénéité spatiale de l'amplitude et des paramètres forçants du changement climatique au niveau de l'océan Austral. Il apparaît que les zones situées plus au nord (zones subantarctiques) sont affectées plus durement par les différents effets du changement climatique (figure 7a) et particulièrement par l'augmentation des températures de surface de l'océan (figure 7b). Les zones les plus australes (ANTA et APLR) apparaissent comme des zones plus préservées par la sévérité des changements globaux. Néanmoins, certains paramètres structurants pour le développement des espèces marines apparaissent modifiés dans ces zones (figure 7b). En effet, malgré une variation moindre comparée aux zones subantarctiques, les zones australes montrent un changement marqué de la couverture de glace, de la température de surface ainsi que du pH et de la production primaire. Bien que l'amplitude de ces changements apparaît moindre comparée aux zones subantarctiques, les effets sur des organismes endémiques adaptés aux conditions extrêmes, apparaissent comme une « épée de Damoclès » pour la biodiversité de ces zones.

UNE BIODIVERSITÉ UNIQUE FACE À DES CHANGEMENTS MAJEURS

Les espèces de cet océan se sont adaptées à des conditions de vie extrêmes. Le réchauffement climatique a des impacts de degrés divers

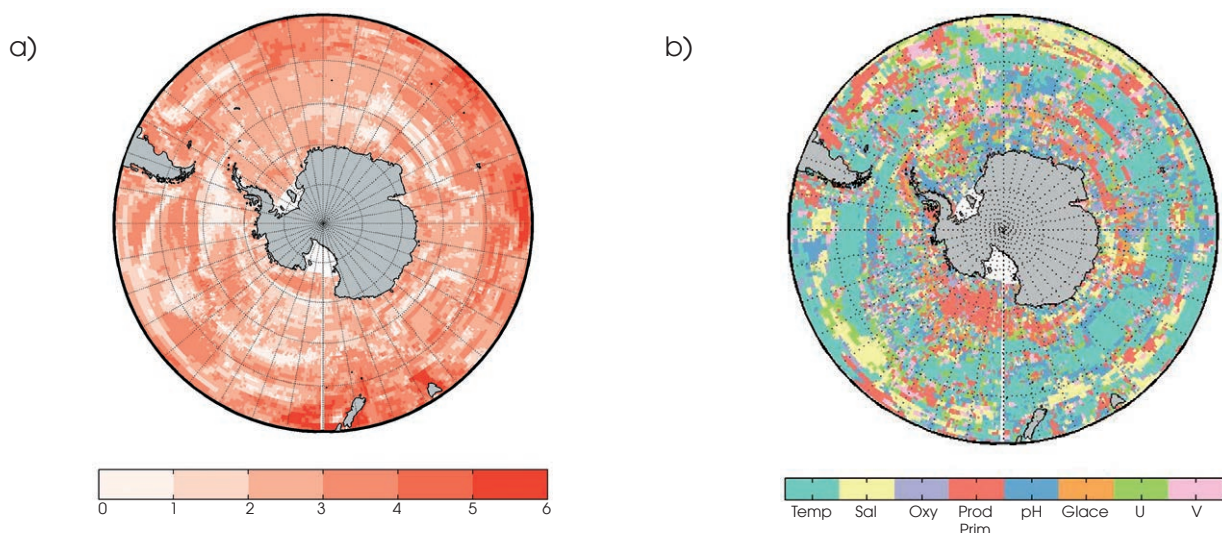


Fig.7 — (a) État de perturbation environnementale et (b) paramètre structurant le changement. Temp : Température; Sal : Salinité; O₂ : concentration en oxygène; PP : Production primaire; pH : pH; Glace : % couverture de glace; U et V : composantes du courant.

suivant les régions de l'océan Austral mais est, par exemple, particulièrement marqué au niveau de la péninsule Antarctique et au niveau des îles subantarctiques (Constable *et al.*, 2014). L'exposition aux UV s'est accrue en raison de la présence du trou dans la couche d'ozone dont l'étendue est maximale à chaque printemps austral. L'acidification est devenue une nouvelle menace. Ces changements pourraient modifier les habitats des espèces, les écosystèmes et le fonctionnement des réseaux trophiques. À cela se rajoutent plusieurs impacts anthropiques dont l'exploitation des ressources vivantes.

Le benthos antarctique

Le benthos antarctique se caractérise par une grande biodiversité, un endémisme élevé, et, par endroits, des biomasses parmi les plus importantes connues. En termes de composition, certains groupes sont absents ou pauvrement représentés dans l'océan Austral (stomatopodes, cirripèdes balanomorphes, décapodes « marcheurs », bivalves). Les crabes brachyours sont totalement absents de la région antarctique alors que des fossiles attestent de leur présence avant le refroidissement des eaux polaires au Cénozoïque. D'autres groupes, par contre, y ont opéré une intense radiation. C'est le cas des pycnogonides, des amphipodes et des isopodes qui présentent une richesse spécifique remarquable, probablement due en partie - pour ces deux derniers groupes - à la conquête des niches laissées vacantes par la disparition des décapodes.

La diversité spécifique du benthos antarctique apparaît aujourd'hui largement sous-estimée. D'une part, l'approche moléculaire a mis en évidence de nombreuses espèces cryptiques (Held, 2014; Eléaume *et al.*, 2014; Havermans, 2014) et d'autre part, de larges zones de l'océan Austral restent à inventorier, en particulier les zones profondes où les premières prospections systématiques ont livré de très nombreuses espèces inconnues (Brandt *et al.*, 2014).

Le paradigme de la distribution circumpolaire des espèces benthiques a aussi été mis en cause par l'approche moléculaire : nombre d'espèces considérées comme circumpolaires ou même cosmopolites se sont révélées représenter des

complexes d'espèces à distribution restreinte, souvent allopatriques. La même approche moléculaire a néanmoins confirmé la large distribution circumpolaire de certaines espèces.

Les peuplements macrobenthiques sur le plateau continental peuvent être remarquablement abondants, formant par endroits des massifs de « bioconstructeurs » érigés, composés surtout d'espèces suspensivores comme les éponges, les bryozoaires, les hydrocoraux, les ascidies ou les crinoïdes, offrant à de nombreux autres organismes un substrat tridimensionnel, des ressources alimentaires et des opportunités de symbioses. Mais la distribution spatiale de ces peuplements, comme leur composition, leur abondance et biomasse, ou encore leur rôle écofonctionnel, peut varier considérablement en fonction de la profondeur ou de la géographie (Gutt *et al.*, 2014).

Les impacts potentiels des changements climatiques (température, pH, couverture de glace, érosion par icebergs, quantité et qualité des ressources trophiques) sur les communautés benthiques restent encore difficiles à déterminer, par manque de connaissances suffisantes des cycles vitaux et du rôle écofonctionnel des espèces benthiques, de leurs différents degrés de sensibilité aux facteurs environnementaux impliqués, de leurs multiples interactions, ainsi que des facteurs responsables - aux différentes échelles spatiales et temporelles - de la grande diversité des peuplements benthiques (voir Ingels *et al.*, 2012).

Les récentes approches expérimentales de la vulnérabilité potentielle d'une sélection d'organismes benthiques (oursins, foraminifères...) face aux impacts des changements de l'environnement physique (en particulier le réchauffement et le déclin du pH) ont clairement mis en évidence les limites physiologiques létales et fonctionnelles de ces espèces endémiques (Peck *et al.*, 2010) sans cependant permettre déjà une généralisation à l'ensemble de la biodiversité benthique (Kaiser *et al.*, 2013).

Le « charruage » des fonds marins par les icebergs est le processus physique qui affecte le plus les communautés benthiques sur le plateau

continental antarctique jusqu'à 300 m de profondeur ou plus. Le réchauffement des eaux sapant la base des plates-formes glaciaires autour du continent provoque une augmentation de la fréquence des vélages d'icebergs et par conséquent un impact accru sur le benthos péricontinental.

Poissons antarctiques démersaux

Le cas des poissons démersaux antarctiques est aussi unique, car leur histoire évolutive est connue et un des groupes, les Notothenioidei, est à près de 86 % endémique de l'océan Austral (Duhamel *et al.*, 2014). Issus d'un groupe de poissons tempérés, ils se sont adaptés à l'océan Austral lors de son refroidissement. Les espèces les plus polaires ont ainsi développé des glycoprotéines antigels qui évitent à leur sang et à leurs tissus de se cristalliser en raison de la température de l'eau de mer. Lors de ce refroidissement, ces poissons ont colonisé toutes les niches écologiques qui sont devenues vacantes par la disparition des autres espèces ne s'étant pas adaptées à ce changement. Certaines espèces de Notothenioidei sont endémiques de leur région ou de leur île, d'autres sont circumpolaires vivant soit dans des environnements stables (habitat dans des éponges), soit dans des environnements perturbés (par exemple par les icebergs) ou dans la banquise pour le poisson cryopélagique *Pagothenia borchgrevincki*. Quelques espèces sont exploitées commercialement comme la légine antarctique et la légine australe. Certains de ces poissons ont perdu leur aptitude physiologique à lutter contre le réchauffement du milieu, s'étant habitués à vivre dans un milieu où l'amplitude thermique est faible. On imagine mal pour le moment les conséquences d'un réchauffement climatique dont les effets seraient autant écologiques qu'économiques.

Organismes pélagiques

Pour les organismes pélagiques, les patterns spatio-temporels qui les influencent, qu'il s'agisse du plancton, de poissons de pleine eau ou de céphalopodes, sont étroitement liés aux structures des masses d'eaux, aux courants, aux caractéristiques des zones frontales et à la dynamique saisonnière de la banquise. À ce jour, les connaissances sur les espèces pélagiques sont souvent limitées à la zone épipélagique où pé-

nètrent les rayons lumineux favorables à la photosynthèse du phytoplancton. Les connaissances sont plus restreintes dans les zones plus profondes comme la zone mésopélagique où pourtant se trouvent en abondance des espèces de poissons qui sont les proies privilégiées de nombreux prédateurs.

Les études de ces dernières décennies ont montré que le FSA est un front biogéographique majeur pour plusieurs secteurs de l'océan Austral comme l'ont constaté Hosie *et al.* (2014) sur le plancton ou Koubbi (1993) et Duhamel *et al.* (2014) sur les poissons mésopélagiques. Le FST et le FPA étaient reconnus comme tel depuis longtemps. En considérant les trois fronts septentrionaux de l'océan Austral (FST, FSA et FPA), la zone de la glace saisonnière et le plateau continental antarctique, on peut expliquer les distributions latitudinales de nombre d'espèces pélagiques (Atkinson *et al.*, 2012; Hunt et Hosie, 2005, 2006a, b) essentielles au fonctionnement du réseau trophique comme les copépodes (Hosie *et al.*, 2014), les euphausiacés dont fait partie le krill antarctique ou le krill des glaces (Cuzin *et al.*, 2014) ou les poissons mésopélagiques (Koubbi *et al.*, 2011 et Duhamel *et al.*, 2014). S'ajoutent à cela des particularités régionales comme au niveau des îles subantarctiques où on peut observer des espèces planctoniques endémiques comme le copépode *Drepanopus pectinatus* au niveau des îles Crozet, Kerguelen et Heard. Ces espèces endémiques ne sont pas forcément rares localement car ce copépode domine à plus de 90 % l'ensemble du zooplancton de la baie du Morbihan aux îles Kerguelen (Razouls et Razouls, 1990) mais nul ne peut dire comment ces espèces s'adapteront à l'augmentation de température. De la zone subantarctique au continent, on observe ainsi une succession d'espèces dont les distributions devraient se déplacer vers le sud en liaison avec le déplacement vers le sud des zones frontales (Constable *et al.*, 2014). Cependant, les espèces néritiques (associées aux plateaux) ne pourront pas migrer et c'est le milieu pélagique de diverses îles subantarctiques qui pourrait être profondément modifié.

Sur le plateau continental antarctique, le krill des glaces est dominant mais au niveau du talus cela



sera le krill antarctique. Cette espèce emblématique de cet océan sera très fortement abondante, en particulier dans le secteur Atlantique de l'océan Austral au niveau de la mer de la Scotia et de la péninsule Antarctique. Le krill antarctique est très dépendant des conditions de glace hivernale qui sont importantes pour la reproduction de l'espèce, sa survie et la croissance des jeunes. Les densités de krill ont diminué de près de 30 % depuis les années 1980 (Atkinson *et al.*, 2004). Cette diminution pourrait avoir plusieurs raisons dont en premier la diminution de la durée et de l'étendue vers le nord de la banquise. Cependant, d'autres hypothèses sont soulevées comme les modifications d'abondances des proies ou l'augmentation des populations de baleines (Murphy *et al.*, 2012). Les questionnements actuels tentent de comprendre comment le réseau trophique pélagique basé sur le krill antarctique pourrait être modifié suite au réchauffement climatique en un réseau trophique basé sur d'autres espèces dont les copépodes et les poissons lanternes tel que cela existe au niveau de la zone frontale polaire. Il s'ajoute à cela la prolifération pendant les périodes "chaudes" d'organismes gélatineux comme les salpes qui dominent alors l'écosystème. Cela a pour conséquence de moins fortes abondances en krill certaines années et malheureusement, les salpes ne sont pas des proies intéressantes pour les prédateurs.

Dans cette zone de la glace de mer, plusieurs espèces font tout ou une partie de leur cycle de vie sous la banquise ou dans ses anfractuosités (Swadling *et al.*, 2014). Certaines de ces espèces sont capables d'adapter la durée de leurs différents stades de développement en fonction de la dynamique de la glace de mer. C'est le cas du copépode *Paralabidocera antarctica* dont la durée des stades copépodites varie entre différentes régions de l'Est Antarctique en liaison avec la durée de présence de la banquise (Loots *et al.*, 2009; Swadling *et al.*, 2014). Mais cette plasticité n'existe pas pour toutes les espèces.

Oiseaux de mer

Grâce aux nouvelles technologies de télémétrie par satellite et aux observations en mer, il est maintenant possible de connaître la distribution en mer et à toutes les saisons des oiseaux et mammifères

marins. Il existe autant de réponses qu'il y a d'espèces. On estime que les changements actuels et futurs modifieront les habitats de ces espèces ou leur tolérance et adaptation aux conditions abiotiques (Constable *et al.*, 2014). En péninsule Antarctique, le déclin des populations de manchots adéliques semble être lié à la diminution de l'extension de la glace de mer, ce qui diffère des observations en mer de Ross et dans certaines régions de l'Est Antarctique où les conditions de glace sont différentes (Constable *et al.*, 2014). Ces signes actuels nous indiquent que le changement principal sera celui des réseaux trophiques. Les habitats trophiques de certaines espèces sont pélagiques et dépendent des structures océanographiques comme les fronts. Par exemple, les manchots royaux des îles Crozet s'alimentent au niveau du FPA localisé bien au sud de l'archipel. Ils y trouvent des poissons mésopélagiques en abondance qui sont ici plus accessibles. Avec les changements prévus, le FPA devrait se localiser plus vers le sud, ce qui doublera la distance à parcourir pour ces manchots (Péron *et al.*, 2012).

PROTÉGER ET SUIVRE À LONG TERME LES ÉCOSYSTÈMES

Les changements majeurs que l'on observe depuis près de 30 ans sont donc principalement liés à l'augmentation de la température avec pour conséquence le déplacement vers le sud des zones frontales et des régions décrites précédemment. Ces changements ne sont pas uniformes sur tout l'océan Austral mais s'observent à des degrés divers suivant les régions de celui-ci (Constable *et al.*, 2014). Parmi ces modifications, l'enrichissement en gaz carbonique et son absorption par l'océan Austral entraîne une acidification de celui-ci (Midorikawa *et al.*, 2012). Comme le CO₂ est plus soluble dans les eaux froides, les eaux polaires attaqueront plus facilement les organismes ayant des coquilles en carbonate de calcium. Cela concerne notamment les mollusques ptéropodes qui sont des organismes planctoniques entourés par une fine coquille et dont le rôle d'herbivore est essentiel (Roberts *et al.*, 2014). Les invertébrés benthiques ayant une coquille calcifiée sont également concernés.



Si nous pouvons poser des hypothèses concernant les changements futurs que subira l'océan Austral, il est nécessaire de pouvoir protéger les zones les plus remarquables en biodiversité ainsi que les plus vulnérables de cet océan. Il faut également proposer des zones de référence scientifique où tout impact humain sera réduit afin d'étudier comment les écosystèmes vont se modifier suite aux changements climatiques. La CCAMLR (Commission pour la conservation de la faune et de la flore marines de l'Antarctique) a pour mission d'évaluer tous les ans les ressources marines de l'océan Austral grâce à une approche écosystémique. Faisant partie du système du Traité sur l'Antarctique, la CCAMLR a mis en place des programmes de suivi afin de détecter les changements que pourrait subir l'écosystème marin (www.ccamlr.org). Plus récemment, elle a entrepris de définir un système représentatif d'Aires marines protégées (AMP). Si diverses AMP ont été déclarées au niveau des îles subantarctiques par les états souverains, la zone de haute mer hors juridictions nationales ne peut être protégée que par le consensus des 25 membres siégeant à la CCAMLR. Ainsi, la CCAMLR a désigné en 2009 une première AMP de 94000 km² autour des îles des Orcades du Sud. D'autres zones candidates sont actuellement proposées comme l'Est Antarctique, la mer de Ross et bientôt, la mer de Weddell ou la péninsule Antarctique. Sur chacun de ces secteurs, il s'agit de conserver la biodiversité représentative de ces régions et de proposer des zones de référence scientifique. Cependant, l'aboutissement de ces négociations est difficile et sera peut-être très long. Il est indispensable de considérer à leur hauteur l'impact des changements climatiques pour la conservation.

En attendant, il est nécessaire de suivre à long terme l'écosystème marin. Plusieurs programmes internationaux sous l'égide du SCAR (Scientific Committee on Antarctic Research) se sont développés comme le programme SOOS (Southern

Ocean Observing System) qui incite au suivi de paramètres physico-chimiques et biologiques. Un autre programme du SCAR est le SO-CPR (Southern Ocean Continuous Plankton Recorder). Le Continuous Plankton Recorder (CPR) est utilisé depuis les années 1930 dans l'Atlantique nord et a permis de montrer des changements majeurs des communautés planctoniques en Atlantique. Le programme SO-CPR a commencé en 1991, il utilise principalement les navires scientifiques de plusieurs pays dont, depuis 2013, le « Marion Dufresne » autour des îles subantarctiques des Terres australes et antarctiques françaises. Près de 200 taxons planctoniques sont identifiés dans ce programme qui a permis l'étude de la distribution spatiale du zooplancton et de sa variabilité saisonnière et interannuelle. Hosie *et al.* (2014) a montré les variations latitudinales des assemblages mensuels du zooplancton. En France, ce programme est inscrit dans la Zone atelier antarctique du CNRS <http://za-antarctique.univ-rennes1.fr> qui a parmi ses objectifs de développer et pérenniser des réseaux d'observations à long terme de la biodiversité polaire sur le principe du LTER (Long Term Ecological Research). Les recherches des laboratoires impliqués dans ce programme bénéficient du soutien logistique de l'IPEV (Institut Paul Émile Victor), l'institut polaire français (www.ipev.fr).

Ces initiatives nationales et internationales avec les quelques exemples donnés ici sont indispensables pour comprendre les effets des changements climatiques, non pas uniquement à l'échelle de l'océan Austral mais aussi à l'échelle régionale car, comme nous l'avons vu, il existe des distinctions importantes entre les îles subantarctiques, la péninsule Antarctique, l'Est Antarctique et les autres secteurs de cet océan. Si nous commençons à percevoir les conséquences en surface de ces changements, il est indispensable de se préoccuper des milieux profonds benthiques et pélagiques.



RÉFÉRENCES

- ATKINSON A., SIEGEL V., PAKHOMOV E.A., JESSOPP M.J., LOEB V., 2009 – *A Re-Appraisal of the Total Biomass and Annual Production of Antarctic Krill*. Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers 56, 727–740.
- ATKINSON A., WARD P., HUNT B.P.V., PAKHOMOV E.A., HOSIE G.W., 2012 – *An Overview of Southern Ocean Zooplankton Data: Abundance, Biomass, Feeding and Functional Relationships*. CCAMLR Science 19, 171–218.
- BRANDT A., VAN DE PUTTE A.P., GRIFFITHS H.J., 2014 – *Southern Ocean Benthic Deep-Sea Biodiversity and Biogeography*. In Biogeographic Atlas of the Southern Ocean. Scientific Committee on Antarctic Research, Cambridge, 233-239.
- CONSTABLE A.J., MELBOURNE-THOMAS J., CORNEY S.P., ARRIGO K.R., BARBRAUD C. *et al.*, 2014 – *Climate Change and Southern Ocean Ecosystems I: How Changes in Physical Habitats Directly Affect Marine Biota*. Global Change Biology: DOI: 10.1111/gcb.12623
- CRAME A., 2014 – *Evolutionary settings*. In Biogeographic Atlas of the Southern Ocean. Scientific Committee on Antarctic Research, Cambridge, 32-35.
- CUZIN-ROUDY J., IRISSON J.-O., PENOT F., KAWAGUCHI S., VALLET C., 2014 – *Southern Ocean Euphausiids*. In Biogeographic Atlas of the Southern Ocean. Scientific Committee on Antarctic Research, Cambridge, 309-320.
- DE BROYER C., KOUUBI P., GRIFFITHS H.J., RAYMOND B., UDEKEM D'ACÓZ C. D' *et al.*, 2014 – *Biogeographic Atlas of the Southern Ocean*. Scientific Committee on Antarctic Research, Cambridge, XII+498 pp.
- DUHAMEL G., HULLEY P.-A., CAUSSE R., KOUUBI P., VACCHI M. *et al.*, 2014 – *Biogeographic Patterns of Fish*. In Biogeographic Atlas of the Southern Ocean. Scientific Committee on Antarctic Research, Cambridge, 328-362.
- ELÉAUME M., HEMERY L.G., AMÉZIANE N., ROUX M., 2014 – *Phylogeographic Patterns of the Southern Ocean Crinoids (Crinoidea: Echinodermata)*. In Biogeographic Atlas of the Southern Ocean. Scientific Committee on Antarctic Research, Cambridge, 448-455.
- GUTT J., BARNES D.K.A., LOCKHART S.J., 2014 - Classification and spatially explicit illustration of Antarctic macrobenthic assemblages: A feasibility study. In Biogeographic Atlas of the Southern Ocean. Scientific Committee on Antarctic Research, Cambridge, 229-232.
- HAVERMANS C., 2014 – *Phylogeographic Patterns of the Lysianassoidea (Crustacea: Peracarida: Amphipoda)*. In Biogeographic Atlas of the Southern Ocean. Scientific Committee on Antarctic Research, Cambridge, 441-447.
- HELD C., 2014 – *Phylogeography and Population Genetics*. In Biogeographic Atlas of the Southern Ocean. Scientific Committee on Antarctic Research, Cambridge, 437-440.
- HOSIE G., MORMÈDE S., KITCHENER J., TAKAHASHI K., RAYMOND B., 2014 – *Near Surface Zooplankton Communities*. In Biogeographic Atlas of the Southern Ocean. Scientific Committee on Antarctic Research, Cambridge, 422-430.
- HUNT B., HOSIE G., 2005 – *Zonal Structure of Zooplankton Communities in the Southern Ocean South of Australia: Results from a 2 150 Km Continuous Plankton Recorder Transect*. Deep-Sea Research I 52, 1241–1271.
- HUNT B., HOSIE G., 2006a – *The Seasonal Succession of Zooplankton in the Southern Ocean South of Australia, Part I: the Seasonal Ice Zone*. Deep Sea Research I 53, 1182–1202.
- HUNT B., HOSIE G., 2006b – *The Seasonal Succession of Zooplankton in the Southern Ocean South of Australia, Part II: the Sub-Antarctic to Polar Frontal Zones*. Deep Sea Research I 53, 1203–1223.
- INGELS J., VANREUSEL A., BRANDT A., CATARINO A.I., DAVID B. *et al.*, 2012 – *Possible Effects of Global Environmental Changes on Antarctic Benthos: a Synthesis Across Five Major Taxa*. Ecology and Evolution 2(2): 453–485.
- KAISER S., BRANDAO S.N., BRIX S., BARNES D.K.A., BOWDEN D.A. *et al.*, 2013 – *Patterns, Processes and Vulnerability of Southern Ocean Benthos: a Decadal Leap in Knowledge and Understanding*. Marine Biology 160 (9): 2295-2317.
- KOUUBI P., 1993 – *Influence of the Frontal Zones on Ichthyoplankton and Mesopelagic Fish Assemblages in the Crozet Basin (Indian Sector of the Southern Ocean)*. Polar Biology 13(8): 557-564.
- KOUUBI P., MOTEKI M., DUHAMEL G., GOARANT A., HULLEY P.A. *et al.*, 2011 – *Ecoregionalisation of Myctophid Fish in the Indian Sector of the Southern Ocean: Results from Generalized Dissimilarity Models*. Deep-sea Research II 58: 170-180.
- LONGHURST A., 2007 – *Ecological Geography of the Sea*. 2 ed., London: Academic Press, London, 390 pp.
- LOOTS C., SWADLING K.M., KOUUBI P., 2009 – *Annual Cycle of Distribution of Three Ice-Associated Copepods Along the Coast Near Dumont D'urville, Terre Adelie (Antarctica)*. Journal of Marine Systems 78(4): 599-605.



- MIDORIKAWA T., INOUE H.Y., ISHII M. *et al.*, 2012 – *Decreasing pH Trend Estimated from 35-Year Time Series of Carbonate Parameters in the Pacific Sector of the Southern Ocean in Summer*. Deep Sea Research I 61: 131–139.
- MURPHY E.J., CAVANAGH R.D., HOFMANN E.E. *et al.*, 2012 – *Developing Integrated Models of Southern Ocean Food Webs: Including Ecological Complexity, Accounting for Uncertainty and the Importance of Scale*. Progress in Oceanography 102: 74–92.
- PECK L.S., MORLEY S., CLARK M., 2010 – *Poor Acclimation Capacities in Antarctic Marine Ectotherms*. Marine Biology 157(9): 2051–2059.
- PÉRON C., WEIMERSKIRCH H., BOST C.A., 2012 – *Projected Poleward Shift of King Penguins' (Aptenodytes Patagonicus) Foraging Range at the Crozet Islands, Southern Indian Ocean*. Proceedings of the Royal Society B 279: 2515–2523.
- POST A.L., MEIJERS A.J.S., FRASER A.D., MEINERS K.M., AYERS J. *et al.*, 2014 – *Environmental Settings*. In Biogeographic Atlas of the Southern Ocean. Biogeographic Atlas of the Southern Ocean. Scientific Committee on Antarctic Research, Cambridge, 46–64.
- RAYMOND B., 2014 – *Pelagic Regionalisation*. In Biogeographic Atlas of the Southern Ocean. Biogeographic Atlas of the Southern Ocean. Scientific Committee on Antarctic Research, Cambridge, 418–421.
- RAZOULS C., RAZOULS S., 1990 – *Biological Cycle of a Population of Subantarctic Copepod, Drepanopus pectinatus (Clausocalanidae), Kerguelen Archipelago*. Polar Biology, 10: 541–543.
- REYGONDEAU G., LONGHURST, A., MARTINEZ, E., BEAUGRAND, G., ANTOINE, D., MAURY, O., 2013 – *Dynamic Biogeochemical Provinces in the Global Ocean*. Global Biogeochemical Cycles 27: 1046–1058.
- REYGONDEAU G., HUETTMANN F. 2014 – *Past, Present and Future State of Pelagic Habitats in the Antarctic Ocean*. In Biogeographic Atlas of the Southern Ocean. Scientific Committee on Antarctic Research, Cambridge, 397–403.
- ROBERTS D., HOPCROFT R.R., HOSIE G.W., 2014 – *Southern Ocean Pteropods*. In Biogeographic Atlas of the Southern Ocean. Scientific Committee on Antarctic Research, Cambridge, 276–283.
- ROGERS A.D., LINSE K., 2014 – *Chemosynthetic Communities*. In Biogeographic Atlas of the Southern Ocean. Scientific Committee on Antarctic Research, Cambridge, 240–244.
- SAUCEDE T., PIERRAT B., DAVID B., 2014 – *Echinoids*. In Biogeographic Atlas of the Southern Ocean. Scientific Committee on Antarctic Research, Cambridge, 213–220.
- SWADLING K.W., 2014 – *Sea-Ice Metazoans*. In Biogeographic Atlas of the Southern Ocean. Scientific Committee on Antarctic Research, Cambridge, 321–325.

Arctique : opportunités, enjeux et défis

Emmanuelle Quillérou,
Mathilde Jacquot,
Annie Cudennec,
Denis Bailly

L'Arctique est, dans l'esprit collectif, associé aux ours polaires et aux explorateurs. Plusieurs industries opèrent cependant en Arctique, à travers l'Arctique, ou à la périphérie du cercle polaire arctique. La fonte de la banquise induite par le changement climatique ouvre l'accès aux ressources naturelles, aux routes maritimes et aux zones touristiques polaires, offrant ainsi de nouvelles opportunités de développement économique en Arctique. Ces opportunités sont extrêmement attractives avec des gains potentiels très élevés, mais pour des coûts financiers, environnementaux et sociaux possiblement élevés dans un environnement qui reste financ  ri  ment très risqué. Quelques acteurs ont commencé à sécuriser un accès aux ressources de l'Arctique, semant les graines d'une « ruée vers le froid ». Cette « ruée vers le froid » ne s'est pas encore matérialisée, ralentie principalement en raison de coûts économiques élevés et de considérations diplomatiques. Le principal défi pour les décideurs locaux et nationaux est de concilier avec succès les perspectives et intérêts des différents acteurs en Arctique. Un renforcement de la capacité institutionnelle existante au rythme du développement économique pourrait faciliter cette conciliation, permettant ainsi de réaliser le potentiel de création de richesses et de bien-être avec des bénéfices mutuels. Les choix effectifs des différentes industries et pays de l'Arctique pour le développement économique, la coordination et la coopération vont déterminer ce que sera l'Arctique de demain.

L'Arctique fait référence à une zone océanique autour du pôle Nord, en partie recouverte de banquise et entourée de terres gelées. L'Arctique peut être divisé en deux zones, d'une part l'océan arctique, bord   de cinq   tats souverains : Norvège, Danemark (Groenland et   les F  ro  ), Canada,   tats-Unis et Russie, tous soumis au droit international de la mer en vertu de la Convention des Nations Unies sur le droit de la mer (CNUDM) du 10 Décembre 1982 (convention de Montego Bay). D'autre part, la région arctique, zone plus vaste qui permet d'inclure tous les   tats dont les territoires se situent à l'intérieur du cercle Arctique, c'est-à-dire les cinq   tats riverains de l'océan Arctique plus trois autres   tats non riverains : l'Islande, la Finlande

et la Suède. La région arctique ne possède pas de frontières géographiques clairement établies, et inclut une population comprise entre 4 et 10 millions d'habitants selon les limites considérées (Ahlenius *et al.*, 2005 p.6 & 14; Ministère des Affaires étrangères de Norvège, 2015, p.5; Duhaime et Caron, 2006).

L'Arctique fait partie du système climatique mondial, avec un rôle dans la redistribution de la chaleur par les courants océaniques entre le pôle Nord et l'  quateur, ainsi que la redistribution de chaleur et de nutriments entre les eaux de surface et les plaines abyssales profondes (Océan et Climat, 2015). Les impacts du changement climatique en Arctique sont plus forts

et plus rapides que dans les autres régions du globe. L'Arctique est considéré comme une sentinelle avancée démontrant les impacts des changements climatiques (L'Arctique – Sentinelle avancée du réchauffement climatique. Journée-débats co-organisée par la France et la Norvège, Paris, 17 mars 2015).

La banquise de l'Arctique se rétrécit et s'amincit de manière très visible, en raison de l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre d'origine anthropique dans l'atmosphère, avec une augmentation des périodes sans banquise (Speich *et al.*, 2015; Parkinson, 2014; Kwok et Rothrock, 2009; Serreze *et al.*, 2007; Boé *et al.*, 2009; US National Snow and Ice Data Center de Boulder Colorado, 03 mars 2015). De plus, des scénarios et modèles scientifiques ont montré que le niveau de la mer pourrait baisser légèrement dans certaines régions de l'Arctique, alors qu'il pourrait augmenter de plus de 70 cm le long de la côte est des États-Unis (Océan et Climat, 2015).

Ces changements en Arctique ouvrent l'accès aux ressources du plancher océanique et aux routes maritimes arctiques, avec de nouvelles opportunités de développement économique dans la région pouvant influencer le commerce mondial (Valsson et Ulfarsson, 2011). Ce développement économique, s'il est laissé libre et non coordonné, a le potentiel de mener à une « ruée vers le froid » sauvage, motivée par des intérêts égoïstes, plutôt qu'à un effort concerté pour faire en sorte que la société dans son ensemble bénéficie de ces nouvelles opportunités, avec une création de richesse et de bien-être à tous les niveaux par des approches « gagnant – gagnant ».

- Quels seraient les bénéfices économiques d'un développement des activités économiques en Arctique, et pour quels coûts ?
- Quelles seraient les conséquences environnementales et sociales d'un développement économique en Arctique ?
- La « ruée vers le froid » a-t-elle déjà lieu ?
- Quels sont les défis politiques en lien avec la gouvernance si nous voulons tirer le meilleur parti possible des nouvelles opportunités économiques en Arctique ?

L'ARCTIQUE, UN LIEU D'ACTIVITÉ ÉCONOMIQUE INTENSE, MAIS AVEC DE FORTES VARIATIONS D'UN PAYS À L'AUTRE ET D'UNE INDUSTRIE À L'AUTRE

Plusieurs industries opèrent en Arctique, à travers l'Arctique, ou à la périphérie du cercle polaire arctique : la pêche et l'exploitation forestière, l'exploitation minière (pétrole, gaz, minéraux), le transport maritime, la fabrication et la transformation (poisson, électronique), le tourisme polaire, et autres industries de services associées aux implantations humaines telles l'éducation, la santé, l'administration, les services postaux, boutiques et restaurants, l'hydroélectricité et les parcs éoliens, et la défense nationale (Ahlenius *et al.*, 2005, Duhaime et Caron, 2006, Conley *et al.*, 2013, Glomsrød et Aslaksen, 2009; Dittmer *et al.*, 2011).



Fig.1 — Les flux d'échanges commerciaux et de troc entre des communautés humaines, des centres régionaux et des communautés urbaines d'une même zone, selon des données collectées entre 2004-2006 dans six communautés humaines dans l'ouest de l'Alaska. Source : Magdanz *et al.* (2007, p. 65).

L'Arctique est aussi un lieu avec des activités de subsistance en dehors de l'économie monétaire telles que la pêche, la chasse, l'élevage de caribous et de rennes, la collecte et la transformation des aliments traditionnels (Glomsrød et Aslaksen, 2009; Ahlenius *et al.*, 2005, p.27). Ces activités de subsistance sont associées à des traditions commerciales et de troc très importantes entre les différentes populations de l'Arctique (Figure 1; Glomsrød et Aslaksen, 2009).

L'Arctique, au niveau **macroéconomique**, affiche une activité économique intense en lien avec une exploitation des ressources naturelles (secteur primaire) et une industrie de services (secteur tertiaire) très développée (Figure 2; Duhaime et Caron, 2006; Glomsrød et Aslaksen, 2009). L'exploitation des ressources naturelles (secteur primaire) est souvent concentrée géographiquement,

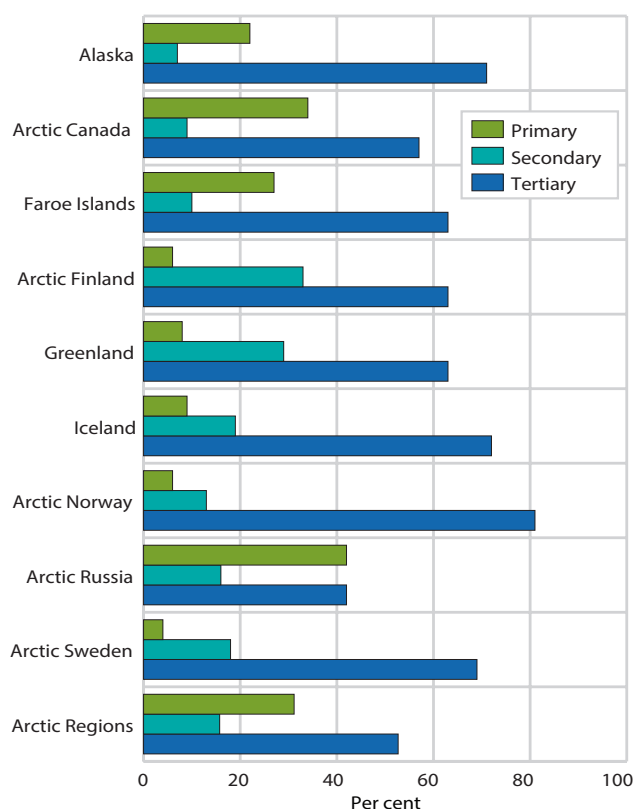


Fig.2 — PIB (%) par secteur économique dans les différentes régions de l'Arctique (année de référence : 2003) (Source: Duhaime et Caron, 2006, Figure 2.1 p. 19). Secteur primaire : à grande échelle de ressources non-renouvelables, la pêche commerciale et l'exploitation forestière à petite échelle; secteur secondaire : fabrication, transformation et la construction; secteur tertiaire : l'industrie de service.

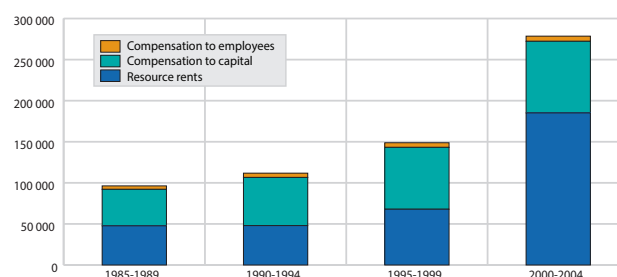


Fig.3 — Décomposition moyenne sur 5 ans de la production brute de pétrole et de gaz « offshore » en Norvège (Source: Duhaime et Caron, 2006, Figure 1 p. 24).

ment, notamment pour l'extraction à grande échelle des ressources non renouvelables telles que les hydrocarbures, le nickel, les diamants et l'or. Au contraire, la petite pêche et l'exploitation forestière artisanales peuvent se retrouver sur de très grandes étendues géographiques. L'industrie de services représente souvent 50 % des activités économiques en Arctique, avec le secteur public représentant à lui seul 20-30 % des activités économiques en Arctique.

Au niveau **microéconomique**, la rente économique liée à la production « offshore » de pétrole et de gaz en Norvège a augmenté très sensiblement en 2000-2004 comparativement aux périodes précédentes (Figure 3). La rente économique liée aux ressources naturelles renouvelables est beaucoup plus faible. Les rentes économiques liées à la génération d'hydroélectricité (vert) et l'exploitation forestière (bleu foncé) sont positives, celles des pêches commerciales négatives mais croissantes (orange), alors que celles de l'aquaculture sont soit positives soit négatives (turquoise, Figure 4).

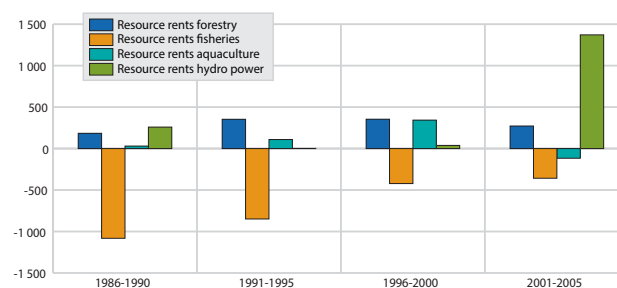


Fig.4 — Rentes moyennes sur 5 ans de l'exploitation des ressources naturelles renouvelables en Norvège (Source: Duhaime et Caron, 2006, Figure 2 p. 25).



L'Arctique fait l'objet d'une activité de transport maritime limitée afin d'assurer le ravitaillement des populations vivant le long des passages du Nord-Est et du Nord-Ouest, en lien avec la pêche autour de l'Islande et de la mer de Béring, la mer de Barents et la mer de Norvège, et le tourisme le long des côtes du Nord de la Norvège, de l'Ouest du Groenland et du Svalbard (Peters *et al.*, 2011). Le transport de marchandises par cargo est associé aux exploitations minières importantes en Alaska (zinc) et en Russie (principalement du nickel), et le transport restreint de pétrole et de gaz a surtout lieu le long des côtes eurasiennes (Peters *et al.*, 2011).

OPPORTUNITÉS LOCALES POUR LE DÉVELOPPEMENT DES ACTIVITÉS ÉCONOMIQUES DÉCOULANT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE EN ARCTIQUE : DES BÉNÉFICES ÉCONOMIQUES POTENTIELLEMENT ÉLEVÉS POUR DE FORTS COÛTS ÉCONOMIQUES DANS UN ENVIRONNEMENT À HAUT RISQUE

Toutes les industries opérant en Arctique sont confrontées à des opportunités et contraintes différentes en lien avec les changements climatiques en Arctique. Ces opportunités sont associées à des bénéfices économiques potentiellement élevés mais qui ont aussi des coûts économiques forts et des risques financiers élevés. La fonte de la banquise permet d'augmenter l'accès géographique ou la durée d'accès aux ressources naturelles telles que le poisson et le bois (ressources renouvelables), le pétrole, le gaz et les minéraux (ressources non renouvelables). Cet accès facilité pourrait se traduire par une augmentation des quantités extraites et donc une augmentation de revenus pour l'industrie de la pêche, l'exploitation forestière, et l'industrie minière (pétrole et gaz, minéraux). Les opportunités économiques mises en avant sont principalement liées à l'accès accru aux res-

sources naturelles mais sans prendre en compte de variations de prix de marché qui peuvent aussi influencer le niveau de revenus réalisés.

Les descriptions et les chiffres présentés ci-dessous sont dérivés de l'utilisation de modèles de prévision et sont généralement associés à un niveau élevé d'incertitude. La qualité des prévisions de ces modèles dépend de la qualité des données, des tendances et des connaissances établies au moment où les modèles ont été établis. Les prédictions de ces modèles doivent être considérées avec prudence, surtout lorsqu'elles sont très optimistes, car elles peuvent ne pas se matérialiser pleinement, ou seulement en 2030-2050. Les estimations de gains potentiels avancées ne sont pas toujours fondées sur des données mesurées de manière objective, mais plutôt sur des perceptions. Il n'est donc pas facile de juger si les opportunités économiques se matérialiseront avec les revenus espérés ou non.

Le transport maritime bénéficierait de la fonte de la banquise permettant une utilisation saisonnière accrue des routes maritimes arctiques et circumpolaires telles que le passage du Nord-Est ou route maritime du nord (voie de navigation le long de la côte arctique russe qui relie l'Europe à l'Asie et au Pacifique), le passage du Nord-Ouest (le long de la côte nord-américaine), ou le détroit de Béring (détroit de 53 mille nautiques de long entre la Sibérie et l'Alaska) (Conley *et al.*, 2013, p. 32-37 ; Peters *et al.*, 2011). Ces routes permettent de réduire les distances de transport, le temps de transport et donc les frais de carburant, qui, dans un contexte où le prix du carburant augmente, les rend économiquement très attractives. Une réduction des coûts de transport de 40% au prorata de la distance et des réductions « record » des coûts de transport entre l'Europe et l'Asie sont souvent citées pour illustrer l'attractivité économique de ces routes maritimes. Des études récentes tenant compte des performances des navires dans des conditions de glace polaires sont beaucoup moins optimistes avec des réductions de coûts estimées à 5-16 % seulement dans les conditions actuelles, 29 % en 2030 et 37 % en 2050 (Peters *et al.*, 2011 ; Liu et Kronbak, 2010). Ces réductions de coûts doivent



être comparées aux coûts plus élevés liés à la construction de navires pouvant naviguer dans les conditions arctiques, les changements constants de vitesse de navigation, les difficultés de navigation entraînant une navigation plus lente, et le risque d'accidents accru à cause d'une visibilité réduite et des conditions de glace, en plus de frais liés à l'utilisation des services d'un brise-glace (Liu et Kronbak, 2010). L'Arctique dispose d'un nombre très limité de ports en eau profonde ouverts aux usages publics, de stations de carburant, ou de lieux de ravitaillement fiables (escales), d'infrastructures de communication et d'intervention d'urgence très réduites en Russie et Europe du Nord et quasi inexistantes le long de la côte nord-américaine (Valsson et Ulfarsson, 2011 ; Dawson *et al.*, 2014). Tout ceci semble pour l'instant limiter l'attrait économique des routes maritimes arctiques et circumpolaires par rapport au canal de Suez ou de Panama, et d'autant plus suite à la baisse récente du prix du pétrole (Peters *et al.*, 2011).

L'industrie de la pêche et de l'aquaculture bénéficierait d'une augmentation des stocks de poissons en Arctique. Les stocks de poissons migrent vers le Nord (mer de Barents et la mer de Béring) en lien avec un réchauffement des eaux de surface des océans, et avec des prévisions de niveaux de pêche sans précédent qui bénéficieraient surtout aux pêcheries commerciales (Hunt Jr. *et al.*, 2013 ; Christiansen *et al.*, 2014 ; Falk-Petersen *et al.*, 2015). La mer de Barents affiche déjà des niveaux de densité de poissons plus élevés, avec une productivité accrue à tous les niveaux trophiques en lien avec le changement climatique et les remontées accrues d'eaux froides riches en nutriments comme en hiver 2012. Les bénéfices économiques se matérialiseront à condition de ne pas surexploiter des stocks de poissons dans un contexte où les données biologiques sont encore insuffisantes (Christiansen *et al.*, 2014). L'augmentation des bénéfices économiques doit être comparée aux impacts négatifs du changement climatique et de l'acidification des océans sur les coquillages et crustacés à squelette ou coquille calcaire (par exemple, les palourdes et les huîtres) et sur le zooplancton (krill et ptéropodes, nourriture de base des saumons) (Océan et Climat, 2015). Il

a été suggéré que le changement climatique pourrait être directement ou indirectement l'une des causes de la disparition d'espèces commerciales comme le saumon royal au large de l'Alaska (Conley *et al.*, 2013). Le changement climatique peut avoir un impact négatif sur la pêche de subsistance dans les zones où celle-ci constitue une source importante d'alimentation (Himes-Cornell et Kasperski, 2015). Les réductions de coûts de pêche liés aux stocks de poisson accrus doivent être comparées aux frais plus élevés de carburant en plus des coûts supplémentaires liés à la navigation en Arctique de manière générale, et les forts coûts de surveillance et d'application pour limiter la pêche illégale, non déclarée et non réglementée (IUU) en Arctique (WWF, 2008).

L'industrie du pétrole et du gaz pourrait bénéficier de l'augmentation de l'accès physique aux ressources, y compris aux réserves offshore en mer des Tchoukches. 400 champs de pétrole et de gaz sur terre (« onshore ») au nord du cercle polaire arctique représentent déjà environ 240 milliards de barils (BOE) de pétrole et de gaz naturel en équivalent pétrole, soit près de 10 pour cent des ressources conventionnelles connues en terme de production cumulée et de réserves prouvées restantes (Bird *et al.*, 2008).

La quantité totale de ressources arctiques non encore découvertes et potentiellement récupérables avec les technologies actuelles est estimée à environ 90 milliards de barils de pétrole, 1669 milliards de pieds cubes de gaz naturel, et 44 milliards de barils de gaz naturel liquide, avec environ 84 % du pétrole et de gaz non découverts offshore (Bird *et al.*, 2008). L'exploitation du pétrole et du gaz en l'Arctique a cependant des coûts élevés pour établir et entretenir des infrastructures adaptées aux conditions arctiques et pouvoir fonctionner en conditions arctiques, ainsi que des coûts d'investissement pour l'achat de licences d'exploration, de licences d'exploitation, de permis de forage, d'équipement et de personnel (Conley *et al.*, 2013). Il y a encore une très faible concurrence avec les énergies alternatives - à fort potentiel dans le plus long terme - telles l'énergie éolienne, houlomotrice, hydraulique des grands fleuves qui se jettent



dans l'océan Arctique, et géothermique dans quelques endroits (Valsson et Ulfarsson, 2011). Suite à un rapport en Avril 2012 de la Lloyd's, l'une des plus grandes compagnies d'assurance basée au Royaume-Uni, et de Chatham House, un *think tank* britannique, certains assureurs, comme la banque allemande West LB, ont indiqué qu'ils n'assureraient pas des opérations en Arctique au vu des défis logistiques et opérationnels en lien avec des conditions difficiles et imprévisibles (Conley *et al.*, 2013). La récente baisse du prix du pétrole, combinée à l'exploitation des réserves de ressources naturelles auparavant non exploitables de manière commercialement viable (par exemple, le gaz de schiste et autres gaz non conventionnels) ont, pour l'instant, fortement réduit les incitations économiques à exploiter les ressources arctiques en pétrole et en gaz (Conley *et al.*, 2013).

La société néerlandaise Shell a été l'une des premières à exploiter les réserves en pétrole et en gaz offshore dans les mers de Beaufort et des Tchouktches. Le coût total de l'investissement pour une telle opération est estimé à plus de 4,5 milliards de dollars américains pour l'acquisition de licences d'exploitation en 2005 et 2008, soit un sixième de son budget annuel de dépenses (Conley *et al.*, 2013). L'investissement total pourrait dépasser 40-50 milliards de dollars américains, ce qui représente un risque financier important pour l'entreprise (Conley *et al.*, 2013).

L'industrie minière bénéficierait d'une augmentation de l'accès physique aux ressources minérales telles que le plomb et le zinc en Alaska, l'or au Canada, les terres rares au Groenland, les diamants et le fer au Canada et au Groenland, de l'aluminium en Islande, et du nickel en Russie (Duhaime et Caron, 2006; Conley *et al.*, 2013). Le Groenland pourrait devenir une porte d'entrée commerciale pour la Chine dans la région arctique suite à la récente découverte de vastes réserves de terres rares et une augmentation de l'intérêt stratégique de la Chine pour ces ressources (Gattolin, 2014, Conley *et al.*, 2013). L'indice GFMS des métaux de base a augmenté de 300 % entre Juin 2002 et Juin 2007 (Gattolin, 2014, Conley *et al.*, 2013), mais par contre l'extraction de l'or en Alaska a été arrêtée à cause

de faibles prix de marché (Conley *et al.*, 2013). L'exploitation minière en Arctique doit pouvoir résister aux conditions météorologiques difficiles et est donc associée à des coûts d'infrastructure et d'exploitation très élevés. Le développement et la maintenance des infrastructures (routes ou couloirs ferroviaires) sont souvent assurés par le gouvernement plutôt que l'industrie. Le développement des infrastructures pourrait débloquent l'exploitation de certaines ressources (par exemple du cuivre dont l'exploitation a été suspendue par manque d'infrastructures, Conley *et al.*, 2013).

Le changement climatique en Arctique semble permettre un accès étendu à des zones touristiques, bénéficiant directement à **l'industrie du tourisme arctique**. Des zones auparavant inaccessibles sont devenues accessibles à l'exploration et la navigation touristiques, et ce, d'autant plus que la saison navigable se rallonge (Dawson *et al.*, 2014). Il y a une demande croissante à l'échelle mondiale d'expériences touristiques « lointaines » et pour des paysages et faunes uniques et emblématiques qui ont conduit à une augmentation du tourisme arctique (Dawson *et al.*, 2014). Le nombre d'itinéraires aux alentours de l'Arctique canadien a plus que doublé entre 2005 et 2013, tout en restant relativement limité avec moins de 30 voyages par an (Dawson *et al.*, 2014). Les coûts d'infrastructure et d'exploitation pour les opérateurs de tourisme arctique sont en baisse avec le changement climatique (Dawson *et al.*, 2014). Les coûts de transaction sont cependant élevés avec des permis d'exploitation difficiles à obtenir dans certains pays ou associés à des coûts d'opportunité élevés en raison d'évasion fiscale et d'un manque de communication efficace entre différents organismes gouvernementaux (Dawson *et al.*, 2014). Les coûts d'information peuvent être élevés pour la navigation dans les zones « inexplorées » et « sauvages » de l'Arctique: des accidents de navigation peuvent survenir en raison de la faible précision des cartes nautiques comme par exemple l'échouage du *Clipper Adventurer* en été 2010 (Dawson *et al.*, 2014).

L'industrie de la fabrication et la transformation limitée en Arctique pourrait bénéficier de



l'augmentation de la disponibilité des matières premières comme le poisson pour la transformation (Islande, Groenland), des terres rares pour l'électronique (Finlande arctique), et l'aluminium pour la fonderie (Islande) (Glomsrød et Aslaksen, 2009). Comme pour les autres industries, les coûts élevés en capitaux, technologie, main-d'œuvre qualifiée et transport vers les centres de consommation depuis les centres de fabrication et transformation restreignent généralement le développement du secteur secondaire en Arctique (Conley *et al.*, 2013; Arctic.ru, Mars 2015). Les besoins en investissement et les coûts de réparation vont vraisemblablement augmenter avec les changements climatiques de plus en plus imprévisibles et le dégel du pergélisol.

L'industrie des services desservant les populations arctiques bénéficierait indirectement d'une activité économique accrue dans la région, mais serait aussi la première à devoir assumer le financement pour le développement et la maintenance d'infrastructures comme les routes ou couloirs ferroviaires (Conley *et al.*, 2013).

ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX

Les principales préoccupations environnementales sont liées à la perte d'un environnement encore relativement vierge et d'écosystèmes arctiques uniques à cause du changement climatique ou de pressions de développement économique. Aux États-Unis, la loi sur la conservation des terres d'intérêt national en Alaska (« Alaska National Interest Lands Conservation Act ») a permis la création en 1980 du « Arctic National Wildlife Refuge » (ANWR), une zone sauvage protégée de 19 millions d'hectares, comprenant des troupeaux de caribous, des ours polaires et des mammifères ainsi que de nombreuses espèces de poissons et d'oiseaux.

Le développement économique de l'Arctique est associé à un risque élevé de pollution atmosphérique et marine, en particulier avec par le pétrole en cas de marées noires, les polluants organiques persistants (POPs), les métaux lourds, les substances radioactives, ainsi qu'à un appauvris-

sement de la couche d'ozone (Kao *et al.*, 2012; Conley *et al.*, 2013). Les opérations de Shell en Arctique ont été ralenties suite à un accident sur leur barge de réponse, l'*Arctic Challenger*, et à cause d'un manque de mesures d'intervention appropriées pour prévenir et contenir une marée noire (Conley *et al.*, 2013). La pollution générée par les carburants diesel lourds utilisés par le transport maritime et les navires de tourisme arctique accélère la fonte de la banquise (Conley *et al.*, 2013). Les inquiétudes sur la pollution générée par l'extraction minière ont bloqué l'exploitation de l'or en Alaska (Conley *et al.*, 2013). Le risque élevé de marée noire et la mauvaise réputation associée, le manque de confiance des assureurs pour assurer les risques liés à l'extraction pétrolière en Arctique combinée avec des coûts financiers et risques élevés ont conduit notamment Total et BP à se désengager de l'Arctique (Conley *et al.*, 2013).

Les externalités du changement climatique sont également préoccupantes, avec des émissions de carbone plus dommageables en Arctique qu'ailleurs (Whiteman *et al.*, 2013). Whiteman *et al.* (2013) ont estimé que la libération de méthane liée au dégel du pergélisol coûtera 60 milliards de dollars américains en l'absence de mesures d'atténuation, soit environ 15 % du coût total moyen des impacts du changement climatique estimé à 400 USD milliards de dollars. L'atténuation pourrait réduire de moitié les coûts des rejets de méthane (Whiteman *et al.*, 2013). Les conséquences économiques de telles émissions de carbone au pôle sont mondiales, mais affectent à 80 % les économies les plus pauvres d'Afrique, d'Asie et d'Amérique du Sud qui subissent des événements climatiques extrêmes avec une fréquence accrue (Whiteman *et al.*, 2013).

ENJEUX SOCIAUX

Il y a plusieurs enjeux sociaux associés au changement climatique ou au développement économique et l'industrialisation de l'Arctique. L'accent est souvent mis sur les populations autochtones et les résidents de l'Arctique qui dépendent fortement des ressources de subsistance fournies par leur environnement. Le recul et l'instabilité

de la banquise en raison du changement climatique réduisent le potentiel de chasse de gibier et de mammifères marins et de pêche sous la glace (Ahlenius *et al.*, 2005 p.4; Himes-Cornell et Kasperski, 2015). Le développement économique génère aussi une concurrence accrue intra- et inter-industrie pour l'accès aux ressources dans un espace en 3 dimensions. Il y a par exemple une concurrence accrue entre chalutiers et pêcheurs côtiers dans les pêcheries du sud (Ahlenius *et al.*, 2005 p.24). Il y a également une concurrence entre la petite pêche et l'extraction de pétrole et de gaz offshore (Alaska), et entre les petits éleveurs et l'extraction de pétrole et de gaz (Russie) (Conley *et al.*, 2013; Duhaime et Caron, 2006).

L'augmentation du tourisme en Arctique est soutenue par les populations autochtones et les résidents de l'Arctique à condition d'être faite dans le respect du littoral, de la faune, et des paysages naturels sensibles ou culturellement importants (Dawson *et al.*, 2014). C'est ce qui a eu lieu *de facto* en Arctique canadien grâce à la « bonne volonté » et le haut niveau d'éthique des opérateurs de croisières-expéditions. Toutefois, cette activité n'étant pas réglementée, l'arrivée d'acteurs moins respectueux dans l'industrie pourrait changer cet état de fait et engendrer des conflits. Des préoccupations concernant la santé des populations autochtones ont, dans certains cas, arrêté l'extraction minière (par exemple, l'uranium en Alaska, Conley *et al.*, 2013). Dans d'autres endroits, de fortes préoccupations et contestations autochtones ont bloqué l'extraction minière (par exemple, de l'or et de charbon en Alaska, Conley *et al.*, 2013).

Comme mis en avant par les changements historiques des systèmes de gouvernance en Russie, la forte dépendance des populations de l'Arctique vis-à-vis du secteur tertiaire (service public) rend les populations arctiques très vulnérables aux retraits des industries de services et des gouvernements de cette région, avec des conséquences sociales souvent dramatiques dans un environnement où des alternatives d'emploi sont extrêmement limitées (Amundsen, 2012; Glomsrød et Aslaksen, 2009).

LES GRAINES SONT SEMÉES, MAIS LA « RUÉE VERS LE FROID » N'A PAS ENCORE COMMENCÉ

Un développement des industries arctiques pourrait permettre de récolter des bénéfices économiques très élevés, mais les coûts d'investissement et d'exploitation élevés réduisent sa compétitivité par rapport à d'autres régions du monde. Toutes les parties prenantes semblent se positionner pour l'obtention de droits d'accès exclusifs aux ressources arctiques et routes maritimes arctiques et circumpolaires stratégiques. La « ruée vers le froid » n'a cependant pas encore vraiment commencé. Tous les acteurs semblent faire preuve de prudence relative en raison des risques financiers et diplomatiques associés au développement économique de l'Arctique.

LES DÉFIS POLITIQUES À VENIR : CONCILIER DIFFÉRENTS POINTS DE VUE POUR TIRER PARTI DES OPPORTUNITÉS NOUVELLES EN ARCTIQUE EN INTÉGRANT LES PRÉOCCUPATIONS ENVIRONNEMENTALES ET SOCIALES

Des perspectives et des valeurs sociétales très contrastées co-existent : l'Arctique est « **un espace sauvage** » pour les organisations environnementales de préservation de la nature, une « **frontière technologique à repousser** » source d'énergie et de minéraux pour l'industrie, une « **maison** » pour plus d'un million d'autochtones, et un lieu « **d'intérêt stratégique et géopolitique** » pour les gouvernements en lien avec la sécurité militaire, la sécurité énergétique et la sécurité environnementale (citation adaptée de Sheila Watt-Cloutier dans Ahlenius *et al.*, 2005). Les principaux défis politiques semblent être liés à la nécessité de concilier ces perspectives contrastées, afin de minimiser les conflits entre elles et assurer leur cohabitation.

Une voie possible pour faciliter la résolution des conflits qui pourrait être considérée par les décideurs du niveau local au niveau mondial repose sur l'intégration de la science, de l'économie, du droit et de la diplomatie (Berkman et Young, 2009). La science peut aider dans la constitution d'une base de connaissances objectives mutuellement acceptée et reconnue, des observatoires, des suivis des évolutions et une vérification par tous afin d'établir des rapports de confiance. L'économie et le droit peuvent mettre à disposition des outils d'évaluation qui tiennent compte des conflits d'usage, et ainsi contribuer à un arbitrage. L'intégration de la science, de l'économie, du droit, et de la diplomatie pourrait aider à rassembler les gagnants arctiques du changement climatique bien connectés au niveau mondial et les perdants du niveau local au niveau mondial. Cette intégration et l'instauration de discussions du niveau local au niveau mondial pourraient aider à la réalisation des opportunités économiques s'ouvrant avec le changement climatique en Arctique, tout en prenant en compte les préoccupations environnementales et sociales du niveau local au niveau mondial. Les choix par des décideurs locaux et nationaux pour l'intégration et d'établissement de discussions afin de concilier les perspectives contrastées sur l'Arctique varieront probablement au sein des pays, entre les pays et en fonction de l'échelle considérée (du niveau local au niveau mondial).

Au sein des pays, le développement économique et humain s'est fait selon trois modèles principaux : le « modèle nord-américain », qui est un régime néo-libéral de prospection pionnière en conditions extrêmes fortement concentré autour de l'extraction des ressources non renouvelables, le « modèle scandinave » qui suit le modèle de redistribution de l'Europe du Nord, et le « modèle russe » qui est fortement lié aux changements politiques historiques (Glomsrød et Aslaksen, 2009). De nouvelles approches institutionnelles pour une meilleure gestion des ressources naturelles ont été testées dans certaines régions de l'Arctique avec la promotion de la co-gestion et l'intendance conjointe. Cette restructuration des pouvoirs et des responsabilités entre les parties prenantes exige une volonté

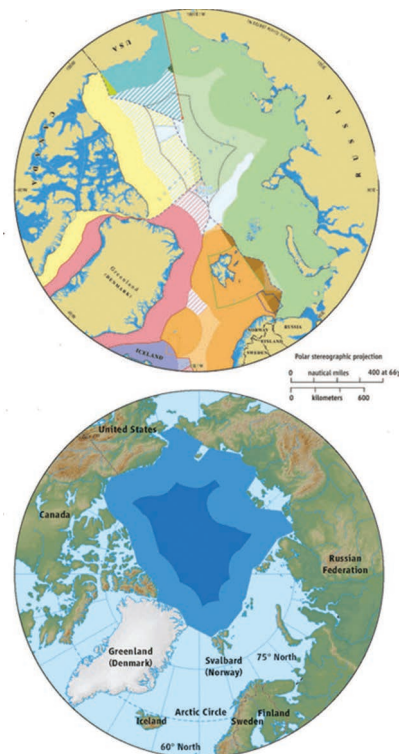


Fig.5 — En haut, représentation des conflits de compétence autour de l'océan Arctique avec des frontières liées au plateau continental (couleurs différentes), et en bas, les source possible de coopération liées à des colonnes d'eau partagées, avec la haute mer comme espace international au centre de l'océan Arctique (bleu foncé) entouré de zones économiques exclusives (ZEE, bleu clair). Source : Berkman et Young (2009).

politique d'aller vers une décentralisation et une prise de décision collaborative, en lien avec une meilleure coordination entre les populations autochtones et les gouvernements (Glomsrød et Aslaksen, 2009). Les politiques publiques pour la promotion des intérêts extérieurs à l'Arctique peuvent permettre de minimiser les conflits entre les parties prenantes par une reconnaissance explicite des populations locales et permettent une meilleure collecte de données sur les activités et la répartition des bénéfices économiques en combinaison avec des indicateurs sociaux et environnementaux (Ahlenius *et al.*, 2005). Certains pays de l'Arctique ont déjà adopté des mesures de prévention de la pollution avec des mécanismes de compensation associés juridiquement reconnus ou mis en place des stratégies nationales d'adaptation au changement climatique et de sécurité énergétique (Ahlenius *et al.* 2005; Amundsen *et al.*, 2007). Par

exemple, le Canada a étendu le champ d'application géographique de sa loi sur la prévention de la pollution des eaux arctiques (Berkman et Young, 2009). Certains pays de l'Arctique ont mis en place des programmes nationaux de recherche avec pour objectif spécifique d'informer l'action en Arctique pour l'adaptation au changement climatique (L'Arctique – Sentinelle avancée du réchauffement climatique. Journée-débats co-organisée par la France et la Norvège, Paris, 17 mars 2015). Ces initiatives nationales, cependant, ne permettent pas de résoudre les questions transfrontalières qui nécessitent plutôt des approches supranationales (Berkman et Young, 2009).

Entre les différents pays, il existe un certain nombre de tensions liées à des conflits de compétences (Figure 5), des différends de plus en plus marqués pour l'extraction des ressources naturelles et des risques pour la sécurité transfrontalière. Un nouveau « grand jeu politique » est en train de s'établir entre les grandes puissances, avec des implications en matière de sécurité au niveau mondial (Berkman et Young, 2009). La coopération régionale et internationale semble être généralement favorisée malgré des manifestations d'extensions unilatérales de souveraineté dans les zones où la souveraineté est contestée ou dans les zones internationales (drapeau planté par la Russie sous le pôle Nord, augmentation unilatérale par l'Islande de ses quotas de pêche, le statut non consensuel des passages du Nord-Est et du Nord-Ouest).

Les accords internationaux juridiquement contraignants applicables à l'Arctique sont peu nombreux mais très importants. La Convention des Nations Unies sur le droit de la mer (CNUDM) du 10 Décembre 1982 est considérée à ce jour comme l'un des principaux accords fournissant un cadre juridique pour l'utilisation de l'Arctique. La CNUDM permet de réguler l'accès aux ressources de l'Arctique, le trafic maritime et la gestion de la pollution grâce à l'identification de zones de compétence nationales et un mécanisme de règlement des différends (Berkman et Young, 2009). D'autres conventions internationales sont aussi pertinentes pour l'Arctique (Dawson *et al.*, 2014): la Convention interna-

tionale sur la Sauvegarde de la vie humaine en mer (SOLAS), qui met l'accent sur les exigences de sécurité, la Convention internationale pour la prévention de la pollution marine par les navires (MARPOL) qui se concentre sur la protection de l'environnement, la Convention internationale sur les normes de formation des gens de mer, de délivrance des brevets et de veille (STCW) qui se concentre sur la formation et les compétences, et la Convention pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du nord-est (OSPAR), qui s'applique à une partie de l'Arctique et fournit un guide pour la coopération internationale sur la protection de l'environnement marin en Atlantique du nord-est.

Plus récemment, un certain nombre d'accords-cadres ont été conclus, notamment en matière de navigation maritime en Arctique, d'opérations de recherche et de sauvetage, et la gestion de la pollution. Ces accords fournissent des orientations et permettent d'organiser la coopération internationale en Arctique. L'Organisation maritime internationale (OMI) a permis l'adoption d'une série de recommandations, par exemple pour les navires opérant dans les eaux glacées de l'Arctique en 2002, pour la préparation de croisières touristiques dans les zones reculées, et pour les paquebots de croisière navigant dans des zones éloignées des moyens de secours et de sauvetage (Berkman et Young, 2009). L'OMI a permis l'adoption en 2014 d'un recueil de règles obligatoires pour les navires navigant dans les eaux polaires: le « code polaire ». Le code polaire devrait devenir obligatoire de manière effective à partir de 2017 avec son insertion dans la Convention internationale sur la Sauvegarde de la vie humaine en mer (SOLAS). D'autres discussions sont en cours afin d'inclure d'autres éléments du code polaire dans la Convention internationale pour la prévention de la pollution marine par les navires (MARPOL) et les rendre ainsi obligatoires.

Tous ces accords ont été possibles grâce au travail d'organisations intergouvernementales comme l'Organisation des Nations Unies et ses institutions spécialisées (par exemple, l'Organisation Maritime Internationale), ainsi que des forums internationaux comme le Conseil de l'Arc-

tique. Ces organisations et forums constituent des plateformes de discussion entre les pays et ont conduit avec succès à la mise en place d'actions concertées et coordonnées avec des bénéfices pour tous (« gagnant-gagnant »). Le Conseil de l'Arctique est constitué des huit états ayant des terres dans le cercle arctique : les États-Unis d'Amérique (Alaska), le Canada, le Danemark (Groenland et les îles Féroé), l'Islande, la Norvège, la Suède, la Finlande et la Fédération de Russie. Le Conseil de l'Arctique est un forum intergouvernemental pour les gouvernements et les peuples de l'Arctique (<http://www.arctic-council.org>). Il est la principale institution de l'Arctique, officiellement créé par la Déclaration d'Ottawa en 1996 pour promouvoir la coopération, la coordination et l'interaction entre les États de l'Arctique. Il inclut la participation des communautés autochtones et autres habitants de l'Arctique dans les discussions autour de questions de gestion commune de l'Arctique, notamment de développement durable et de protection de l'environnement. Le Conseil de l'Arctique n'a pas d'autorité réglementaire, mais a permis la réalisation d'évaluations scientifiques telles que l'évaluation des impacts du changement climatique en Arctique (« Arctic Climate Impact Assessment », ACIA) par les groupes de travail du programme arctique de suivi et d'évaluation (« Arctic Monitoring and Assessment Programme », AMAP) et du programme de conservation de la faune et de la flore arctiques (« Conservation of Arctic Flora and Fauna », CAFF), en lien avec le Comité international des sciences arctiques (« International Arctic Science Committee », IASC). Le Conseil de l'Arctique a également permis une mise en avant des questions arctiques auprès des instances mondiales, avec la formu-

lation et l'adoption en 2001 de la Convention de Stockholm sur les polluants organiques persistants (POPs) en partie informée par le travail du Conseil de l'Arctique (Berkman et Young, 2009).

Il y a un certain nombre d'organismes internationaux de surveillance et de recherche scientifiques menant des initiatives et des projets scientifiques en Arctique. Ces projets scientifiques avec des collaborations internationales pourraient faciliter l'établissement de rapports de confiance et renforcer la coopération entre États de l'Arctique en établissant des bases scientifiques communes reconnues (Berkman et Young, 2009). Ces projets scientifiques incluent par exemple le Comité international des sciences arctiques, le Conseil polaire européen (« European Polar Board »), et le Chantier Arctique français.

Il existe déjà de nombreuses organisations et accords autour de l'Arctique, apportant une base institutionnelle qui pourrait être renforcée et développée en fonction des besoins. Le développement économique crée d'ailleurs déjà des besoins institutionnels nouveaux en Arctique. L'un des défis majeurs est de pouvoir renforcer la capacité institutionnelle existante afin de mettre en place les garde-fous environnementaux et sociaux nécessaires au rythme du développement économique. Il y a un fort potentiel de création de richesse économique et de bien-être pour le bénéfice de tous. Les choix effectifs de développement économique, de coordination et de coopération effectués par les industries et les pays dans les prochaines années vont avoir un impact majeur sur ce que sera l'Arctique de demain.

RÉFÉRENCES

- AHLENIUS H., JOHNSEN, K. and NELLEMAN, C., 2005 – *Vital Arctic Graphics - People and global heritage on our last wildshores*. UNEP/GRID-Arendal, www.grida.no/files/publications/vitalarcticgraphics.pdf.
- AMUNDSEN H., 2012 – *Illusions of Resilience? An Analysis of Community Responses to Change in Northern Norway*. Ecology and Society, 17 (4): 46.
- AMUNDSEN H., HOVELSRUD G. K. and PRESTRUD P., 2007 – *Workshop Report of the Workshop on Adaptation to Climate Change in the Arctic, 26-27 June 2006 Oslo, Norway*. Hosted by the Ministry of Foreign Affairs, Norway. Organised by CICERO – Centre for International Climate and Environmental Research – Oslo, www.cicero.uio.no/workshops/acia-workshop-2006/Workshop-report-Final.pdf, 62 p.
- ARCTIC. RU, 2015 – *Structure of the Economy*. <http://Arctic.ru/economy-infrastructure/structure-economy>.
- BERKMAN P. A. and YOUNG O. R., 2009 – *Governance and Environmental Change in the Arctic Ocean*. Science, 324: 339-340.
- BIRD K., CHARPENTIER R., GAUTIER D., HOUSEKNECHT D., KLETT T., PITMAN J., MOORE T. E., SCHENK C. J., TENNYSON M. E. and WANDREY C. J., 2008 – *Circum-Arctic Resource Appraisal; Estimates of Undiscovered Oil and Gas North of the Arctic Circle*. U. S. Geological Survey, USGS Fact Sheet 2008-3049, <http://pubs.usgs.gov/fs/2008/3049>.
- BOÉ J., HALL A. and QU X., 2009 – *September Sea-Ice Cover in the Arctic Ocean Projected to Vanish by 2100*. Nature Geoscience, 2: 341-343.
- CHRISTIANSEN J. S., MECKLENBURG C. W. and KARAMUSHKO O. V., 2014 – *Arctic Marine Fishes and their Fisheries in Light of Global Change*. Global Change Biology, 20: 352-359.
- CONLEY H. A., PUMPHREY, D. L., TOLAND, T. M. and DAVID, M., 2013 – *Arctic Economics in the 21st Century: The Benefits and Costs of Cold. A Report of the CSIS Europe Program*. Center for Strategic and International Studies. http://csis.org/files/publication/130710_Conley_ArcticEconomics_WEB.pdf.
- DAWSON J., JOHNSTON M. E. and STEWART, E. J., 2014 – *Governance of Arctic Expedition Cruises Hips in a Time of Rapid Environmental and Economic Change*. Ocean & Coastal Management, 89: 88 – 99.
- DITTMER J., MOISIO S., INGRAMA A. and DODDS K., 2011 – *Have you Heard the One about the Disappearing Ice? Recasting Arctic Geopolitics*. Political Geography, 30: 202 – 214.
- DUHAIME G. and CARON A., 2006 – *The Economy of the Circumpolar Arctic*. In *The Economy of the North*, GLOMSRØD S. and ASLAKSEN I. (eds), 17-23.
- FALK-PETERSEN S., PAVLOV V., BERGE J., COTTIER F., KOVACS K. and LYDERSEN C., 2015 – *At the Rainbow's end: High Productivity Fueled by Winter upwelling along an Arctic Shelf*. Polar Biology, 38: 5-11.
- GATTOLIN A., 2014 – *Rapport d'information fait au nom de la commission des affaires européennes sur les stratégies européennes pour l'Arctique*. Enregistré à la Présidence du Sénat le 2 juillet 2014, Les Rapports du Sénat no 634, <http://www.senat.fr/rap/r13-684/r13-684.html>, 190 p.
- GLOMSRØD S. and ASLAKSEN I., 2009 – *The Economy of the North 2008*. Statistics Norway. http://ssb.no/a/english/publikasjoner/pdf/sa112_en/sa112_en.pdf, 102 p.
- HIMES-CORNELL A. and KASPERSKIS., 2015 – *Assessing Climate Change Vulnerability in Alaska's Fishing Communities*. Fisheries Research, 162: 1 – 11.
- HUNT Jr G. L., BLANCHARD A. L., BOVENG P., DALPADADO P., DRINKWATER K. F., EISNER L., HOPCROFT R. R., KOVACS K. M., NORCROSS B. L., RENAUD P., REIGSTAD M., RENNER M., SKJOLDAL H. R., WHITEHOUSE A. and WOODGATE R. A., 2013 – *The Barents and Chukchi Seas: Comparison of two Arctic Shelf Ecosystems*. Journal of Marine Systems: Large-scale Regional Comparisons of Marine Biogeochemistry and Ecosystem Processes - Research Approaches and Results. 109 – 110: 43-68.
- KAO S. -M., PEARRE N. S. and FIRESTONE J., 2012 – *Adoption of the Arctic Search and Rescue Agreement: a Shift of the Arctic Regime Toward a Hard Law Basis?* Marine Policy, 36: 832 – 838.
- KWOK R. and ROTHROCK D. A., 2009 – *Decline in Arctic Sea Ice Thickness from Submarine and ICES at Records: 1958-2008*. Geophysical Research Letters, 36: L15501.
- L'ARCTIQUE – *Sentinelle avancée du réchauffement climatique*. Journée-débats co-organisée par la France et la Norvège, Paris, 17 mars 2015.

- LIU M. and KRONBAK J., 2010 – *The Potential Economic Viability of Using the Northern Sea Route (NSR) as an Alternative Route between Asia and Europe*. Journal of Transport Geography, 18: 434 – 444.
- MAGDANZ J. S., TAHBONE S., AHMASUK A., KOSTER D. S. and DAVIS B. L., 2007 – *Customary Trade and Barter in Fish in the Seward Peninsula Area: FIS Project 04-151*. Technical Paper No. 328. Division of Subsistence, Alaska Department of Fish and Game, Juneau, Alaska, Department of Natural Resources, Kawerak, Inc., Nome, Alaska, www.subsistence.adfg.state.ak.us/TechPap/tp328.pdf.
- MINISTÈRE DES AFFAIRES ÉTRANGÈRES DE NORVÈGE, 2015 – *Le monde du grand nord. La création de valeurs et les ressources. Changements climatiques et connaissances. Le développement des régions du Grand Nord nous concerne tous*. www.norvege.no/PageFiles/732027/Le_Monde_du_Grand_Nord_2015.pdf, 20 p.
- PARKINSON C. L., 2014 – *Global Sea Ice Coverage from Satellite Data: Annual Cycle and 35-Yr Trends*. J. Climate, 27: 9377 – 9382.
- PETERS G. P., NILSSEN T. B., LINDHOLT L., EIDE M. S., GLOMSRØD S., EIDE L. I. and FUGLESTVEDT J. S., 2015 – *Future Emissions from Shipping and Petroleum Activities in the Arctic*. Atmospheric Chemistry and Physics, 11: 5305-5320.
- PLATEFORME OCÉAN ET CLIMAT, 2015 – *Fiches scientifiques*. www.ocean-climate.org, 69 p.
- SERREZE C. M., HOLLAND M. M. and STROEVE J., 2007 – *Perspectives on the Arctic's Shrinking Sea-Ice Cover*. Science, 315: 1533-1536.
- US NATIONAL SNOW AND ICE DATA CENTER IN BOULDER COLORADO, 2015 – *Climate Change in the Arctic*. https://nsidc.org/cryosphere/arctic-meteorology/climate_change.html.
- VALSSON T. and ULFARSSON G. F., 2011 – *Future Changes in Activity Structures of the Globe under a Receding Arctic Ice Scenario*. Futures, 43: 450 – 459.
- WHITEMAN G., HOPE C. and WADHAMS P., 2013 – *Climate science: Vast costs of Arctic change*. Nature, 499: 401-403.
- WWF, 2008 – *Illegal Fishing in Arctic Waters*. Oslo: WWF International Arctic Programme. http://assets.panda.org/downloads/iuu_report_version_1_3_30apr08.pdf.



Océan, biodiversité et climat

L'environnement marin a joué un rôle déterminant dans l'histoire de la vie et l'Océan actuel garde son rôle primordial dans cette évolution, ainsi que dans celle 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 km². Mais il faut en fait beaucoup plus penser l'Océan en volume, soit de l'ordre de 1 370 millions de km³. La profondeur moyenne est autour de 3 800 m et la principale caractéristique de ce gigantesque milieu est sa continuité. L'autre trait particulier de l'Océan est sa salinité, en comparaison au reste des eaux libres de la planète. Celle-ci est extrêmement stable au large (35 psu¹, 1 050 mOsm. l⁻¹) 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-

¹ Practical salinity unit



organismes connus, des cyanobactéries. Celles-ci sont parties à la conquête généralisée de l'océan vers 3400-3200 Ma, alors sans aucun 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_2) et serait apparue vers 3500 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.

Des événements déterminants pour le vivant et la biodiversité sont produits dans cet océan ancestral :

1. L'apparition de la membrane nucléaire et du noyau individualisé (transition procaryote-eucaryote) vers 2200 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 2100 et 1400 Ma.
3. L'apparition des pluricellulaires et métazoaires vers 2100 Ma.

Il s'y produira aussi un fait exceptionnel : 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 ré-

gulation isosmotique intracellulaire entraîne pour l'organisme vivant, séparé de l'eau de mer par une membrane biologique, la même pression osmotique (de l'ordre de 1000 mOsm. l^{-1}) à l'intérieur (milieux intracellulaire et 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 concentrées (3-400 mOsm. l^{-1}) que l'eau de mer.

Le comportement perpétuel de boire 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 (Echinodermes, Brachiopodes, Chaetognathes etc.). 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 raisons. 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. L'expédition 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 251 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 km² 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 et 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 n'est pas seulement ces ressources vivantes, c'est 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_2 et évite ainsi un trop prononcé effet de serre dans l'atmosphère, mais malheureusement, en contrepartie, il s'acidifie à cause de la production d'acide carbonique. Le phytoplancton océanique stocke également du CO_2 dans la couche de surface ainsi que tous les bio-calcificateurs. Les transports océaniques redistribuent ainsi chaleur et salinité, ces deux activateurs 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 quantité 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 !



Denis Bailly,

Rémi Mongruel,

Emmanuelle Quillérrou

Services écosystémiques et conservation

Les écosystèmes marins et terrestres offrent de nombreux bénéfices à la société. Ils subissent cependant des pressions accrues en raison du changement climatique et de l'augmentation de la population humaine, de ses besoins et de leurs répercussions. Ces pressions accrues rendent dans la plupart des cas les pratiques de gestion et les politiques publiques actuelles inadéquates, celles-ci ne parvenant alors plus à atténuer ou réguler de telles pressions et à maintenir le niveau de bénéfices fournis par les écosystèmes. Des approches intégrées centrées sur les écosystèmes peuvent aider à identifier les bénéfices divers fournis par ces écosystèmes, les synergies ou les conflits. Cette identification dépend du niveau d'utilisation ou de conservation des écosystèmes. L'approche par les services écosystémiques peut aider à structurer la production d'évaluations exhaustives s'appuyant sur des connaissances scientifiques et les expériences des gestionnaires. Un processus itératif de « triage » peut être utilisé pour structurer l'interaction et le dialogue entre les acteurs et les scientifiques afin d'établir des études qui soient faisables, utiles et pertinentes en lien avec les questions, les besoins et les projets des gestionnaires et décideurs publics. L'approche par les services écosystémiques permet d'établir une photographie à un temps donné des écosystèmes et activités humaines qui en dépendent. Elle doit être appliquée à intervalles réguliers afin de pouvoir appréhender l'évolution des différents bénéfices fournis par les écosystèmes. L'approche par les services écosystémiques peut être combinée avec le cadre DPSIR (facteurs, pressions, états, impacts, réponses) afin de permettre une identification des facteurs de changement dans les écosystèmes. La combinaison de ces deux approches peut venir enrichir les discussions visant à l'établissement de plans de gestion et de politiques publiques pour la conservation du milieu marin, notamment lorsque ces écosystèmes sont soumis à des pressions liées au changement climatique, et maintenir des écosystèmes productifs et en bonne santé, contribuant au bien-être humain.

Les écosystèmes marins et terrestres en bonne santé fournissent une large gamme de bénéfices à la société tels que de la nourriture, des matériaux, des loisirs, une régulation du climat, etc. Le changement climatique et l'augmentation de la population humaine, ses besoins et leurs répercussions exercent des pressions croissantes sur les écosystèmes marins qui subissent une évolution rapide. Les stocks de poissons sauvages et la production aquacole, les

infrastructures côtières, et les activités récréatives sont souvent impactées négativement par des manifestations du changement climatique telles que l'augmentation du niveau des mers, l'acidification des océans, l'eutrophisation, le changement de température de l'eau et de conditions météorologiques sur les côtes (Océan et Climat, 2015). La surexploitation des écosystèmes marins, notamment des stocks de poissons, est en partie liée à une population hu-



maine croissante avec des besoins toujours plus importants. L'océan doit répondre à de plus en plus de besoins, ce qui génère une compétition accrue pour l'accès aux ressources marines et l'utilisation de l'espace marin entre les loisirs et le tourisme, le transport maritime, l'exploitation minière en haute mer (« offshore »), les énergies renouvelables marines (par exemple, les éoliennes en mer), en plus des activités de pêche commerciale et artisanale. Ceci amène à une diminution rapide des bénéfices provenant des écosystèmes marins dans les endroits subissant ce genre de pressions.

Les politiques publiques sont des constructions sociales qui influent sur les niveaux de tensions et conflits d'usage, qui en retour influent sur la façon dont ces politiques sont établies. Les politiques en lien avec la conservation des écosystèmes sont très souvent conçues de manière trop rigide et ne peuvent pas s'adapter aux évolutions des écosystèmes eux-mêmes ou aux évolutions des pressions qu'ils subissent et leurs répercussions. Elles ne peuvent très vite plus atténuer ou réguler efficacement de telles pressions ou leurs répercussions et ne permettent pas de maintenir les bénéfices fournis par les écosystèmes productifs et en bonne santé.

Des écosystèmes productifs et en bonne santé sont souvent une condition nécessaire à la réalisation du développement durable, à savoir « un développement qui répond aux besoins des générations présentes sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire leurs propres besoins » (Bruntland, 1987). L'un des défis auxquels nous sommes confrontés aujourd'hui est d'assurer la conservation des écosystèmes marins en bonne santé dans un environnement en évolution constante de manière à répondre aux besoins actuels et futurs des hommes et des écosystèmes. L'établissement de zones marines protégées est l'une des options possibles pour favoriser la conservation d'écosystèmes riches et en bonne santé. Cette approche relativement statique peut être complétée par d'autres instruments plus dynamiques visant à atténuer efficacement les forces motrices et les pressions. Le développement durable des activités humaines liées à l'environnement marin pourrait

être favorisé par une « croissance bleue » et une « économie bleue » sur le modèle de la « croissance verte » et de l'« économie verte ». Les « entreprises bleues » ont le potentiel de créer des emplois et de la valeur ajoutée en investissant dans le maintien d'écosystèmes marins en bonne santé ou la restauration des écosystèmes marins dégradés, et ainsi faire progresser le bien-être humain. Le concept d'« économie bleue » va au-delà de la création de valeur par les entreprises (croissance bleue) pour inclure les bénéfices non marchands liés aux loisirs liés aux écosystèmes marins, les bénéfices liés à la transmission d'écosystèmes marins en bonne santé à nos enfants pour leur propre plaisir, ou tout simplement les bénéfices liés au fait de savoir qu'il existe des écosystèmes marins en bonne santé.

Une gamme de méthodes et d'approches scientifiques a été établie et pour aider à évaluer différentes options de gestion possibles et fournir ainsi une base scientifique pour aider les gestionnaires et décideurs publics et privés à prendre des décisions. L'application opérationnelle de ces méthodes et approches aux écosystèmes marins peut se faire en utilisant l'approche des services écosystémiques comme approche commune de structuration des résultats des évaluations des écosystèmes. Un « processus de triage » structurant l'interaction et le dialogue entre les chercheurs et les gestionnaires peut permettre l'établissement d'informations pertinentes pour les décideurs en permettant de considérer les compromis entre les écosystèmes et les besoins humains ou entre différents types de besoins humains.

L'APPROCHE ÉCOSYSTÉMIQUE POUR UNE ÉVALUATION MULTI- SECTORIELLE DES ÉCOSYSTÈMES

L'approche écosystémique s'est imposée au cours des dix dernières années comme une façon harmonisée de conceptualiser les problèmes de gestion autour des écosystèmes naturels. Le Conseil international pour l'exploration de la mer (CIEM) définit l'approche écosystémique pour l'application aux écosystèmes ma-



rins comme « la **gestion intégrée et exhaustive des activités humaines** fondées sur les meilleures connaissances scientifiques disponibles sur l'écosystème et ses dynamiques, afin d'**identifier et d'agir sur les influences qui sont essentielles à la santé des écosystèmes marins**, permettant ainsi une **utilisation durable** des biens et services des écosystèmes et **du maintien de l'intégrité de l'écosystème** » (CIEM, 2005). Auparavant, les approches de gestion étaient segmentées par secteur d'activité économique et les activités humaines en lien avec un même écosystème considérées indépendamment les unes des autres. Ces approches sectorielles se sont cependant montrées inadaptées en lien avec des phénomènes mondiaux et intersectoriels tels que le changement climatique, car elles ne permettent pas d'identifier et d'arbitrer les conflits entre les différentes activités humaines en concurrence pour les ressources ou d'accès aux ressources d'un même écosystème. L'approche écosystémique inclut à la fois les écosystèmes et les activités humaines associées. Cette approche est adaptée à l'évaluation globale et intégrée des écosystèmes pour informer les processus de prise de décision et l'établissement de politiques de gestion et politiques publiques.

L'approche écosystémique a été élaborée par des écologistes soucieux des problèmes environnementaux visibles et importants dans les années 1970 dans le but de conseiller les représentants politiques (Mongruel et Beaumont, 2015). L'approche écosystémique se trouve à la jonction de l'écologie et de l'économie avec des activités humaines fondées sur les « flux d'énergie » au sein des écosystèmes et entre les écosystèmes (thermodynamique). L'approche écosystémique est au cœur de l'économie écologique, branche de l'économie relativement récente, qui conceptualise l'économie comme une composante des écosystèmes, à la différence de points de vue économiques antérieurs qui voient les écosystèmes englobés par l'économie (Biely, 2014). Des scientifiques des sciences naturelles et des économistes ont uni leurs efforts afin d'estimer la « valeur » socio-économique des écosystèmes (Gómez-Baggethun *et al.*, 2010). L'exemple le plus représentatif de cette collaboration est pro-

bablement l'article de 1997 de Costanza *et al.* sur la valeur des services écosystémiques et du capital naturel de la planète (« The value of the world's ecosystem services and natural capital »), récemment actualisé (Costanza *et al.*, 2014). La valeur des écosystèmes marins, y compris les océans et les zones côtières, est estimée à USD 796/ha/an¹ en 1997 et USD 1,368/ha/an en 2011 (Costanza *et al.*, 2014). La valeur socio-économique totale des écosystèmes marins en 2011 a été estimée à USD 49.7 trillions/an, soit environ 2/3 du produit national brut mondial (environ USD 75.2 trillions/an).

Ces études et chiffres au niveau mondial ont eu un rôle et un impact forts dans la sensibilisation des décideurs et des responsables politiques de la nécessité d'inclure les bénéfices non marchands des écosystèmes et d'adopter comme base de décision une perspective plus large que les intérêts financiers à court terme. Ces bénéfices non commerciaux comprennent la valeur que la société donne au fait de savoir que des écosystèmes productifs et en bonne santé existent (valeur d'existence), au fait de léguer des écosystèmes productifs et en bonne santé pour les générations futures (valeur de transmission) ou à la « bonne gestion » des écosystèmes (valeur d'intendance). Tout cela fait partie de ce que les économistes appellent la « **valeur économique totale** », qui englobe à la fois les bénéfices marchands et les bénéfices non marchands. La valeur économique totale reflète la valeur « vraie » des écosystèmes pour la société en lien avec une augmentation du bien-être social et non pas seulement une augmentation des profits financiers.

Ces estimations économiques chiffrées de la valeur économique totale peuvent être obtenues grâce à des méthodes d'évaluation économique spécifiques. Ces méthodes d'évaluation économique tendent cependant à être gourmandes en temps et en efforts et nécessitent des compétences spécialisées. Les estimations à l'échelle mondiale de la valeur économique des écosystèmes regroupent un grand nombre

¹ Ces chiffres tirés de Costanza *et al.* (2014) sont exprimés en USD avec 2007 pour année de référence.



d'éléments très différents en utilisant l'unité monétaire comme unité de mesure commune. Ce regroupement peut cependant limiter leur utilisation pour informer les décisions de gestion, en particulier au niveau plus local où un niveau de détail plus fin est souvent nécessaire. Selon le contexte, d'autres méthodes pourraient être plus adaptées pour une évaluation au niveau local. Par exemple, l'analyse multicritère permet de combiner des données quantitatives et qualitatives, ainsi que des grandeurs monétaires et des grandeurs physiques, tirées de disciplines académiques différentes et de l'expérience « de terrain ». Une telle méthode d'analyse peut faciliter l'intégration de connaissances de sources très diverses, d'autant qu'elle correspond généralement bien aux processus de prise de décision.

LE CADRE DES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES COMME « LANGAGE COMMUN » COMPLET POUR STRUCTURER L'ÉVALUATION DES ÉCOSYSTÈMES

L'approche écosystémique est associée à un cadre opérationnel, le cadre des services écosystémiques. Ce cadre opérationnel a été officialisé et popularisé par la sphère de prise de décision de l'Évaluation des écosystèmes pour le Millénaire (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Ce cadre opérationnel fournit une base non-prescriptive permettant d'établir une évaluation complète de l'écosystème basée sur les services rendus par cet écosystème. Ce cadre divise les services écosystémiques en quatre catégories : les services d'approvisionnement, les services de régulation, les services culturels et les services de soutien. Les **services d'approvisionnement** se rapportent à la fourniture par les écosystèmes de nourriture, d'eau, de fibres, de bois, de carburant, de minéraux, de matériaux de construction et le logement, et de biodiversité et ressources génétiques pour les médicaments ou additifs alimentaires. Les **services de régulation** se réfèrent aux bénéfices découlant de

la régulation des processus tels que les événements climatiques (protection naturelle contre les tempêtes), le stockage et la séquestration de carbone, les variations de débit d'eau (inondations et sécheresses), la purification de l'eau, la pollution et le traitement des déchets, l'érosion des sols et le cycle des éléments nutritifs, la régulation des maladies humaines, et la lutte biologique. Les **services culturels** comprennent les aspects esthétiques, spirituels, éducatifs, récréatifs et sont principalement liés au tourisme ou aux pratiques religieuses. Les **services de soutien** comprennent la production primaire, la formation des sols et cycle des éléments nutritifs. Ces derniers ont tendance à être exclus de l'évaluation économique pour éviter la comptabilisation double de leur valeur économique : une fois en tant que services de soutien et une deuxième fois à travers d'autres types de services écosystémiques.

Ces services écosystémiques fournissent collectivement la base du bien-être humain. Tous ces types de services écosystémiques ont une valeur socio-économique, plus ou moins bien reflétée par les prix du marché et plus ou moins bien prise en compte dans les décisions individuelles et collectives. Un tel cadre opérationnel permet d'identifier les services qui ne sont pas - ou pas suffisamment - valorisés, économiquement ou socialement, ce qui constitue autant d'incitations à leur surexploitation ou toute autre forme de dégradation.

Le changement climatique affecte la nature et le niveau des services fournis par les écosystèmes, alors que le stockage et la séquestration de carbone par les océans constituent en eux-mêmes un service de régulation du climat. Le cadre des services écosystémiques permet d'identifier explicitement des synergies ou antagonismes entre les différents processus qui permettent d'avoir des services écosystémiques. Les mangroves dans un écosystème côtier ont été enlevées dans certains endroits pour permettre l'élevage et la production de crevettes, mais amenant à un niveau réduit de protection contre l'érosion côtière et phénomènes météorologiques extrêmes tels que les vents de tempête et les inondations ou les tsunamis - ce qui

L'opérationnalisation du cadre de service écosystémique et « processus de triage » : l'exemple du projet VALMER (adapté de Mongruel et Beaumont, 2015)

Le cadre analytique de VALMER pour l'évaluation opérationnelle des services des écosystèmes marins et côtiers fournit une structure pour guider les praticiens afin d'établir des évaluations complètes, transparentes et appropriées des services rendus par les écosystèmes marins. Il fournit un ensemble de principes et non pas de règles prescriptives afin de pouvoir être appliqué de manière flexible dans des contextes différents. L'évaluation des services des écosystèmes marins est liée à un contexte spécifique, et varie en fonction des besoins des gestionnaires et des intervenants, des services qui les intéressent, et les ressources disponibles pour l'évaluation, ce qui demande un cadre analytique flexible.

Le tableau 1 présente quelques-uns des services qui ont été identifiés dans le cadre du projet afin de faciliter leur évaluation et leur valorisation en termes économiques. Le tableau 2 montre un exemple de résultats obtenus structurés selon différents services écosystémiques suite à une consultation d'experts.

	Services fournis par les écosystèmes marins	Composantes spécifiques
Les services d'approvisionnement	Sources d'alimentation	Pêche et aquaculture
	Stockage et approvisionnement en eau	Utilisation industrielle de l'eau de mer
	Matériaux biotiques et biocarburants	Secteur des médicaments Les ressources énergétiques Ressources ornementales
Les services de régulation et d'entretien	Purification de l'eau	Traitement des déchets humains
	Régulation de la qualité de l'air	L'absorption de polluants
	La protection du littoral	Défense naturelle
	La régulation du climat	La séquestration du carbone
	La régulation météorologique	<i>Aucun exemple trouvé</i>
	La nourriture des océans	Des éléments nutritifs et des matières organiques
	L'entretien du cycle de vie	Maintien des habitats
	Régulation biologique	<i>Aucun exemple trouvé</i>
Les services culturels	Valeurs symboliques et esthétiques	Patrimoine La valeur esthétique
	Loisirs et tourisme	Activités récréatives (activités non marchandes) La pêche récréative L'industrie du tourisme (activités de marché)
	Les effets cognitifs (éducation et recherche)	

Tableau 1 — Évaluation de l'écosystème marin (adapté de Mongruel et Beaumont, 2015, Tableau 6 pages 17-18).

	Likely use of value in policy decisions	Potential for value to change	Influence of external factors	Feasibility
Saltmarsh creation	High	Medium	Medium	High
Water quality	Low	Low	Medium	High
Fish habitat	High	High	Medium	High
Disturbance	Medium	Low	Low	Medium
Atlantic Array	Medium	High	High	Medium

■ High
 ■ Medium
 ■ Low

Tableau 2 — Les scores dans chaque catégorie (4 dernières colonnes) pour les problèmes de gestion présélectionnés (première colonne) basées sur l'opinion d'experts (Mongruel et Beaumont, 2015, Tableau 8 pages 32).



revient à une augmentation de services d'approvisionnement au prix d'une réduction de services de régulation (Barbier et Cox, 2003).

Le cadre des services écosystémiques est complet, générique et suffisamment flexible pour adaptation à des contextes d'évaluation spécifiques. Les différentes catégories de services écosystémiques peuvent être facilement remplacées par des exemples plus spécifiques au contexte d'étude et le vocabulaire adapté aux différents publics, en particulier ceux qui ne sont pas habitués à travailler avec ce cadre opérationnel (Tableau 1). Il est indispensable de lier l'identification des services écosystémiques aux fonctions des écosystèmes, en s'appuyant sur des connaissances écologiques et en intégrant les dimensions sociales et notamment les variations de bien-être résultant de la modification de la structure ou du fonctionnement des écosystèmes. Le cadre des services écosystémiques peut ainsi fournir une base utile pour les chercheurs et les praticiens afin de construire une évaluation de l'écosystème. Cette évaluation de l'écosystème peut être utilisée dans le cadre de processus de prise de décision ou d'élaboration de politiques publiques pour faire des choix informés entre conservation des écosystèmes et développement économique selon les préférences de la société.

FAIRE L'ÉVALUATION DES ÉCOSYSTÈMES SIGNIFICATIVE, SAILLANT, UTILE ET RÉALISABLE EN UTILISANT UNE APPROCHE ITÉRATIVE PAR ÉTAPES OU « PROCESSUS DE TRIAGE »

Les processus d'évaluation qui impliquent les acteurs ou les décideurs peuvent aider à assurer une évaluation des écosystèmes qui soit techniquement réalisable, utile et pertinente en lien avec les questions, les besoins et les projets des gestionnaires et décideurs publics. La participation des décideurs et des acteurs dans les processus d'évaluation de l'écosystème permet

d'augmenter la probabilité que les résultats de ces évaluations seront effectivement utilisés afin d'informer des processus décisionnels.

Il existe plusieurs modèles de structuration des processus d'évaluation des écosystèmes, tous construits autour des trois mêmes étapes, avec des variations entre les modèles et leur application découlant de l'éventail des choix possibles pour chaque étape. Un « processus de triage » englobant trois étapes successives transparentes a été développé afin d'apporter un soutien pour la gestion opérationnelle des écosystèmes marins dans le cadre du projet Valoriser les services écosystémiques dans la Manche occidentale (« Valuing ecosystem services in the western Channel », VALMER) financé par l'Union européenne (<http://www.valmer.eu>) (Pendleton *et al.*, en cours de publication) :

- i. définir les objectifs et la portée de l'évaluation pour s'assurer qu'elle sera pertinente (étape souvent négligée) ;
- ii. sélectionner les services écosystémiques qui seront évalués sur la base de trois critères (perceptions des tendances actuelles, influence de l'intervention, et influence d'autres facteurs), avec une identification claire des synergies et des antagonismes entre les services écosystémiques fournis ; et
- iii. choisir la méthode d'évaluation (par exemple, mesures de production écologique, impact économique, valeur économique totale...). De par la décomposition d'un écosystème en services écosystémiques, cette troisième étape du « processus de triage » peut être facilitée avec différentes méthodes d'évaluation utilisées pour différents services écosystémiques.

Le « processus de triage » adopte une approche de prise de décision stratégique. Les choix pour chaque étape sont faits après discussions entre les scientifiques, les décideurs, les gestionnaires et/ou les parties prenantes. Sa mise en œuvre peut aider à identifier les méthodologies, l'échelle et la portée pour la co-construction d'une évaluation de l'écosystème qui est jugée pertinente et appropriée.



Le cadre des services écosystémiques peut rentrer dans chacune des trois étapes du « processus de triage ». Un tel « processus de triage » peut être appliqué de manière souple et itérative afin de structurer les processus d'évaluation, nécessitant parfois un facilitateur hautement qualifié pour les discussions. Un tel processus permet d'obtenir des résultats même lorsqu'il existe des lacunes et incertitudes dans les données disponibles, qui peuvent d'ailleurs être réduites par le dialogue avec les parties prenantes. Ce genre de processus contribue à favoriser la collaboration entre les scientifiques de différentes origines disciplinaires et identifier les meilleurs scientifiques à mobiliser en fonction des enjeux. Les écologues auront tendance à avoir un poids plus important dans la conduite de l'évaluation lorsque la question est liée à la fourniture de services écosystémiques par l'écosystème, tandis que les sciences sociales interviendront principalement pour des problèmes liés à la demande en services écosystémiques.

CONCLUSION

Le cadre des services écosystémiques et le « processus de triage » peuvent être combinés pour aider la structuration des évaluations écosystémiques. Cette structuration est adaptée aux besoins des gestionnaires et des décideurs et intègre des types de connaissances très différents ainsi que des connaissances tirées de disciplines très différentes, en correspondance avec les processus de décision des gestionnaires et des décideurs. De telles évaluations écosystémiques participatives et intégrées, fondées sur la connaissance, nécessitent une forte collaboration entre les disciplines académiques, en particulier les

sciences de l'environnement et les sciences sociales, et le renforcement de partenariats solides avec les gestionnaires et les décideurs.

Le cadre des services écosystémiques doit être appliqué à intervalles réguliers afin de pouvoir avoir une idée des évolutions des bénéfices tirés des écosystèmes dans le temps. Des processus itératifs peuvent permettre d'informer des adaptations aux évolutions du contexte, des moteurs et pressions de changement. Les politiques d'atténuation et de régulation des changements agissent sur les moteurs et les pressions de changement, qui ne sont pas l'objet spécifique du cadre des services écosystémiques. L'utilisation du cadre des services écosystémiques et « processus de triage » en combinaison avec le cadre DPSIR basé sur l'identification des facteurs, des pressions, les états, impact, et réponses aux changements et leur interaction peuvent fournir des indications très riches afin d'alimenter les discussions. La répétition à intervalles réguliers des évaluations permet d'identifier des évolutions et changements et peut ainsi fournir une base de connaissances pour informer l'établissement de plans et de politiques pour la conservation marine, ou l'adaptation des pratiques et politiques de gestion actuelles. L'établissement de politiques de gestion et politiques publiques pouvant s'adapter aux leçons tirées des expériences passées est essentiel pour garder des écosystèmes productifs et en bonne santé, avec un fort niveau de bien-être humain, dans un environnement en évolution constante. Ceci devient d'autant plus important que ces évolutions sont liées à des pressions au niveau mondial comme celles induites par le changement climatique.

RÉFÉRENCES

- BARBIER E. and COX M., 2003 – *Does Economic Development Lead to Mangrove Loss ? A Cross Country Analysis*. Contemporary economic policy, 21 (4), 418-432.
- BIELY, K., 2014 – *Environmental And Ecological Economics: Two Approaches in Dealing With Economy-Environment Interrelations and the Example of the Economics of Land Degradation Initiative*. Masters thesis. University of Vienna, <http://ubdata.univie.ac.at/AC11451272>, 272 pages.
- BRUNTLAND, G. (ed), 1987 – *Our Common Future*. Report of the World Commission on Environment and Development. Oxford, UK: Oxford University Press.
- CIEM, 2005 – *Guidance on the Application of the Ecosystem Approach to Management of Human Activities in the European Marine Environment*. ICES Cooperative Research Report no. 273, 22 pages.
- COSTANZA R., D'ARGE R., de GROOT R., FARBER S., GRASSO M., HANNON B., LIMBURG K., NAEEM S., O'NEIL R., PARUELO J., RASKIN R., SUTTON P. and VAN DEN BELT M., 1997 – *The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital*, Nature, 387, 253-260.
- COSTANZA R., de GROOT R., SUTTON P., VAN DER PLOEG S., ANDERSON S.J., KUBISZEWSKI I., FARBER S. and TURNER R.K., 2014 – *Changes in the Global Value of Ecosystem Services*. Global Environmental Change, 26: 152-158.
- GÓMEZ-BAGGETHUN E., DE GROOT R., LOMAS P.L. and MONTES C., 2010 – *The History of Ecosystem Services in Economic Theory and Practice: from Early Notions to Markets and Payment Schemes*. Ecological Economics. 69: 1209-1218.
- MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT, 2005 – *Ecosystems and Human Well-Being*. Geneva, Switzerland: World Health Organization.
- MONGRUEL R. and BEAUMONT N. (coordinators), 2015 – *A Framework for the Operational Assessment of Marine Ecosystem Services*. Contributors: HOOPER T. LEVREL H., SOMERFIELD P., THIÉBAUT É., LANGMEAD O. and CHARLES M., March 2015, www.valmer.eu/wp-content/uploads/2015/03/A-framework-for-the-operational-assessment-of-marine-ecosystem-services.pdf, 80 pages.
- OCÉAN ET CLIMAT, 2015 – *Fiches scientifiques*. www.ocean-climate.org.
- PENDLETON, L., MONGRUEL, R., BEAUMONT, N., HOOPER, T. and CHARLES, M. – *A Triage Approach to Improve the Relevance of Marine Ecosystem Services Assessments*. Marine Ecological Progress Series, forthcoming.



Les coraux et le changement climatique

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 micro-algues 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 27 milliards d'euros 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 Celsius 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, Scléactiniaires), 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 km² (Smith, 1978) à 617 000 km² (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 km².

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-Ca-



lédonie 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.
- Récifs-barrières (« *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 (CaCO_3) par 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 $\text{CaCO}_3/\text{m}^2/\text{an}$ (Barnes & Chalker, 1990) soit des taux de croissance verticaux 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 entraîne 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 CO_2 et non comme un puits (environ 1,5 mmol $\text{CO}_2/\text{m}^2/\text{jour}$; 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 Scléractiniaires (sous-classe des Hexacoralliaires, classe des Anthozoaires, embranchement des Cnidaires). Parmi les Scléractiniaires, environ la moitié des espèces (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 Scléractiniaires (un peu moins de 900 espèces, Michel Pichon, Comm. Pers.) d'établir une symbiose mutualiste avec des micro-algues 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 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 d'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 encroûtantes...) 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 m² 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 de 30 km d'un récif de corail et la subsistance de plus de 500 millions dépend directement de ces 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 de 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 (bénitiers), crustacés (crabes et langoustes), holothuries (aussi appelée trépangs ou concombres de mer)... On estime qu'un récif en bonne santé fournit annuellement entre 5 à 10 tonnes de poissons et d'invertébrés par km².

- 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 m³ 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 150 000 km de côtes qui sont naturellement protégées par les barrières récifales (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 20 000 et 27 000 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 CO₂ (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 CO₂ (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 CO₂ 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-TAMBUITÉ S., 1998 – *Mechanisms of Carbon Acquisition for Endosymbiont Photosynthesis in Anthozoa*. Can J Bot 76: 925-941.
- ALLEMAND D., TAMBUITÉ É., ZOCCOLA D. and TAMBUITÉ 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 CO₂ 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.
- FRANKIGNOULLE M. and GATTUSO J.-P., 1993 – *Air-Sea CO₂ 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 FRANKIGNOULLE 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 CO₂-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 (¹³C and ¹⁵N) 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 CO₂ 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 CO₂-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

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'expliquent 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 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, les régions ZEE ayant la plus forte augmentation du potentiel de captures pour 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 l'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 d'environ 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 d'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/eaf-net). 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

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 vue 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 1980 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. À travers les différents documents publiés sur ce point¹, 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 ou 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 exceptions²), ce qui implique qu'une adaptation³ 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.

¹ cf. Références recommandées

² Notamment les productions aquacoles basées sur la capture des individus depuis les milieux naturels.

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

RISQUES DIRECTS DES CHANGEMENTS GLOBAUX SUR L'AQUACULTURE

La production mondiale de l'aquaculture a atteint 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

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 phénoménologiques (durée des étapes des cycles de vie)
- Les invasions d'espèces et les maladies
- Les changements de régime et des événements extrêmes

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, les produits aquacoles constituent des aliments nutritifs pour les pays développés et en développement (contribution à la sécurité alimentaire), et constituent une source de revenus 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 (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 (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 de 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 climatiques⁴ (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 susceptible d'affecter principalement les organismes calcifiants tels que les bivalves, dont la production atteint 14 millions de tonnes en 2012).

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

Selon plusieurs auteurs, les impacts négatifs 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.

L'Asie représente à elle seule environ 90 % de la production aquacole mondiale en volume avec la Chine pour principal pays producteur. La production de poissons en Chine 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 continent 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 comme le 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 extrême, l'aggravation de l'eutrophisation et la stratification des eaux statiques.

La concentration de l'aquaculture dans certaines zones (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 déjà fait 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 CO₂ dissous dans les eaux marines peut agir plus généralement à 3 niveaux sur les organismes marins :

1. La limitation des carbonates disponibles, affectant essentiellement les organismes calcifiants

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



2. L'augmentation des ions H^+ , ce qui se traduit par diminution du pH, donc l'acidification du milieu proprement dite.
3. L'augmentation de la pression partielle de CO_2 dans les organismes, ce qui se traduirait par une hypercapnie.

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 consommation humaine mais 22,4 % (27,5 milliards d'euros) 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 (comme le 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 les 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 l'ENSO. 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. 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 *lato sensu* 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 prédiction 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'évolution 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 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 sur la notion d'aquaculture durable. Il est à noter

à ce sujet que la situation actuelle n'est pas si mauvaise par rapport à 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 dégradante 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 (comme les salmonidés) et ont donc créé de 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. Des macroalgues sont aussi produites et ont le potentiel d'agir comme des puits de carbone et peuvent être une 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., DEYOUNG 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 CO₂ 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.
- 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,
Alexandre Magnan,
Jean-Pierre Gattuso

Les caractéristiques physiques des petites îles (surface émergée limitée, plaines réduites, forte exposition aux aléas météorologiques et marins) et humaines (forte dépendance vis-à-vis des activités de subsistance et des écosystèmes) expliquent leur vulnérabilité aux changements environnementaux. 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 politique¹, sont confrontées à un ensemble de contraintes inhérentes à leur petite taille (de quelques milliers de km² de surface à moins de 1 km²) et à leur éloignement géographique par rapport aux principaux centres mondiaux d'activité (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 météorologiques et 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 en-

chaînements 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 et 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. On peut donc apprendre de la situation de ces terres du minuscule, au-delà de leurs spécificités.

¹ 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.



Ce texte suit une logique simple, celle de la chaîne des impacts qui part des processus physiques 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 leur lien avec le processus de « mal-développement »², 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^e 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 1990³, 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 pessimiste⁴ (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

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

4 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.

2 Terme qui traduit le caractère non durable des modes de développement actuels.

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).

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 strictement 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 marquée⁵. 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 (Étienne, 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.

⁵ 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).



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 tempêtes 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 corallien⁶ 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 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.*, 2014). 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 CO₂ dissous, plus connue sous le nom d'acidification de l'océan (Gattuso et Hansson, 2011). L'acidification des océans,

⁶ 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.



c'est donc « l'autre problème du CO₂ » (Turley, 2005, Doney *et al.*, 2009). Les océans ont en effet absorbé environ un tiers du CO₂ anthropique depuis la révolution industrielle. Or, l'augmentation du CO₂ dans l'eau de mer diminue son pH, la rendant plus acide. Les projections pour le XXI^e 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.*, 2014, 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 CO₂ atmosphérique de 500 ppm (Hoegh-Guldberg *et al.*, 2014)⁷.

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.) est au cœur des menaces que le changement climatique fait peser sur les littoraux, notamment insulaires (Duvat et Magnan, 2014).

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

⁷ Le seuil de concentration en CO₂ atmosphérique de 400 ppm a été franchi en mai 2013 à la station de mesure de l'observatoire Mauna Loa (Hawaii). À cette même station, il était par exemple de 386 ppm en 2009.

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 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, dégradation 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 climatique. 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 critique⁸ jusqu'en 1970, ce qui signifie 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 (Les Caraïbes, 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 inertes⁹ 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

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

9 Il s'agit des sédiments produits par des générations précédentes de récifs coralliens.



ou des Tuamotu par exemple qui sont constitués d'une plateforme congolomératique, pourraient être colonisés par des colonies coralliennes. Il en va de même des côtes bordées par 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'évapotranspiration¹⁰, 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 engendrés 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 taro¹¹ 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

¹⁰ 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.

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



pourrait remettre en cause l'habitabilité de certaines îles basses. L'accès individuel à l'eau diminuera aussi sous 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 lagons 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 CO₂ 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 socio-économiques 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 km²) et contraste avec la modestie de sa surface émergée (726 km²), 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 km². 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. Les familles se partageaient également l'exploitation d'écluses à poissons



côté océan et de bassins aquacoles implantés dans les zones 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 38 000 habitants en 1963 à plus de 103 000 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 3 125 hab/km². 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 récifs 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 (récifs 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 irresponsable 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 CO₂ 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.
- ÉTIENNE 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., 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*. IDDRI 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 ?* IDDRI Policy Briefs, 09/13.
- MAGNAN A., 2013 – *Éviter la maladaptation au changement climatique*. IDDRI 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 CO₂ Problem*. Open Democracy. 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.



Définir les investissements climatiques prioritaires pour les populations côtières

Adrien Comte,

Linwood Pendleton,

Emmanuelle Quilléro,

Denis Bailly

Depuis les années 1990, le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) utilise des études de vulnérabilité au niveau mondial en vue d'aider à établir des priorités d'investissement et d'action de lutte contre les effets des changements climatiques. Au-delà du GIEC, cette pratique a été largement utilisée pour étudier la vulnérabilité des zones côtières en lien avec divers risques dont ceux associés aux changements climatiques. Ces études au niveau mondial ont été effectuées en lien avec des objectifs très différents, avec des définitions et modèles de vulnérabilité très variés et sont au fil du temps devenues de plus en plus complexes et gourmandes en données, avec un nombre sans cesse croissant d'indicateurs. La diversité des objectifs, conceptualisations et données utilisées a conduit à l'établissement de classements différents et souvent contradictoires de zones prioritaires pour l'action contre les changements climatiques. La complexité de ces études rend difficile l'identification des sources de différences entre ces classements. Il est en particulier difficile d'identifier à quel point ces classements de vulnérabilité sont liés aux changements climatiques par rapport à d'autres facteurs tels que le développement humain ou la capacité d'adaptation des populations aux changements de l'environnement. Si les facteurs derrière ces classements globaux se voulant exhaustifs étaient plus faciles à isoler, les décideurs des actions de régulation du climat pourraient utiliser ces études au niveau mondial comme des études de cadrage et non comme sources de priorités d'investissement climatique définies au niveau mondial. Ces études de cadrage au niveau mondial, afin d'informer utilement les actions de régulation du climat, doivent être simplifiées et harmonisées afin de pouvoir isoler de manière spécifique les moteurs des changements. Ces études de cadrage peuvent aider à cibler les endroits où des études plus fines et complètes au niveau local pourraient être menées afin d'informer de manière pertinente les actions de régulation climatique. Ces études de cadrage devraient être complétées par des études au niveau mondial des coûts des actions de régulation climatique basées sur l'intégration de facteurs techniques, sociaux et économiques.



UN BESOIN D'ÉTUDES AU NIVEAU MONDIAL POUR IDENTIFIER LES IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES POPULATIONS CÔTIÈRES ET LEURS MOYENS DE SUBSISTANCE

Les événements météorologiques extrêmes comme l'ouragan Katrina aux États-Unis en 2005 et le typhon Haiyan (Yolanda) aux Philippines en 2013 qui deviennent de plus en plus fréquents fournissent un aperçu du type de catastrophes qui peuvent accompagner les changements climatiques et de la nécessité d'identifier les zones particulièrement à risque. D'autres changements à plus long terme, comme l'élévation du niveau de la mer, l'acidification des océans et les changements de température de surface de la mer, posent des risques pour des millions de personnes et des infrastructures valant des milliards de dollars (Hoegh-Guldberg *et al.*, 2014; Plateforme Océan et Climat, 2015). L'article 4.4 de la Convention-Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) stipule que les pays développés doivent aider les pays en développement qui sont particulièrement **vulnérables** aux effets néfastes des changements climatiques à assumer les coûts de l'adaptation à ces effets défavorables (Nations Unies, 1992). En outre, les objectifs de développement internationaux tels que les Objectifs du Millénaire pour le Développement (OMD) et les Objectifs de Développement Durable (ODD) ont créé une demande pour des évaluations scientifiques au niveau mondial qui peuvent aider à informer les investissements et actions en lien avec le climat et le développement.

Les études de vulnérabilité au niveau mondial sont devenues très populaires comme outil d'identification des pays en développement particulièrement vulnérables aux effets néfastes des changements climatiques, qui recevront l'aide de pays moins vulnérables, sous la forme de transferts financiers pour les aider à assumer les coûts de l'adaptation à ces effets défavorables. Le groupe d'experts intergouvernemental

sur l'évolution du climat (GIEC) a été l'un des premiers à essayer des études de vulnérabilité au niveau mondial afin d'identifier les endroits les plus vulnérables aux changements climatiques qui ont particulièrement besoin d'aide pour lutter contre ses effets néfastes.

En pratique, cependant, les études de vulnérabilité font face à des difficultés liées à leur application au niveau mondial. Hinkel (2011) fait valoir que l'étude de vulnérabilité a été initialement conçue et est le mieux adaptée pour une application au niveau local et non pas au niveau mondial. Les études de vulnérabilité appliquées au niveau mondial continuent à être soumises à beaucoup de débats entre scientifiques. Il n'y a pas de consensus sur une approche pour effectuer des études de vulnérabilité au niveau mondial basées sur des indicateurs de vulnérabilité. Ce manque de consensus a abouti à une diversité d'études, même pour celles s'intéressant spécifiquement aux zones marines et côtières, et une dérive vers une inclusion de toujours plus de données afin d'avoir des études de plus en plus « globales » au cours du temps. Alors que toutes les études de vulnérabilité au niveau mondial contiennent des informations utiles, les hypothèses utilisées et les scores globaux produits par de telles études pour chaque pays afin d'établir un ordre de priorité rendent difficiles la compréhension de la vulnérabilité climatique seule, et donc l'identification d'opportunités d'investissement lié au climat.

Les défis auxquels se heurte l'application des études de vulnérabilité au niveau mondial pour une utilisation dans le ciblage des investissements liés au climat comprennent :

- un manque de conceptualisation harmonisée de la vulnérabilité et de concepts associés, en particulier de ce qui constitue un risque, un impact et une capacité d'adaptation,
- ceci ajouté à un nombre toujours croissant de variables utilisées pour ces études, dont beaucoup ne sont pas disponibles de façon fiable à l'échelle mondiale, entraînant une augmentation de la complexité de l'analyse et la combinaison de métriques très diffé-

rentes, avec des impacts climatiques sur les populations difficiles à isoler d'autres facteurs,

- un manque de considération des coûts de l'action, en plus de la vulnérabilité et des impacts des changements climatiques.

Pour être utile aux décideurs qui se concentrent sur les questions liées aux changements climatiques, les études actuelles au niveau mondial ne devraient pas être conçues et appliquées comme des études exhaustives mais plutôt comme des études de risques qui se concentrent de manière explicite sur les voies d'impact des changements climatiques sur les populations humaines, sans étendre l'analyse pour déterminer la vulnérabilité spécifique à un contexte donné. Ces études de risque au niveau mondial pourraient ensuite être complétées par des études plus fines au niveau local et des études des coûts des actions afin de fournir les informations nécessaires et pertinentes à l'action climatique et l'investissement du niveau mondial au niveau local (un exemple au niveau local est l'analyse coût-efficacité effectuée par Ramirez *et al.*, en cours de publication).

DES CONCEPTUALISATIONS TRÈS DIFFÉRENTES DE LA VULNÉRABILITÉ

La vulnérabilité est un concept qui est intuitivement simple et compréhensible. La vulnérabilité

peut incorporer des impacts physiques, écologiques et sur les populations humaines des changements climatiques. Le concept de vulnérabilité est apparu dans le cadre de la gestion des catastrophes au niveau local (par exemple, Weichselgartner, 2001) et a évolué au fil du temps pour être utilisé par la recherche interdisciplinaire en relation avec un certain nombre de sujets, dont les changements climatiques (Turner *et al.*, 2003). Le concept de vulnérabilité n'a cependant pas de définition harmonisée ni de mesure établie pour des applications pratiques (Adger, 2006), ce qui rend difficile le choix entre plusieurs façons de conceptualiser la vulnérabilité et la compréhension des différences de conceptualisation.

La définition changeante de la vulnérabilité peut être illustrée par l'évolution du cadre conceptuel utilisé par le GIEC pour les études de vulnérabilité au niveau mondial entre 2001 et 2014 (figure 1a, b). Dans le troisième rapport d'évaluation du GIEC, la vulnérabilité est définie comme une fonction de la nature, l'ampleur et du rythme des changements climatiques auxquels un système est exposé, de sa sensibilité et de sa capacité d'adaptation (Schneider et Sarukhan, 2001, p.90, Figure 1a). Dans le cinquième rapport d'évaluation, la définition de la vulnérabilité a évolué pour devenir la propension ou la prédisposition à être affecté négativement ; la vulnérabilité englobe une variété de concepts et éléments y compris la sensibilité ou de la sus-

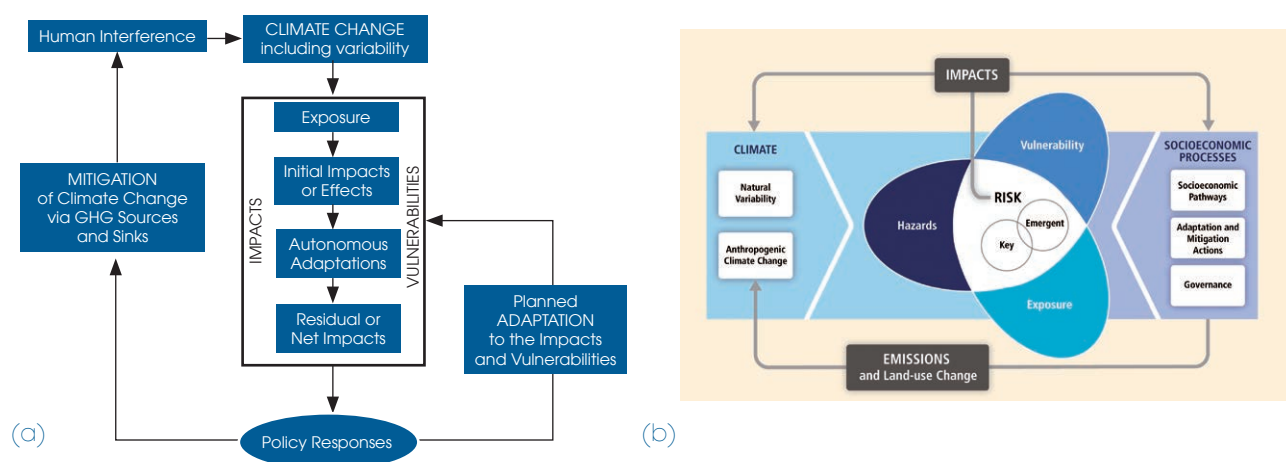


Fig. 1 — Cadres conceptuels pour les études de vulnérabilité utilisés par le GIEC en 2001 et 2014. Sources : (a) Lieux d'adaptation en lien avec la problématique des changements climatiques (Schneider et Sarukhan, 2001, p.90) (b) Schéma de l'interaction entre le système physique, l'exposition (enjeux) et la vulnérabilité producing sources de risque (Oppenheimer *et al.*, 2014, p.1046).

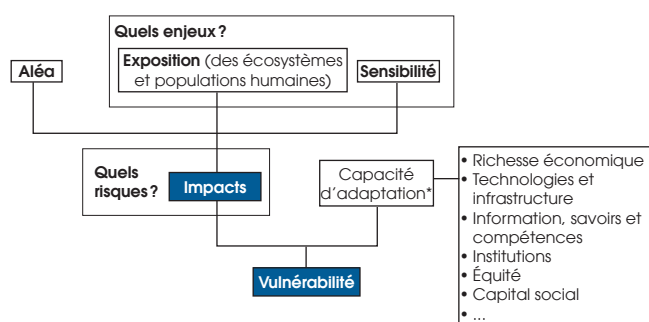


Fig.2 — Facteurs qui contribuent à la vulnérabilité et impacts potentiels (adapté de Schneider et Sarukhan, 2001 et Ionescu *et al.*, 2009). Non gras : facteurs (descriptifs) contribuant à la vulnérabilité ; **gras** : résultats prédictifs et spéculatifs ; * La capacité d'adaptation a tendance à être plus spécifique à un contexte donné que les autres facteurs.

ceptibilité de nuire et le manque de capacité à faire face et s'adapter (Oppenheimer *et al.*, 2014, p.1046, Figure 1b). Le concept de vulnérabilité est également appliqué en référence à des aspects très variés dans les rapports du GIEC (vulnérabilité des écosystèmes, des populations humaines, de l'économie), ajoutant aux confusions possibles sur le message véhiculé.

Même si les conceptualisations pour la définition de la vulnérabilité varient, la base de la conceptualisation de la vulnérabilité reste relativement inchangée et est fondée sur des facteurs d'aléa, d'enjeux

(exposition et sensibilité), de capacité d'adaptation et de vulnérabilité (Figure 2, voir Schneider et Sarukhan, 2001 et Ionescu *et al.*, 2009 pour plus d'information). Une différence clé, cependant, entre les cadres utilisés est la conceptualisation de la relation entre la vulnérabilité et les autres facteurs, et les influences réciproques entre ces concepts pour l'adaptation, l'atténuation, et la gouvernance. Cette souplesse dans le cadre conceptuel rend le concept de vulnérabilité bien adapté à l'analyse au niveau local, où plus d'informations spécifiques au contexte sont disponibles (Hinkel, 2011). Cette même souplesse rend cependant le concept plus difficile à utiliser d'une manière cohérente au niveau mondial, ce qui nécessiterait plutôt une structure plus rigide constituant un guide comparatif à l'investissement en fonction de différents types de risques et contextes sociaux.

Il existe un certain nombre d'études au niveau mondial utilisant des indicateurs et appliquée aux ressources marines menées par des universitaires (par exemple Allison *et al.*, 2009 ; Barange *et al.*, 2014 ; Cooley *et al.*, 2012, Hughes *et al.*, 2012 ; Halpern *et al.*, 2012) et des ONG (Burke *et al.*, 2011 ; Beck, 2014 ; Harrould-Kolieb *et al.*, 2009, Huelsenbeck 2012) visant à évaluer la santé des océans et les risques spécifiques auxquels sont confrontés les récifs coralliens, les coquillages et les populations humaines qui en dépendent. Chaque étude s'est réappropriée et a redéfini les concepts de base

Rang	Récifs à risque - revisité (Burke <i>et al.</i> , 2011)	Côtes à risque (Beck, 2014)	Allison <i>et al.</i> , 2009	Indice de la santé de l'océan (Halpern <i>et al.</i> , 2014)	Oceana (Harrould-Kolieb <i>et al.</i> , 2009)	Oceana (Huelsenbeck, 2012)
1	Comores	Antigua-et-Barbuda	Angola	Saint-Vincent-et-Grenadines	Japon	Comores
2	Fiji	Tonga	RD Congo	Haïti	France	Togo
3	Grenade	Saint-Kitts-et-Nevis	Fédération Russe	Côte d'Ivoire	Royaume-Uni	Îles Cook
4	Haïti	Vanuatu	Mauritanie	Sierra Leone	Pays-Bas	Kiribati
5	Indonésie	Fiji	Sénégal	Nicaragua	Australie	Erythrée
6	Kiribati	Brunei Darussalam	Mali	Libye	Nouvelle Zélande	Mozambique
7	Philippines	Bangladesh	Sierra Leone	RD Congo	Philippines	Madagascar
8	Tanzanie	Philippines	Mozambique	Timor Oriental	États-Unis	Pakistan
9	Vanuatu	Seychelles	Niger	Dominique	Malaisie	Sierra Leone
10		Kiribati	Pérou	Libéria	Indonésie	Thaïlande

Tableau1 — Des exemples de classements pour les communautés côtières vulnérables aux changements climatiques. En gras, les pays qui ne se retrouvent dans les 10 premiers pays vulnérables que pour un seul des rapports.

au cœur de la vulnérabilité de manière différente. Même lorsque les définitions sont communes, les indicateurs et les ensembles de données correspondantes utilisées pour mesurer l'aléa, l'exposition, la sensibilité, la capacité d'adaptation ainsi que les formules utilisées pour calculer la vulnérabilité varient d'une étude à l'autre, la plupart du temps par rapport aux données disponibles et l'orientation spécifique de ces études.

Le manque de consensus autour de la définition et de la façon de mesurer la vulnérabilité, l'utilisation ambiguë du concept pour désigner qui ou ce qui est vulnérable aux changements, ont en partie entravé la mise en place d'études au niveau mondial permettant l'établissement de priorités claires pour l'investissement et l'action en lien avec les changements climatiques.

QUE RÉVÈLENT LES ÉTUDES DE VULNÉRABILITÉ AU NIVEAU MONDIAL : COMPRENDRE LES CLASSEMENTS CONTRADICTOIRES DES POPULATIONS HUMAINES CÔTIÈRES VULNÉRABLES AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Les différences de conceptualisation et d'indicateurs utilisés dans les études au niveau mondial sur les risques côtiers et marins ont conduit à des classements très différents des pays en fonction du niveau de risque. Le tableau 1 montre une grande variation entre différentes études des 10 pays identifiés comme les plus vulnérables ou avec des océans en mauvaise santé. Parmi ceux-ci, 35 ne figurent dans les 10 pays les vulnérables que pour un seul des rapports, montrant le manque de consensus entre les classements.

Dans un effort pour être plus complet et pour refléter les différentes capacités des populations côtières pour faire face aux changements climatiques, les applications d'études de vulnérabilité au niveau mondial basées sur des indicateurs comprennent des éléments d'adaptation et de capacité d'adaptation. Toutes ces études

sauf une comprennent des mesures de capacité (l'exception étant Harrould-Kolieb *et al.*, 2009). L'utilisation de mesures de capacité dans ces études a deux conséquences. Premièrement, les pays développés qui font potentiellement face à des impacts des changements climatiques forts ne sont jamais classés comme vulnérables, même si les besoins en investissements pour lutter contre les changements climatiques sont extrêmement importants. Deuxièmement, il devient difficile de savoir, en se basant seulement sur les scores de vulnérabilité globale d'un pays, si un score élevé est dû à une vulnérabilité causée par les changements climatiques ou une vulnérabilité intrinsèque liée à des facteurs démographiques, politiques ou sociaux. Certains travaux empiriques suggèrent qu'il est possible d'identifier au niveau mondial des indicateurs de capacité d'adaptation (Brooks *et al.*, 2005) mais ces indicateurs sont jusqu'à présent plus liés à des problématiques très générales de développement (par exemple le niveau d'éducation et de pauvreté), mais pas nécessairement de la capacité d'adaptation aux impacts sectoriels des changements climatiques. (Hughes *et al.*, 2012).

UNE APPROCHE À 2 NIVEAUX POUR UNE ANALYSE QUI PERMETTE D'INFORMER L'INVESTISSEMENT ET L'ACTION DE LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Pour éviter les problèmes décrits ci-dessus et aller vers une approche plus transparente pour effectuer des études basées sur des indicateurs au niveau mondial et informer l'action de lutte contre les changements climatiques, il y a besoin de simplifier et d'harmoniser les analyses pour comprendre les impacts des changements climatiques et environnementaux au niveau mondial sur les populations humaines côtières.

Plus précisément, nous proposons une approche à 2 niveaux pour aider à classer les études existantes afin de mieux identifier les éléments communs et servir de guide pour obtenir une analyse plus pertinente au niveau mondial (Figure 3) :

1. ÉTUDES DE RISQUE AU NIVEAU MONDIAL (premier niveau): Au niveau mondial, il faudrait maintenant concentrer les efforts sur la **simplification et la standardisation d'études de cadrage** pour lesquelles il existe des données de bonne qualité au niveau mondial. Ces approches plus simples devraient permettre de relier directement et sans ambiguïté les risques et les impacts aux changements climatiques, et ne pas inclure de capacité d'adaptation, de manière à clairement distinguer les questions de développement des menaces liées aux changements climatiques. L'accent sur l'analyse de risques au niveau mondial peut permettre d'identifier les pays où:

- l'action pour le climat peut être justifiée (atténuation, adaptation ou autre action de lutte contre le changement climatique),
- des études de vulnérabilité complémentaires plus détaillées peuvent fournir des informations cruciales pour établir des actions politiques appropriées,
- les dispositifs de surveillance et la recherche peuvent apporter des résultats pertinents pour la société.

Les scores utilisés pour classer les pays par ordre d'importance de risque pourraient être individualisés par risque ou être agrégés en un seul score par pays, en particulier pour les pays présentant des risques forts. Ces études de cadrage basées sur les risques ont pour vocation de guider l'élaboration d'analyses au niveau local plus poussées intégrant beaucoup plus de données, mais n'ont pas pour vocation de remplacer ces analyses au niveau local. Idéalement, ces études de cadrage sont accompagnées par une analyse à l'échelle mondiale des coûts techniques, économiques et sociaux des actions pour le climat afin de pouvoir les comparer aux bénéfices potentiels de réduction des risques.

2. ÉTUDES AU NIVEAU LOCAL (deuxième niveau): Les études de cadrage au niveau global permettent d'identifier les endroits où des **études au niveau local plus poussées et détaillées** peuvent aider à identifier des actions concrètes d'investissement et la mesure dans laquelle ces endroits sont vulnérables aux changements cli-

matiques. Au niveau local, une analyse plus fine et intégrant plus de données peut être utilisée afin de mieux comprendre les impacts et comportements au niveau local en lien avec des changements locaux et mondiaux. Ces études comprennent, mais sans s'y limiter, les études de vulnérabilité, et peuvent contribuer à identifier les facteurs environnementaux et écologiques clés qui ont un impact sur les populations humaines les plus touchées par les changements climatiques. Il existe déjà un certain nombre d'études pertinentes au niveau local qui ont été conduites avec succès dans les pays développés et les pays en voie de développement qui pourraient être mieux mises à profit pour comprendre les risques et les actions associés aux changements climatiques (par exemple Cinner *et al.*, 2012; Ekstrom *et al.*, 2015; Yusuf et Francisco, 2010; Arias *et al.*, en cours de publication; Sajise *et al.*, en cours de publication).

Cette approche à deux niveaux est une façon pragmatique de prendre parti des données existantes, approches et méthodes scientifiques déjà établies afin d'entreprendre des études scientifiques permettant de guider l'action de lutte contre les changements climatiques et ai-

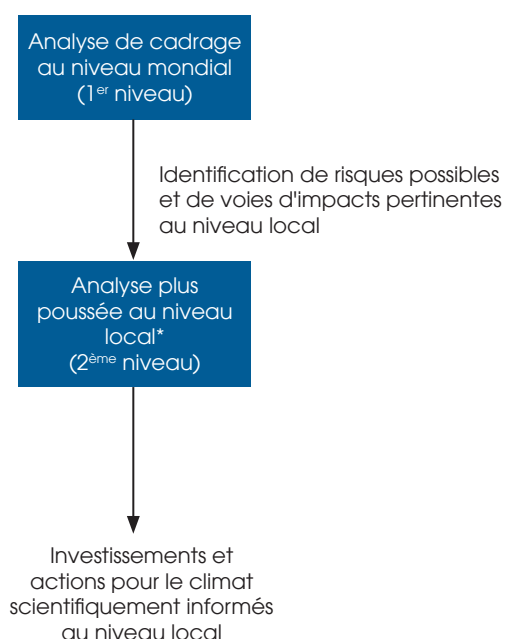


Fig.3 — Stratégie à deux niveaux pour l'analyse scientifique et l'action informée (*comprend l'étude et le suivi de la vulnérabilité).

der à prioriser les efforts là où les besoins sont les plus pressants. Cette approche à deux niveaux contribue également à fournir un cadre transparent au niveau mondial, tout en gardant la flexibilité locale nécessaire, pour des investissements et actions en lien avec les changements climatiques du niveau global vers le niveau local. Tout comme les études de vulnérabilité, cette approche combine sciences naturelles et sociales afin de mieux comprendre les impacts potentiels des changements climatiques sur les populations humaines. Elle le fait en revanche en s'appuyant sur un choix d'échelle d'étude qui permette une meilleure mise en relation des différents concepts tirés des sciences sociales aux données disponibles. Le premier niveau permet d'établir des recommandations pertinentes en vue d'informer l'établissement de politiques publiques à l'échelle mondiale tandis que le deuxième niveau permet de garder la flexibilité nécessaire en lien avec l'évolution constante des contextes spatiaux et humains.

Une telle approche à 2 niveaux nécessite tout de même des améliorations de la qualité et la quantité des données disponibles. Bien que la qualité et quantité de données concernant le climat, l'océanographie, les coraux et la pêche s'améliorent, les données pertinentes pour les sciences sociales et sciences humaines sont à la traîne, en particulier les données sur les pêcheries locales, le tourisme côtier et marin et les infrastructures.

CONCLUSION

Le premier niveau de l'approche à deux niveaux pourrait être utile pour identifier les pays qui ont le plus de risque d'être impactés directement ou indirectement par les changements climatiques. Appliqué seulement aux pays bénéficiaires de transferts internationaux (pays en développement conformément à l'article 4.4 de la CCNUCC), il pourrait permettre d'identifier les endroits où l'aide internationale pourrait être la plus utile pour couvrir les coûts de l'adaptation en lien avec la CCNUCC. Le deuxième niveau pourrait être utilisé par les pays développés comme ceux en développement afin de permettre des investissements plus adaptés au sein des pays eux-mêmes et non pas juste dans le cadre de transferts internationaux.

Ce deuxième niveau permet d'envisager différents types d'action, y compris celles en lien avec les changements climatiques mais pas exclusivement, et différentes options d'investissement comme dans l'atténuation, l'adaptation et la recherche.

En plus des deux niveaux proposés, une analyse des coûts des actions incluant des facteurs techniques, sociaux et économiques à l'échelle mondiale devrait être menée en parallèle. La combinaison de l'approche à 2 niveaux et d'une telle analyse des coûts devrait fournir des informations nécessaires pour établir des investissements et des actions de lutte contre les changements climatiques.

RÉFÉRENCES

- ADGER W.N., 2006 – *Vulnerability*. *Global Environmental Change*, 16 (3): 268-281.
- ALLISON E.H., PERRY A.L., BADJECK M.-C., ADGER W. N., BROWN K., CONWAY D., HALLS A.S., PILLING G.M., REYNOLDS J.D., ANDREW N.L. and DULVY N.K., 2009 – *Vulnerability of National Economies to the Impacts of Climate Change on Fisheries*. *Fish and Fisheries*, 10 (2): 173-196.
- ARIAS J.K.B, PEREZ M.L., SAJISE A.J.U, RAMIREZ P.J.B., PURNOMO A.H., DIPASUPIL S.R., REGONIEL P.A., NGUYEN K.A.T. and ZAMORA G.J. – *Household Vulnerability and Impacts of Climate Hazards in Coastal Communities in Southeast Asia*. EEPSEA publication, en cours de publication.
- BARANGE M., MERINO G., BLANCHARD J.L., SCHOLTENS J., HARLE J., ALLISON E.H., ALLEN J.I., HOLT J. and JENNINGS S., 2014 – *Impacts of Climate Change on Marine Ecosystem Production in Societies Dependent on Fisheries*. *Nature Climate Change*, 4: 211-216.
- BECK M. W. (ed.), 2014 – *Coasts at Risk: An Assessment of Coastal Risks and the Role of Environmental Solutions*. A joint publication of United Nations University - Institute for Environment and Human Security (UNU-EHS), The Nature Conservancy (TNC) and the Coastal Resources Center (CRC) at the University of Rhode Island Graduate School of Oceanography, http://www.crc.uri.edu/download/SUC09_CoastsatRisk.pdf, 85 pages.
- BROOKS N., ADGER W.N. and KELLY P.M., 2005 – *The Determinants of Vulnerability and Adaptive Capacity at the National Level and the Implications for Adaptation*. *Global Environmental Change*, 15 (2): 151 – 163.
- BURKE L., REYTAR K., SPALDING M. and PERRY A., 2011 – *Reefs at Risk Revisited*. World Resources Institute (WRI), 130 pages.
- CINNER J. E., McCLANAHAN T. R., GRAHAM N. A. J., DAW T. M., MAINA J., STEAD S. M., WAMUKOTA A., BROWN K. and BODIN Ö., 2012 – *Vulnerability of Coastal Communities to Key Impacts of Climate Change on Coral Reef Fisheries*. *Global Environmental Change*, 22 (1), 12 – 20.
- COOLEY S.R, LUCEY N., KITE-POWELL H. and DONEY S.C., 2012 – *Nutrition and Income from Molluscs Today Imply Vulnerability to Ocean Acidification Tomorrow*. *Fish and Fisheries*, 13 (2), 182 – 215.
- EKSTROM J. A., SUATONI L., COOLEY S. R., PENDLETON L. H., WALDBUSSER G. G., CINNER J. E., RITTER J., LANGDON C., VAN HOOIDONK R., GLEDHILL D., WELLMAN K., BECK M.W., BRANDER L.M., RITTSCHOF D., DOHERTY C., EDWARDS P.E.T. and PORTELA R., 2015 – *Vulnerability and Adaptation of us Shellfisheries to Ocean Acidification*. *Nature Publishing Group*, 5 (3), 207 – 214.
- HALPERN B.S., LONGO C., HARDY D., MCLEOD K.L., SAMHOURI J.F., KATONA S.K., KLEISNER K., LESTER S.E., O'LEARY J., RANELLETTI M., ROSENBERG A.A., SCARBOROUGH C., SELIG E.R., BEST B.D., BRUMBAUGH D.R., CHAPIN F.S., CROWDER L.B., DALY K.L., DONEY S.C., ELFES C., FOGARTY M.J., GAINES S.D., JACOBSEN K.I., KARRER L.B., LESLIE H.M., NEELEY E., PAULY D., POLASKY S., RIS B., ST MARTIN K., STONE G.S., SUMAILA U.R. and ZELLER D., 2012 – *An Index to Assess the Health and Benefits of the Global Ocean*. *Nature*, 488: 615-620.
- HARROULD-KOLIEB E., HIRSHFIELD M. and BROSIUS A., 2009 – *Major Emitters Among Hardest Hit by Ocean Acidification*. *Oceana*.
- HINKEL J., 2011 – “*Indicators of vulnerability and adaptive capacity*”: *Towards a clarification of the science – policy interface*. *Global Environmental Change*, 21 (1): 198 – 208.
- HOEGH-GULDBERG O., CAI R., POLOCZANSKA E.S., BREWER P.G., SUNDBY S., HILMI K., FABRY V.J. and JUNG S., 2014 – *The Ocean*. 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 (FIELD C.B., BARROS V.R., DOKKEN D.J., MACH K.J., MASTRANDREA M.D., BILIR T.E., CHATTERJEE M., EBI K.L., ESTRADA Y.O., GENOVA R.C., GIRMA B., KISSEL E.S., LEVY A.N., MACCRACKEN S., MASTRANDREA P.R. and WHITE L.L. (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1655-1731.
- HUELSENBECK M., 2012 – *Ocean-Based Food Security Threatened in a High CO₂ World*. *Oceana*, http://oceanacidification.co.uk/pdf/1acid_final_091812-pdf.pdf, 16 pages.
- HUGHES S., YAU A., MAX L., PETROVIC N., DAVENPORT F., MARSHALL M., MCCLANAHAN T.R., ALLISON E.H. and CINNER J.E., 2012 – *A Framework to Assess National Level Vulnerability from The Perspective of Food Security: the Case of Coral Reef Fisheries*. *Environmental Science & Policy*, 23: 95 – 108.

- IONESCU C., KLEIN R.J.T., HINKEL J., KAVI KUMAR K.S. and KLEIN R., 2009 – *Towards a Formal Framework of Vulnerability to Climate Change*. Environmental Modeling & Assessment, 14: 1-16.
- NATIONS UNIES, 1992 – *The United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)*.
- OCÉAN ET CLIMAT, 2015 – *Fiches scientifiques*. www.ocean-climate.org.
- OPPENHEIMER M., CAMPOS M., WARREN R., BIRKMANN J., LUBER G., O'NEILL B. and TAKAHASHI K., 2014 – *Emergent risks and key vulnerabilities*. 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 (FIELD C.B., BARROS V.R., DOKKEN D.J., MACH K.J., MASTRANDREA M.D., BILIR T.E., CHATTERJEE M., EBI K.L., ESTRADA Y.O., GENOVA R.C., GIRMA B., KISSEL E.S., LEVY A.N., MACCRACKEN S., MASTRANDREA P.R., and WHITE L.L. (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1039-1099.
- RAMIREZ P.J.B., PEREZ M.L., ARIAS J.K.B., SAJISE A.J.U., PURNOMO A.H., DIPASUPIL S.R., REGONIEL P.A., NGUYEN K.A.T. and ZAMORA G.J., in press – *Cost Effectiveness Analysis of Public Adaptation Options in Coastal Communities in Southeast Asia*. EEPSEA publication.
- SAJISE A.J.U., PEREZ M.L., ARIAS J.K.B., RAMIREZ P.J.B., PURNOMO A.H., DIPASUPIL S.R., REGONIEL P.A., NGUYEN K.A.T. and ZAMORA G.J. – *Determinants of Autonomous Adaptive Behavior in Coastal Communities in Southeast Asia*. EEPSEA publication, en cours de publication.
- SCHNEIDER S. and SARUKHAN J., 2001 – *Overview of Impacts, Adaptation, and Vulnerability to Climate Change*. In *Climate Change 2001: Working Group II: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. www.grida.no/publications/other/ipcc_tar/, 30 pages.
- TURNER B. L. II, KASPERSON R.E., MATSON P.A., MCCARTHY J.J., CORELL R.W., CHRISTENSEN L., ECKLEY N., KASPERSON J.X., LUERS A., Martello M.L., POLSKY C., PULSIPHER A. and SCHILLER A., 2003 – *A framework for vulnerability analysis in sustainability science*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 100 (14): 8074 – 8079.
- WEICHSELGARTNER J., 2001 – *Disaster Mitigation: the Concept of Vulnerability Revisited*. Disaster Prevention and Management: An International Journal, 10 (2): 85-95.
- YUSUF A.A. and FRANCISCO H., 2010 – *Hotspots! Mapping Climate Change Vulnerability in Southeast Asia*. Economy and Environment Program for Southeast Asia. http://www.eepsea.org/pub/book/Coffee_Book_Final_29Sep10.pdf.



Modes de vie et de penser l'événement

Guigone Camus

à Tabiteuea : un barrage contre le Pacifique ?

Les mythologies de l'archipel de Kiribati nous apprennent que le monde tire ses origines de l'ouverture d'une roche suivie du mélange d'une matière sèche avec une matière humide, puis de l'effervescence créatrice d'une foule d'ancêtres. La réalité scientifique occidentale nous apprend que, dans moins de 300 ans, ces atolls de Micronésie orientale disparaîtront sous l'effet de la montée des eaux entraînée par le réchauffement climatique. Quant au terrain ethnographique, il nous apprend que la force de cette société océanienne, installée depuis plus de mille ans au cœur du Pacifique, consiste à renvoyer à son intelligence philosophique l'interprétation du réel climatique contemporain. Le changement climatique révèle cette réalité du duel entre, d'un côté, la survie d'un supposé progrès moderne qui continue de mettre en danger la planète et, de l'autre, la survie de modes de vivre et de se penser Homme dans une nature respectée. Ces deux enjeux seront mis sur la table des négociations lors de la prochaine Conférence sur le Climat de Paris. Est-ce si utopique d'attendre des Parties qu'elles décident de sacrifier à la Nature ?

DU MYTHE DE LA CRÉATION À LA RÉALITÉ DE LA DESTRUCTION

Imaginez 33 confettis de corail disséminés de part et d'autre de l'équateur dans une zone du Pacifique vaste comme l'Union européenne. Cela vous donnera peut-être une première idée des îles Kiribati. Ou bien peut-être préférerez-vous imaginer qu'au Commencement était une Roche Close semi sphérique sur le sommet de laquelle déambulait un ancêtre Araignée du nom de Naareau, doué de forces magiques considé-

rables. Après un temps indéfini passé à réfléchir au rythme d'allées et venues vers les quatre points cardinaux, il entreprit de briser cette matrice du monde afin d'en extraire deux principes vitaux : le Sable et l'Humide. Du mélange de ces deux matières dans le creux de sa main gauche émergea alors Naareau-le-Second, investi de toutes les connaissances et de toutes les sciences. Ce dernier anima des groupes d'esprits des mondes céleste, marin, terrestre et temporel, qui allaient le seconder dans l'élaboration du monde. L'ancêtre Murène se dressa de tout son long pour soulever et stabiliser le Ciel, l'ancêtre Aïeul sacrifia ses yeux

pour donner naissance au Soleil et à la Lune, ses membres pour qu'ils apportent les Saisons, ses chairs pour qu'elles se dispersent dans le Ciel comme autant d'Étoiles, et ses intestins pour qu'ils emplissent Terre et Mer de toutes leurs espèces vivantes. Puis Naareau-le-Second créa les atolls, qu'il peupla d'une cohorte d'ancêtres perchés jusqu'alors sur un arbre mythique. Ainsi apparurent les ancêtres des actuels occupants de Kiribati.

La métaphysique des insulaires, véhiculée par les récits oraux mais aussi, depuis l'introduction de l'écriture par les missionnaires, par de précieux cahiers dans lesquels ils consignèrent leurs mythologies et leurs généalogies, requiert quelques prédispositions à la rêverie. Qui consent à se pencher sur leur conception de ce petit monde morcelé et perdu dans l'immensité océanique, plonge dans un état de songe auquel il est difficile de s'arracher. Il est toutefois une réalité qui nous en tire. Elle se nomme « changement climatique ». Tel un présage de ce que la planète pourrait subir dans une poignée de décennies, les 800 km² et quelques de terres émergées des atolls coralliens de l'archipel de Kiribati portent déjà les stigmates de l'irresponsabilité de l'homme post-industriel. Érosion, tempêtes, sécheresses, assèchement des lentilles d'eau douce, appauvrissement faunistique et floristique des eaux lagunaires et océaniques, vulnérabilisation des ressources terrestres... Autant de traces résistant à l'interprétation poétique de l'état du monde qu'offre la mythologie de ces îles.

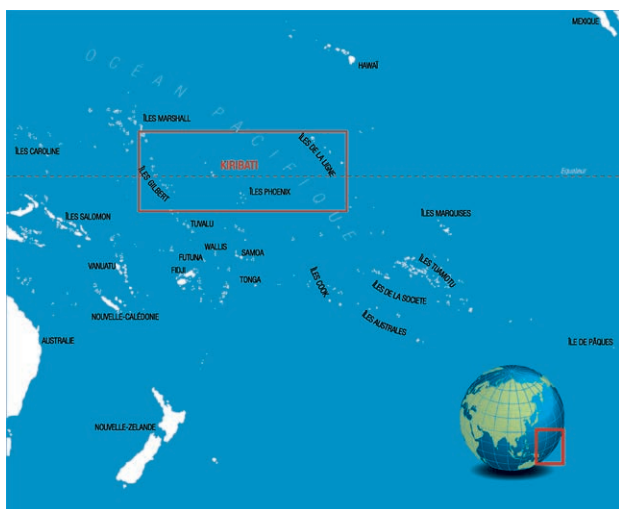


Fig. 1 — La République de Kiribati au sein du Pacifique.
© Fondation culturelle Musée Barbier-Mueller, Carte Helder Da Silva.



Fig. 2 — Tabiteuea appartient à l'archipel des îles Gilbert, un des trois archipels constitutifs de la République de Kiribati (avec les îles Phoenix et les îles de la Ligne).
© Fondation culturelle Musée Barbier-Mueller, Carte Helder Da Silva.

LA RÉPUBLIQUE INSULAIRE DE KIRIBATI, QUELQUES REPÈRES

Issue de la réunion de trois archipels océaniques¹, la République de Kiribati rassemble aujourd'hui un peu plus de 100 000 personnes, pour la majorité établies dans les anciennes îles Gilbert depuis plus d'un millénaire. Indépendante de l'Empire britannique depuis 1979, elle est dirigée par un président et représentée par un parlement. À l'échelle de l'île, le *Island Council* exerce un fort pouvoir discrétionnaire et, à l'échelle du village (en particulier dans le sud des îles Gilbert), les affaires communautaires font toujours l'objet de débats collectifs au sein de la maison de réunion, la *maneaba*.

¹ L'archipel de Kiribati est constitué de 31 atolls coralliens plats et de deux atolls exhaussés (Banaba et Kiritimati) répartis sur une superficie maritime de 5 M km², dont 3,5 M km² de ZEE.

Doté d'un faible PIB majoritairement issu de la vente de poisson congelé, de coprah et de licences de pêche, classé PEID et PMA², Kiribati dépend des aides internationales pour ce qui relève de son développement ; il en est de même en matière de stratégies de lutte contre le changement climatique.

DE LA FRAGILITÉ D'UNE ÎLE

Sur les 33 atolls de l'archipel, 21 sont occupés et tous, sauf les atolls exhaussés de Banaba et de Kiritimati, affleurent à peine à la surface de l'eau. Tabiteuea, le plus grand, étire ses 70 km de long tel un serpent de corail sous l'équateur. Hormis une route, une courte piste d'atterrissage et un hôpital peu fonctionnel, l'atoll est dépourvu d'infrastructures. Ses quelque 5000 habitants se répartissent sur une superficie d'environ 40 km², traversée du nord au sud par une route de sable qui s'étend parfois dans le lagon afin de relier certains motu³.

Comme dans toutes les îles du sud, il y fait très chaud d'avril à novembre⁴. Cette contrainte climatique pèse sur la diversité des arbres et des plantes cultivables. Elle s'ajoute à la contrainte géologique qu'induit un sol stérile car calcaire et presque dépourvu d'humus. Cocotier, pandanus, arbre à pain et taro des marais constituent les végétaux nourriciers majeurs des habitants de Tabiteuea, qui exploitent ces ressources et gèrent les stocks de nourriture avec soin, prudence et anticipation. Cette gestion maîtrisée de l'environnement trouve son sens dans la volonté des insulaires de préserver, coûte que coûte et dans la mesure du peu de 'modernité' qu'ils connaissent⁵, un mode de vie traditionnel conservateur, qu'ils désignent en anglais de l'expression : *a simple life, with a simple food*. Ce mode de vie implique une dépendance maximale des ressources végétales et marines endémiques. Il leur procure un

sentiment de fierté, voire d'orgueil, notamment vis-à-vis des *I-Matang*, les 'Blancs', mais aussi de l'atoll-capitale très urbanisé de Tarawa, où les produits d'importation remplacent les produits locaux. Mais aujourd'hui, ils s'accordent à dire que, depuis quelques années, les caprices du climat s'intensifient, sont plus fréquents, et qu'ils menacent ce mode d'existence centré sur l'autosubsistance.

Les longues sécheresses et la hausse ressentie de la température de l'air fragilisent le couvert végétal : les noix de coco sont plus petites, les fosses à taro des marais s'assèchent et leurs composts pourrissent. Cette chaleur empêche également de travailler et de pêcher aussi longtemps qu'avant au cours de la journée.

L'irrégularité des précipitations altère le renouvellement de l'eau douce de la lentille souterraine de Ghyben-Herzberg. Non seulement elle se salinise mais elle devient insalubre, provoquant des pathologies d'origine hydrique (les cas de dysenterie sont actuellement en hausse dans tout l'archipel). Sur certains motu, l'épuisement de cette lentille force à se déplacer sur d'autres îlots afin de s'approvisionner en eau potable.

Si l'eau de pluie reste plus saine, ses modes de stockage posent également des problèmes de salubrité. Les grands réservoirs à filtre sont réservés aux églises, aux écoles et aux infirmeries. Les unités familiales doivent quant à elles recourir à des moyens plus que sommaires pour collecter les eaux de pluie qui s'écoulent dans des gouttières de fortune depuis les toits de tôle ondulée et dans des réservoirs improvisés de type bidon de fuel, bac à crackers et boîte en plastique, qui restent bien souvent en plein soleil et ouverts, laissant ainsi libre cours à l'intrusion d'insectes, de poussières et autres débris apportés par les vents.

Les très grandes marées, dont la fréquence a doublé cette année, ainsi que les tempêtes, dont la violence s'accroît, apportent avec elles des vagues de plus en plus invasives qui grignotent les côtes. Le long du lagon, de nombreuses habitations sont menacées de déplacement vers l'intérieur des terres. Une entreprise tout à fait réalisable au vu du caractère démontable de l'architecture végétale, mais qui laisse en suspens la probléma-

2 PEID : Petits Etats Insulaires en Développement, PMA : Pays les Moins Avancés.

3 Les portions de route traversant le lagon sont construites en béton et recouvertes de sable.

4 L'archipel de Kiribati vit au rythme de deux saisons, sèche et humide.

5 Comme dans toutes les îles extérieures de Kiribati, des produits d'origine étrangère (Australie, Fidji, Asie) sont importés par cargo ; il s'agit essentiellement de riz, de farine, de fuel, de vêtements et d'objets à usage domestique en plastique.

tique de la réduction de la superficie des propriétés foncières des individus et des familles.

À ce jour, la mangrove et les *seawalls* restent les seuls moyens de lutter contre l'érosion et contre les submersions partielles engendrées par les vagues et les houles. Les tentatives de plantation de mangrove ont échoué en raison de querelles relatives au choix des villages qui allaient en bénéficier, mais également en raison de la mise en cause de la légitimité des personnes s'étant portées volontaires pour ce travail. La société de Tabiteuea est en effet soumise à une règle égalitariste qui limite considérablement la différenciation des individus manifestant des initiatives personnelles. Quant à la construction de *seawalls*, si elle procure à court terme un sentiment de protection, elle n'est pas sans conséquences sur le cycle naturel des courants et sur la sédimentation du lagon.

Enfin, les habitants attribuent la réduction de la taille des bédiers, la raréfaction, voire la disparition de certains poissons et tortues, ainsi que l'asphyxie de bancs entiers de poissons, à l'augmentation constatée de la température de l'eau du lagon. Quant aux grands pélagiques de l'océan, ils s'éloignent de plus en plus des côtes, forçant les pêcheurs à s'aventurer davantage au large et augmentant les risques de disparition en mer.

LA PHILOSOPHIE DE KIRIBATI, UNE RÉPONSE À LA RUPTURE DE L'ORDRE DU MONDE

Face à ces constats de l'intensification des perturbations du climat et de leurs répercussions sur leur environnement, les habitants de Tabiteuea continuent, comme ils l'ont toujours fait, imperturbablement, à exploiter leurs ressources avec une sorte de 'prospective écologique' intégrant prudence et respect de la nature. Ces principes de précaution, meilleures armes contre les modifications environnementales, ne sont en aucun cas pratiqués au titre d'une 'capacité d'adaptation' aujourd'hui indispensable face au changement climatique, mais bien au titre du maintien de l'honneur que procure la préservation de cette *simple life*, un mode de vie permettant de dépendre au mini-

mum de produits d'importation et d'infrastructures néfastes pour l'environnement.

Si les insulaires ont bien sûr entendu parler, à la radio, du *Climate Change*, cet état du monde qui inquiète tant les 'Blancs', ils ne ressentent pas le besoin d'établir des liens de causalité entre les déterminants 'scientifiques' du changement climatique (au sens où l'entendent les sciences occidentales) et leurs conséquences, qu'ils subissent pourtant quotidiennement. Prévenir le danger, réduire le risque à zéro, prévoir des stratégies de protection face au risque de submersion, sont des préoccupations bien étrangères à leur conception de la vie.

D'aucuns évoqueraient un fatalisme, une inconscience, une nonchalance, voire une inertie. Rien de tout cela. Il s'agit bien plus de ce que nous appellerions une 'philosophie de l'événement', un événement climatique, absorbé par une société capable de tendre irrémédiablement vers son essence même, et qui préfère garder ses distances avec les malaises de la civilisation occidentale.



Fig.3 — Femme du village de Kabuna, gardienne de la grotte mythique de Tebweka.



L'usure effrénée de la planète, qui fait tant événement dans le discours dominant des 'modernes', ne fait pas tant événement dans le discours local. Cela témoigne, à notre sens, d'une capacité d'absorption de la soudaineté, d'une véritable force de plasticité intellectuelle et physique face à une rupture de l'ordre du monde; une force qui mériterait davantage d'admiration et de respect de notre côté de la terre.

PAR-DELÀ L'ALTÉRITÉ

Aujourd'hui, la question épineuse est de savoir combien de temps encore ce cercle vertueux du conservatisme propre à Tabiteuea sera en mesure de résister aux transformations du monde. Il est

navrant de penser que, selon les prévisions des spécialistes, c'est à très court terme que ses habitants devront renoncer à une partie d'eux-mêmes pour contribuer au colmatage de nos brèches dans la couche d'ozone. Il est inacceptable d'entendre ces puissances industrielles, qui s'acharnent à mettre à sac des centaines de millions d'années de strates géologiques jusqu'à faire la pluie et le beau temps, inviter le peuple de Kiribati - et tous les autres petits peuples de l'Océan, à 's'adapter' et à se montrer 'résiliants'. De retour du terrain il est, une fois de plus, stupéfiant de penser que ce que l'impassibilité de la vie à Tabiteuea montre certainement, c'est combien les insulaires en savent long sur la nature humaine. Assez long pour sentir qu'il n'y a pas grand chose à en espérer.

Cet article est né de deux communications orales : une restitution des résultats de l'enquête de terrain menée à Kiribati pour l'Agence Française de Développement (AFD) le 25 juin 2015 (Papeete, Tahiti) et une intervention au symposium Polynesia Against Climate Threats (PACT) le 30 juin 2015 (Papeete, Tahiti).

RÉFÉRENCES

- *Climate Variability, Extremes and Change in the Western Tropical Pacific: New Science and Updated Country Reports 2014*. Australian Bureau of Meteorology and Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), 2014.
- *Kiribati Joint Implement Plan for Climate Change and Disaster Risk Management KJIP, 2014-2023*. Government of Kiribati, 2014.
- *Tabiteuea North 2008 socio-economic profile*. Produced by the Ministry of Internal and Social Affairs, with Financial support from the UN Development Program & KAP and Technical Assistance from the SPC.
- CAMUS G. – *Tabiteuea Kiribati*. Hazan, 2014.
- LUOMALA K. – *Ethnobotany of the Gilbert Islands*. Bernice P. Bishop Museum Bulletin, 213, Honolulu, Hawai'i, 1953.
- LATOUCHE J.-P. – *Mythistoire Tungaru : cosmologies et généalogies aux îles Gilbert*. Paris, SELAF, 1984.
- MAUDE H. (Ed.) – *Tungaru Traditions. Writings on the Atoll Culture of the Gilbert Islands (by Arthur Francis Grimble)*. Honolulu, University of Hawai'i Press, 1989.



Auteurs

Denis Allemand

Centre Scientifique de Monaco.

Denis Bailly

Université de Bretagne Occidentale, UMR AMURE, IUEM, Brest.

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.

Denise Breitburg

Smithsonian Environmental Research Center, Edgewater.

Guigone Camus

École des Hautes Études en Sciences Sociales (EHESS-Iris), Paris.

Valérie Chavagnac

Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Géosciences Environnement, Toulouse.

William W.L. Cheung

Fisheries Centre, University of British Columbia, Vancouver.

Adrien Comte

Université de Bretagne Occidentale, UMR AMURE, IUEM, Brest.

Andrew Constable

Australian Antarctic Division, Kingston, Antarctic Climate and Ecosystems Cooperative Research Centre, Hobart, Tasmania.

Annie Cudennec

Université de Bretagne Occidentale, UMR AMURE, IUEM, Brest.

Philippe Cury

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

Claude De Broyer

Royal Belgian Institute of Natural Sciences, OD Taxonomy and Phylogeny, Brussels.

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.

Véronique Garçon

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

Jean-Pierre Gattuso

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

Marilaure Gregoire

Interfaculty Center for Marine Research, Liege University (MARE-ULG), Liège.

Lionel Guidi

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

Lina Hansson

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

Kirsten Isensee

Commission Océanographique Intergouvernementale de l'Unesco (IOC-UNESCO), Paris.

Mathilde Jacquot

Université de Bretagne Occidentale, UMR AMURE, IUEM, Brest.

Catherine Jeandel

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

Éric Karsenti

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

Philippe Koubbi

Université Pierre et Marie Curie (UPMC), Borea MNHN, Paris.

Nadine Le Bris

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

Lisa Levin

Scripps Institute of Oceanography, San Diego.

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.

Rémi Mongruel

Ifremer, UMR AMURE, IUEM, Brest.

Linwood Pendleton

Université de Bretagne Occidentale, UMR AMURE, IUEM, Brest, Duke University's Nicholas Institute.

Emmanuelle Quillérou

Université de Bretagne Occidentale, UMR AMURE, IUEM, Brest

Gilles Reverdin

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

Gabriel Reygondeau

Fisheries Centre, University of British Columbia, Vancouver.

Sabrina Speich

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

Luis Valdés

Commission Océanographique Intergouvernementale de l'Unesco (IOC-UNESCO), 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

Manuel Barange

Plymouth Marine Laboratory

Gilles Boëuf

MNHN UPMC

Laurent Bopp

CNRS

Chris Bowler

CNRS ENS

Guigone Camus

EHESS

Biliana Cicin-Sain

Global Ocean Forum

Philippe Cury

IRD

Paul Falkowski

Rutgers University

Jean-Pierre Gattuso

CNRS GIEC

Kirsten Isensee

COI UNESCO

Catherine Jeandel

CNRS

Éric Karsenti

CNRS EMBL

Thorsten Kiefer

Future Earth

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

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.



ocean-climate.org