



ocean-climate.org

OCÉAN ET CLIMAT

FICHES SCIENTIFIQUES

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 les humains 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.

POUR PLUS D'INFORMATIONS, CONTACTER :

Coordinatrice du comité scientifique

Françoise Gaill

francoise.gaill@cnrs-dir.fr

AVEC LE CONCOURS DE :

Nausicaá : **Christine Causse**

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

Plateforme Océan et Climat : **Ludovic Frère Escoffier, Clara Grillet, Louise Ras, Rebecca Daniel, Julien Voyé et Romain Schumm**

Maquette graphique : **Elsa Godet**

CITATION

OCÉAN ET CLIMAT, 2016 – Fiches scientifiques, Deuxième édition, Tome 2.

www.ocean-climate.org, 100 pages.

Octobre 2016

Cette publication a bénéficié du soutien de



Nos objectifs

Lors de la COP21, la Plateforme Océan et Climat a souligné l'importance d'un « océan en bonne santé pour un climat protégé ». Il faut continuer à expliquer comment l'océan est impacté par les changements climatiques, mais surtout montrer que « l'océan fait partie des solutions ».

Après la signature de l'Accord de Paris, la plateforme a décidé de poursuivre son action, dans le domaine de la connaissance scientifique, des solutions issues des écosystèmes, du transport maritime, et de la mobilisation sur des bases scientifiques solides et sur son plaidoyer pour l'intégration de l'océan dans le régime climatique. La plateforme a choisi de travailler selon quatre axes et développe différentes thématiques en lien avec les solutions économiques et les solutions fondées sur la nature afin de les intégrer au sein de l'Accord de Paris.

- Le premier axe structurant de la plateforme concerne le renforcement international du Comité Scientifique et du réseau scientifique pour la production et la diffusion de solutions pour le climat. La plateforme soutient la collaboration scientifique internationale, par exemple dans le cadre de FACT-O (French American Climate Talks on Ocean) qui tente de porter des solutions innovantes à l'échelle globale. Ces solutions vont alimenter les thématiques du plaidoyer, définir les besoins de connaissances scientifiques sur « océan et climat » et alimenter l'argumentaire d'un rapport océan auprès du GIEC.

- Le deuxième axe identifié au sein des solutions économiques est le développement d'un transport maritime engagé dans la réduction d'émissions de gaz à effet de serre.

- Le troisième axe concerne les enjeux de résilience des écosystèmes face aux changements climatiques, avec notamment le rôle des aires marines protégées.

- Le quatrième axe est celui de la mobilisation des citoyens, dont la jeunesse, autour notamment de la Journée mondiale de l'océan du 8 juin et des Journées de mobilisation sur les enjeux « océan et climat » (Ocean for climate Days) pendant les Conférences des Parties de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques. Cette mobilisation permettra de porter le plaidoyer auprès des décideurs publics et privés, de diffuser la connaissance scientifique et de sensibiliser le grand public. Le 8 juin et les Ocean for Climate Days deviendront les incontournables internationaux des enjeux océan et climat relayés à l'échelle internationale sur Internet. D'autres événements convergeant vers cet objectif jalonneront cette année 2016.

En approche transversale à ces quatre axes, la plateforme suit la négociation sur le climat dans l'objectif de faciliter l'intégration du plaidoyer « océan et climat ». Enfin, la plateforme développe des alliances avec des États engagés pour l'intégration de l'océan dans les enjeux climatiques et du climat dans la gouvernance de l'océan.

Cette année et au-delà, en fonction des opportunités, la plateforme pourra faire émerger de nouvelles thématiques au sein de l'axe « solutions économiques », comme les Énergies marines renouvelables (EMR), et au sein de l'axe « solutions issues des écosystèmes ». Enfin, la plateforme pourra, à terme, développer une approche complémentaire régionale de développement de ces axes.

Table des matières

Avant-propos

Françoise Gaill.....	06
----------------------	----

Le niveau de la mer monte

Benoît Meyssignac.....	08
------------------------	----

Les conséquences à long terme du changement climatique

Xavier Capet.....	10
-------------------	----

La circulation océanique et le climat : une vue d'ensemble

Bertrand Delorme et Yassir Eddebbar.....	12
--	----

L'océan est à bout de souffle

Kirsten Isensee, Lisa A. Levin, Denise Breitburg, Marilaure Gregoire, Veronique Garçon et Luis Valdés.....	20
--	----

Océan, biodiversité et climat

Gilles Boeuf.....	29
-------------------	----

Les coraux et le changement climatique

Denis Allemand.....	33
---------------------	----

Blanchissement des coraux, un réservoir de biodiversité menacé

Leïla Ezzat et Lucile Courtial.....	42
-------------------------------------	----

Plaidoyer pour une attention spécifique à l'océan profond dans le contexte du changement climatique

Lisa A. Levin, Nadine Le Bris, Erik Cordes, Yassir Eddebbar, Rachel M. Jeffreys, Kirk N. Sato, Chih-Lin Wei et le groupe de travail sur le changement climatique de DOSI Deep-Ocean Stewardship Initiative.....	47
--	----

Les services écosystémiques de l'océan profond

Jennifer T. Le et Kirk N. Sato.....	52
-------------------------------------	----

Les services écosystémiques marins en Europe

Clara Grillet, Claire Bertin, Jennifer T. Le et Adrien Comte.....	59
---	----

Les réseaux d'aires marines protégées et le changement climatique : un plaidoyer politique

Christophe Lefebvre.....	68
--------------------------	----

Océan, changements climatiques et migration humaine

Christine Causse, Daria Mokhnacheva et Guigone Camus.....	72
---	----

L'océan dans les contributions nationales du pourtour méditerranéen

Louise Ras.....	79
-----------------	----

Quel droit international pour l'océan et le climat ?

Bleuenn Guilloux et Romain Schumm.....	87
--	----

Avant-propos

Françoise Gaill

L'océan est une composante essentielle du climat de notre planète. Les scientifiques le savent et l'ont maintes fois prouvé : sans l'océan, nos émissions de gaz à effet de serre auraient déstabilisé bien davantage la machine climatique. C'est un régulateur essentiel donc, mais constamment menacé par les activités humaines et les conséquences du changement climatique global.

Les chiffres parlent d'eux-mêmes, l'océan couvre 71 % de la surface de la planète, représente 97 % de son volume habitable, contient 97 % de l'eau sur Terre, absorbe 90 % de la chaleur et 25 % du CO₂ additionnels introduits par l'homme, fournit des moyens de subsistance pour une vaste part de la population mondiale, et produit quantité de substances pharmacologiques. Ses écosystèmes valent plus que le PIB des États-Unis ! Les menaces qui pèsent sur lui (et les communautés qui en dépendent) sont tout aussi colossales et inquiétantes : acidification, réchauffement, désoxygénation, montée du niveau de la mer...

Pourtant, malgré les menaces qu'il subit, malgré sa préséance dans l'inertie du climat, les efforts internationaux pour atténuer et s'adapter au changement climatique ont délaissé l'océan. Pendant plus de 20 ans, l'océan n'a même pas été mentionné dans les textes additionnels de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques. Alarmés par ce constat, les quelque 70 membres de la Plateforme Océan et Climat (institutions publiques, ONG, universités, etc.) ont décidé de porter la voix de l'océan dans les négociations climatiques de la COP21.

Pour eux, l'Accord de Paris a marqué une étape importante, un succès primordial, pour la prise en compte des thématiques « océan et climat ». Pour la première fois depuis la CCNUCC, l'Accord de Paris de décembre 2015 mentionne explicitement l'océan dans son préambule. De plus, le Groupe d'experts intergou-

vernemental sur l'évolution du climat (GIEC) publiera un Rapport spécial sur les interactions entre le climat, l'océan et la cryosphère. L'océan est donc rentré de plain-pied dans les négociations climatiques !

Mais le combat pour l'océan ne s'arrête pas là. Ce n'est plus seulement aux processus diplomatiques (qui doivent encore mieux intégrer l'océan) de se mobiliser. La société civile marine doit prendre part à l'Agenda de l'Action, proposer des alternatives, remonter et supporter des initiatives, faire circuler les bonnes pratiques et partager les connaissances. La plateforme s'inscrit déjà dans cette démarche.

Mais avant tout, il faut mieux comprendre l'océan. Ce milieu si vaste, si étendu, si divers, contient une biodiversité inexplorée et foisonnante. Les fonds marins constituent la dernière *terra incognita*. Des mécanismes physiques et biologiques sont encore inexpliqués et mal connus. Les scientifiques et les politiques publiques doivent se mobiliser pour combler la carence en connaissances sur les liens entre océan et climat. L'année dernière, forte de son assise scientifique, la plateforme avait déjà publié 17 fiches scientifiques. En 2016, elle continue en vous proposant ce second tome.

Ce livret se veut plus inclusif et plus ouvert. Persuadée que les sciences humaines sont le deuxième pilier fondamental pour connaître l'océan et les problématiques socio-économiques qui y sont liées, cette publication fait côtoyer les sciences « dures » et les sciences « humaines ». La plateforme s'approprie de nouvelles thématiques : le droit de l'océan et du climat, les sciences politiques, les migrations humaines... Ces portes d'entrée doivent alimenter la réflexion internationale sur les stratégies d'adaptation, les lacunes qui persistent, les comportements de tout un chacun, et constituer une base pour la compréhension des enjeux humains et des solutions. Nous appelons de nos vœux une plus grande intégration des sciences « dures » et « humaines ».

Afin de trouver des solutions à des problèmes globaux (le changement climatique), la recherche doit être transdisciplinaire et holistique.

L'approche scientifique océan-climat se développe. Elle doit répondre à des défis considérables : collecter des données suffisamment nombreuses et diver-

sifiées, réduire les échelles, comprendre les phénomènes locaux et globaux, étudier la surface et les profondeurs, la haute mer et la côte, la biodiversité et les humains. Le potentiel d'investigation est immense. Mais c'est absolument nécessaire. L'océan est notre « assurance tous risques » et il est temps de le protéger!

Cet ensemble d'articles reprend des écrits rédigés pour la COP21 dont les données sont mises à jour avec l'avancée des connaissances les plus récentes. C'est le cas pour les questions d'élévation du niveau des mers, d'oxygénation de l'océan, de biodiversité marine, des écosystèmes coralliens et des écosystèmes profonds.

Certains des thèmes mis en avant comme l'élévation du niveau des mers ou les conséquences à long terme du changement climatique sur l'océan, s'appuient sur un ou plusieurs articles de synthèse parus cette année. Ils sont délibérément courts pour attirer l'attention sur les faits majeurs dont nous disposons aujourd'hui.

D'autres comme celui sur la circulation océanique, ou sur le blanchissement des coraux font une synthèse approfondie des données et modélisations disponibles.

D'autres enfin approfondissent des concepts comme celui des services écosystémiques, et s'interrogent sur des environnements profonds encore peu explorés.

Quatre articles abordent des thèmes émergents tels que la question du rôle des aires marines protégées dans le changement climatique, des migrations humaines, des contributions nationales du pourtour méditerranéen ou plus généralement du droit international.

Cet ensemble d'articles doit beaucoup au travail du conseil scientifique de la plateforme, mais également

au groupe de jeunes scientifiques, initié dans le cadre de FACT-O (*French American Climate Talks on Ocean*) qui ont rédigé ou participé à la rédaction de près de la moitié de ces productions.

FACT-O est une série de conférences publiques programmées pour 2 ans (2016-2017) en Amérique du nord, au cours desquelles des scientifiques de renom, des représentants de la société civile, des ONG, des figures politiques, des journalistes et des entrepreneurs prendront la parole sur les océans et les enjeux qui y sont associés. L'objectif est la mise en place d'un programme de recherche scientifique destiné à de jeunes scientifiques pour faciliter les échanges entre les deux pays. Une des déclinaisons de ce projet est la création de *Youth for Ocean!* (YO!), un groupe de jeunes scientifiques interdisciplinaire et international, qui cherche à promouvoir la connaissance des liens entre l'océan et le climat, encourager un dialogue science/société, et rechercher une meilleure intégration de l'océan dans les négociations climatiques internationales.

La COP22, qui se tiendra à Marrakech du 7 au 18 novembre 2016, se présente comme l'occasion pour passer de l'Accord à l'action. En effet, l'Accord de Paris a été un événement phare dans l'avancée des négociations climatiques grâce aux engagements pris par un grand nombre d'États. Cet ensemble d'articles soulève des enjeux clefs des interactions entre l'océan et le climat, et pourra participer à la mise en œuvre de l'action.



Le niveau de la mer monte

Benoît Meyssignac

Après presque 3000 ans pendant lesquels le niveau des océans est resté stable, les observations par satellites montrent que la vitesse d'élévation du niveau de la mer a presque doublé et atteint aujourd'hui 3,5 mm/an en moyenne. C'est la redistribution de chaleur dans le système climatique qui engendre la dilatation thermique de l'océan, la fonte des glaciers continentaux et la perte de masse des calottes glaciaires, chacun contribuant environ à part égale. Si ces processus s'accroissent, certaines estimations n'excluent pas une élévation de 60 cm à 1 mètre à l'horizon 2100. Loin d'être uniforme sur la planète, ce processus se conjugue avec d'autres facteurs non climatiques comme l'enfoncement des sols ou la diminution d'apports de sédiments par les fleuves... Pour de nombreuses régions, les impacts de cette élévation du niveau de la mer sont incertains et l'utilisation de modèles d'évolutions en réponse à des forçages climatiques est un outil important d'aide à la décision pour l'aménagement des territoires.

Alors que le niveau des océans s'était stabilisé il y a environ 3000 ans à la fin de la déglaciation associée au dernier cycle glaciaire, les observations marégraphiques disponibles depuis 150 ans indiquent que la mer a recommencé à monter au cours du ^{xx}e siècle. Ces deux dernières décennies, la vitesse d'élévation a presque doublé par rapport aux décennies précédentes et atteint aujourd'hui 3,5 millimètres par an en moyenne : c'est ce que montrent les observations des satellites altimétriques franco-américains Topex/Poseidon, Jason-1 et Jason-2, développés par le Centre National d'Études Spatiales et la NASA depuis 1992.

Tout suggère que la hausse actuelle du niveau moyen global de la mer est liée au réchauffement climatique affectant la planète depuis quelques décennies car causée par la dilatation thermique de l'océan et la fonte des glaces continentales.

Au cours de la deuxième moitié du ^{xx}e siècle l'océan s'est beaucoup réchauffé. Il stocke actuellement près de 90 % de l'excès de chaleur accumulée dans le système climatique au cours des 50 dernières années. La dilatation thermique des océans causée par l'augmentation de la température de la mer explique une partie de la hausse observée du niveau de la mer.

Depuis quelques années, on assiste à un déclin important des glaces continentales. Les glaciers de montagnes fondent et les glaciers périphériques du Groenland et de l'Antarctique de l'ouest s'écoulent dans l'océan à une vitesse accélérée. C'est l'autre grande cause de l'élévation actuelle du niveau de la mer.

Pour les deux dernières décennies, ces facteurs (dilatation thermique de l'océan, fonte des glaciers de montagne, perte de masse des calottes polaires) contribuent chacun pour environ un tiers à la hausse observée du niveau de la mer.

Grâce à leur couverture complète du domaine océanique, les satellites altimétriques nous ont aussi révélé que la hausse du niveau de la mer est loin d'être uniforme. Dans le Pacifique ouest par exemple, la mer s'est élevée 2 à 3 fois plus vite qu'en moyenne depuis 20 ans. Nous savons aujourd'hui que cette importante variabilité régionale est causée par la répartition non uniforme de la chaleur dans l'océan. Résultat : la mer monte plus vite dans certaines régions que dans d'autres.

La hausse du niveau de la mer constitue une menace sérieuse pour de nombreuses régions côtières

basses, souvent très peuplées, de la planète. On s'attend à une hausse accrue du niveau de la mer au cours du ^{xxi}^e siècle, à cause de la dilatation thermique de l'océan qui se poursuivra, et surtout à cause de la fonte des glaces continentales. Si la calotte polaire du Groenland venait à disparaître, le niveau de la mer s'élèverait de 7 m ! Un tel événement, s'il se produisait, prendrait cependant plusieurs siècles, voire plusieurs millénaires. On ne connaît pas encore avec précision ce que sera la contribution des calottes polaires au niveau de la mer des prochaines décennies. Mais certaines estimations récentes suggèrent qu'une hausse moyenne de la mer de l'ordre de 60 cm à 1 m n'est pas à exclure à l'horizon 2100, avec cependant de fortes variations d'une région à une autre.

Dans nombre de régions côtières basses de la planète, la hausse du niveau de la mer se combine avec d'autres facteurs non climatiques, ce qui les rend

encore plus vulnérables. C'est le cas par exemple de l'enfoncement du sol lié à des phénomènes naturels (par exemple, la surcharge des sédiments accumulés dans les deltas des grands fleuves) ou aux activités humaines (le pompage des eaux souterraines ou du pétrole). D'autres facteurs, tels la diminution des apports sédimentaires à la mer par les fleuves, causée par la construction de barrages, l'urbanisation intensive du littoral, les variations des courants côtiers, etc. contribuent aussi à modifier la morphologie de la côte. Pour de nombreuses régions du monde (y compris la France et ses départements et territoires d'outre-mer), la contribution respective de ces différents facteurs à l'érosion du littoral est encore incertaine. Des modèles d'évolution et de vulnérabilité des zones côtières en réponse aux forçages anthropique et climatique sont des outils d'aide à la décision devenus indispensables pour les responsables politiques en charge de l'aménagement du territoire.

Les conséquences à long terme du changement climatique

Le débat sur les mesures d'atténuation et d'adaptation à prendre face aux changements climatiques s'appuie sur des observations et des projections portant sur une fenêtre de moins de 250 ans. Une étude récente de Clark et de ses collaborateurs, publiée dans *Nature Climate Change*, s'intéresse aux conséquences climatiques sur de très longues durées (plus de 10 000 ans¹). Leur ampleur est liée aux émissions de CO₂. Selon les scénarios, la hausse de température pourrait s'élever bien au-delà des 2 °C et on pourrait s'attendre à une hausse du niveau global de la mer de 2 à 4 mètres par siècles durant le prochain millénaire. Ces résultats confirment l'importance de laisser inutilisée une grande quantité de ressources fossiles.

Un article récent publié dans *Nature Climate Change* s'intéresse aux conséquences climatiques de long terme des émissions de CO₂ anthropique actuelles. Comme plusieurs études antérieures, il met en évidence des effets sur de très longues durées (plus de 10 000 ans). L'ampleur de ces effets dépend fortement de notre capacité à laisser inutilisée une grande quantité de ressources fossiles.

La majeure partie du débat politique concernant les mesures d'atténuation et d'adaptation à prendre face aux changements climatiques s'appuie sur des observations pour les 150 dernières années, ainsi que des projections climatiques pour les 85 prochaines années. L'accent mis sur cette fenêtre de moins de 250 ans obscurcit certains des enjeux les plus profonds liés aux changements climatiques.

Le vingt-et-unième siècle et peut être le suivant constituent la période durant laquelle la très grande majorité des émissions de carbone d'origine anthropique devraient se produire. En revanche

les conséquences vont se faire sentir pendant de nombreux millénaires. Dans cette étude de Clark et de ses collaborateurs, les conséquences de nos émissions de CO₂ sont placées dans le temps long des vingt derniers millénaires (depuis la fin de la dernière période glaciaire et le développement des civilisations humaines), et des dix prochains millénaires durant lesquels les impacts prévus du changement climatique anthropique vont croître et persister.

L'étude s'appuie sur des simulations numériques des changements de température atmosphérique de surface (celle que nous ressentons) et de l'élévation du niveau de la mer, pour les 10 000 prochaines années. Ces simulations mettent en évidence des destins climatiques longs très contrastés selon le cumul des émissions (réalisé au xx^e, xxi^e et possiblement xxii^e siècle). Des simulations complémentaires permettent également de régionaliser les effets en termes de montée du niveau de la mer. L'étude considère 4 scénarios d'émissions caractérisés par des quantités totales de carbone émis dans l'atmosphère plus ou moins grandes, entre un minimum de 1 280 PgC et un maximum de

1 CLARK P. U., SHAKUN J. D., MARCOTT S. A., et al., 2016 – *Consequences of Twenty-First-Century Policy for Multi-Millennial Climate and Sea-Level Change*. *Nature Climate Change*.

5 100 PgC. 1 280 PgC² signifie que nous n'utiliserons qu'environ 15 % des ressources existantes. Ceci nous laisserait encore émettre 1,5 fois la quantité totale de CO₂ émise depuis le début de la révolution industrielle. Au rythme actuel d'émission, cela prendrait 70 ans, après quoi toute émission devrait cesser. 5 100 PgC représente environ 70 à 90 % des ressources existantes de combustibles fossiles.

Brûler environ 5 100 PgC conduirait à une hausse de température bien au-delà de 2 °C, avec une très forte probabilité que cette hausse dépasse 5 °C pendant plus de 10 000 ans. Parallèlement, il faudrait s'attendre à une hausse du niveau global de la mer de 2 à 4 mètres par siècle durant le prochain millénaire. Dans 10 000 ans, nos émissions seraient toujours responsables d'une montée continue du niveau de la mer et ce niveau dépasserait alors de 25 à 50 mètres le niveau actuel, selon l'étude. Une forte limitation de nos émissions totales à 1 250 PgC conduirait également à des conséquences de très long terme mais d'une amplitude sensiblement réduite, en particulier en termes de hausse des températures globales, avec tout de même une forte probabilité de dépasser la limite des +2 °C (inscrite dans l'Accord de Paris) et de subir une hausse globale du niveau de la mer d'une dizaine de mètres. Dans ce scénario d'émissions réduites, la population habitant en 2010 des terres ultérieurement submergées par la future montée des eaux est de 1,3 milliard.

L'ensemble de ces résultats vient confirmer l'importance d'une action efficace pour laisser enfouie une part aussi grande que possible du combustible fossile disponible. Les conséquences de ce type d'action se feront sentir pendant des milliers d'années. En revanche, la seule réduction même importante des taux d'émission ne résout rien sur la longue durée.

On peut d'une manière générale comprendre les résultats de cette étude sur les effets de long terme des émissions de CO₂ en se souvenant que 1) une grande partie du CO₂ anthropique que nous émettons reste actif dans l'atmosphère pendant des temps très longs; 2) le système climatique terrestre possède une inertie très grande (essentiellement due à l'océan) de telle sorte que, lorsqu'il est perturbé (par nos émissions), il met de nombreux millénaires à s'ajuster, par exemple en température. Il en résulte que les générations actuelles et celles de nos enfants ne subiront qu'une infime part des conséquences des émissions actuelles de CO₂ anthropique. La majeure partie de ces conséquences sera subie par la longue lignée de nos descendants lointains pendant des centaines de générations. Les auteurs invitent donc à une présentation des risques climatiques qui ne se limite pas aux 85 prochaines années afin que les décisions prises et les débats publics qui les accompagnent intègrent les conséquences de très long terme des émissions actuelles.

² Pg: pétagrammes, équivalent à 10¹⁵ grammes ou 1 milliard de tonnes (Giga tonnes). Les émissions mondiales actuelles (2013) de combustible fossile sont d'environ 9 PgC (source: CO₂ emissions from fuel combustion Highlights 2015, IEA Edition).

La circulation océanique et le climat : une vue d'ensemble

Bertrand Delorme
et Yassir Eddebbar

La circulation océanique joue un rôle central dans la régulation du climat et la préservation de la vie marine, en transportant chaleur, carbone, oxygène, et nutriments à travers les différents bassins du globe. Elle limite considérablement l'accumulation de gaz à effet de serre dans l'atmosphère en séquestrant le carbone et la chaleur dans l'océan profond, modulant ainsi la trajectoire du changement climatique. Mais le réchauffement anthropique agit aussi directement sur la circulation océanique en modifiant les caractéristiques physiques qui la gouvernent. Cependant, ces interactions sont encore mal comprises et il est aujourd'hui essentiel d'améliorer les systèmes d'observations de l'océan, ainsi que notre compréhension des processus actifs, afin d'obtenir des modèles numériques fiables pour prédire le climat du *xxi^e* siècle.

L'océan est en mouvement perpétuel. En transportant la chaleur, le carbone, le plancton, les nutriments et l'oxygène, la circulation océanique régule le climat global, tout en maintenant la production primaire des écosystèmes marins. Ses retombées sur les sociétés humaines, en particulier sur les pêcheries, le tourisme et l'industrie du transport maritime, sont donc considérables. Les courants de surface et les courants sous-marins, les phénomènes d'upwelling (remontée des eaux profondes vers la surface) et de downwelling (chute des eaux de surface vers les profondeurs), les ondes internes et celles de surface, mais aussi le mélange, les tourbillons, la convection, et plusieurs autres formes de mouvement : toutes agissent de concert pour façonner une circulation complexe. Plusieurs mécanismes extérieurs contribuent simultanément à cette circulation, notamment le réchauffement solaire, les marées, les vents, mais aussi la rotation de la Terre, ou encore les changements de densité dus aux variations de température et de salinité. Dans cet article, nous décrivons quelques-uns des principaux mécanismes moteurs de la circulation océanique globale, avec une attention particulière pour la circulation méridienne de retournement (CMR). Nous traiterons de son importance

dans le système climatique, du réseau d'observation, ainsi que des projections futures sous la pression d'un réchauffement climatique sans précédent.

LES MÉCANISMES CLÉS

La circulation océanique peut être divisée en deux entités conceptuelles différentes : (i) une circulation rapide, poussée par les vents et dominant la couche supérieure de l'océan, (ii) une circulation lente et dominant les profondeurs océaniques. Ces deux composantes agissent simultanément pour former la CMR, c'est-à-dire l'itinéraire suivi par les particules d'eau, sorte de boucle géante passant par tous les bassins du globe.

La circulation rapide est entraînée par les vents dominants, principalement des vents d'est dans les tropiques et des vents d'ouest dans les moyennes latitudes. La friction sur l'eau due à la force du vent, couplée à la force de Coriolis (effet de la rotation de la Terre), entraîne un mouvement des couches supérieures de l'océan connu sous le nom de transport d'Ekman. Ce mécanisme engendre un mouvement d'eau perpendiculaire à la direction du vent

(vers la droite dans l'hémisphère nord et vers la gauche dans l'hémisphère sud). Il produit des zones de divergence et de convergence d'eaux qui mènent respectivement à des phénomènes d'upwelling et de downwelling. Dans le Pacifique équatorial par exemple, les vents d'est créent une divergence des eaux de surface vers les pôles. Ces dernières sont alimentées par la remontée d'eaux profondes plus fraîches, formant ainsi la « langue d'eau froide » équatoriale. Dans l'hémisphère sud, les vents d'ouest entraînent un transport d'Ekman vers l'équateur, et font donc apparaître des zones d'upwelling dans les basses latitudes, où des eaux vieilles de plusieurs siècles remontent vers la surface (Morrison *et al.*, 2015).

Le schéma général de la circulation superficielle créée par les vents est représenté dans la figure 1. Il consiste en une série de courants zonaux (e.g. courants nord-équatoriaux et sud-équatoriaux), de courants de bord est (e.g. au large de la Californie, du Chili/Pérou), et de courants de bord ouest (e.g. courant de Kuroshio et Gulf Stream) qui entraînent la formation de gyres sous l'effet de la rotation de la Terre. Les gyres subtropicaux, par

exemple, transportent de la chaleur depuis l'équateur vers les pôles à travers les courants de bord ouest, et ventilent ainsi les eaux intérieures des basses latitudes grâce à un flux de retournement sous-marin des eaux de surface (*i.e.* les eaux de surfaces coulent et remplacent ainsi les eaux intérieures épuisées en O_2) (Duteil *et al.*, 2014). Ces eaux remontent ensuite au niveau de l'équateur, fermant ainsi la boucle de retournement des eaux superficielles de la CMR. Dépendant étroitement d'une circulation atmosphérique rapide et intense, cette circulation domine la variabilité de petite échelle des couches supérieures de l'océan et constitue la composante la plus énergétique de la CMR.

De son côté, la circulation profonde repose sur des constantes de temps plus longues. Cette circulation est parfois appelée « thermohaline », du fait de sa dépendance aux changements de température (« thermo ») et de salinité (« haline ») qui régulent la densité de l'eau de mer. Plus l'eau de mer est froide et salée, plus sa densité s'accroît ; elle s'enfonce alors dans les profondeurs. Cet écoulement advient principalement au niveau des hautes latitudes, où la perte de chaleur vers l'atmosphère et la formation

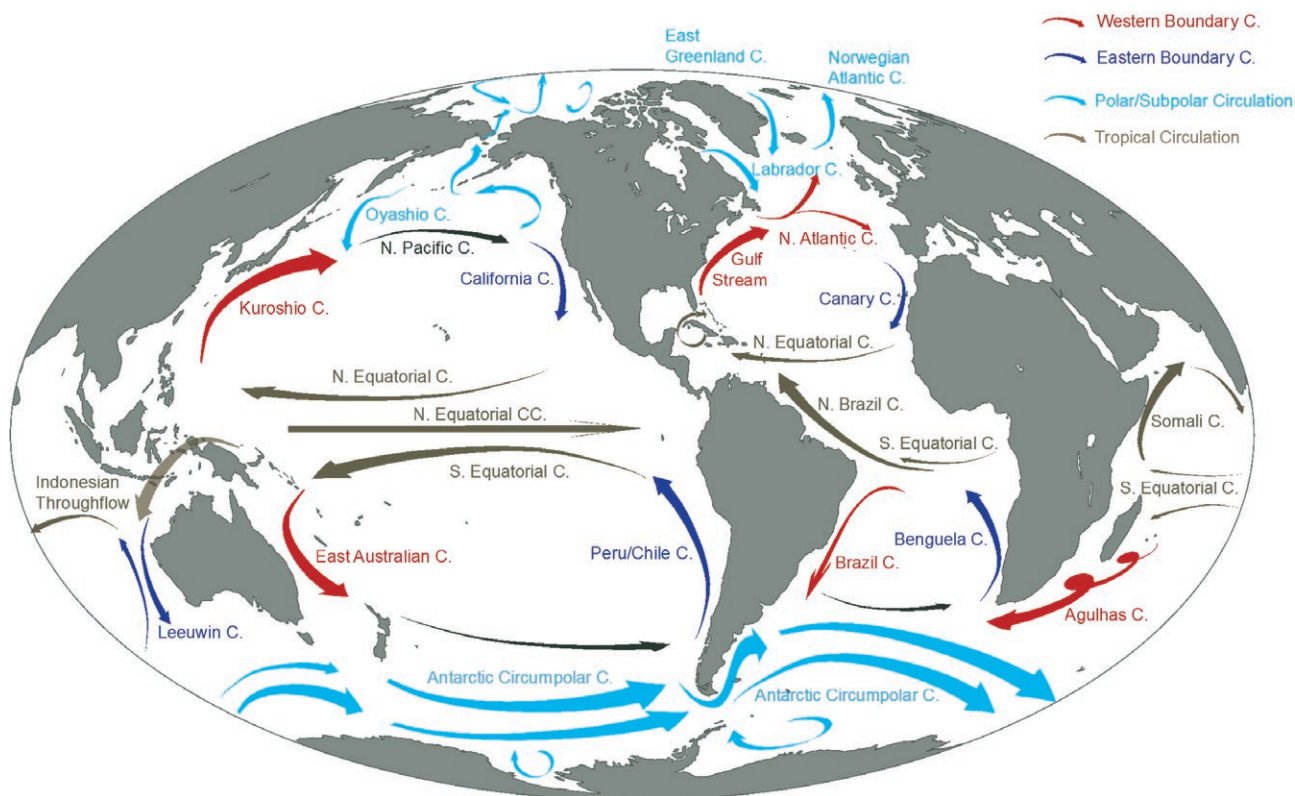


Fig.1 – La circulation de surface poussée par les vents. Entraînés par les vents et la force de Coriolis, les courants de surface forment les gyres subtropicaux et subpolaires principaux et la circulation tropicale/équatoriale [C. = Current]. © B. Delorme et Y. Eddebbbar.

de glace changent significativement la température et la salinité de l'eau. Ces régions, en liant surface et profondeur de l'océan, influent largement sur les propriétés des eaux intérieures.

L'Atlantique nord subpolaire est un exemple de région clé pour la CMR. Au niveau de cette région, une perte de chaleur importante vers l'atmosphère, les eaux de surface coulent dans les eaux profondes de l'Atlantique nord (North Atlantic Deep Water, NADW) (Send and Marshall, 1995). Dans les mers de Weddell et de Ross (autour de l'Antarctique), la formation de glace et le rejet de saumure, rendent les eaux sous-jacentes plus salées. Ce processus forme une masse d'eau dense connue sous le nom d'eaux abyssales d'Antarctique (Antarctic Bottom Water, AABW), qui coulent et se propagent ensuite dans l'ensemble des fonds marins de l'océan mondial (Talley *et al.*, 2011). En revanche, les eaux profondes de l'Océan Indien et de l'Océan Pacifique (Indian Deep Water, IDW; Pacific Deep Water, PDW) se forment beaucoup plus lentement, par des brassages d'eau dans les basses latitudes, et sont ainsi

plus anciennes, plus riches en carbone et nutriments, mais davantage pauvres en O_2 (Talley, 2013).

Les chemins et mécanismes par lesquels ce large volume d'eaux profondes retourne à la surface ont longtemps constitué une énigme pour les océanographes. Il était admis initialement que les eaux profondes denses remontaient dans les couches supérieures à l'aide des phénomènes de mélange océanique de grande échelle. Cependant, afin d'exister, ce phénomène aurait demandé des valeurs de diffusivité qui ne coïncident pas avec les observations prélevées au niveau de larges régions, plus faibles (Munk, 1966; Lumpkin and Speer, 2007; Ledwell *et al.*, 2011). Des études plus récentes ont montré que les phénomènes d'upwelling dans l'océan austral, qui apparaissent suite à l'effet des vents d'ouest sur la surface océanique, seraient la principale dynamique de retour des eaux profondes à la surface (Toggweiler and Samuels, 1995; Marshall and Speer, 2012). Ces dernières vont ensuite sombrer à nouveau vers les abysses ou se diriger vers l'équateur par transport d'Ekman. Elles rejoignent plus

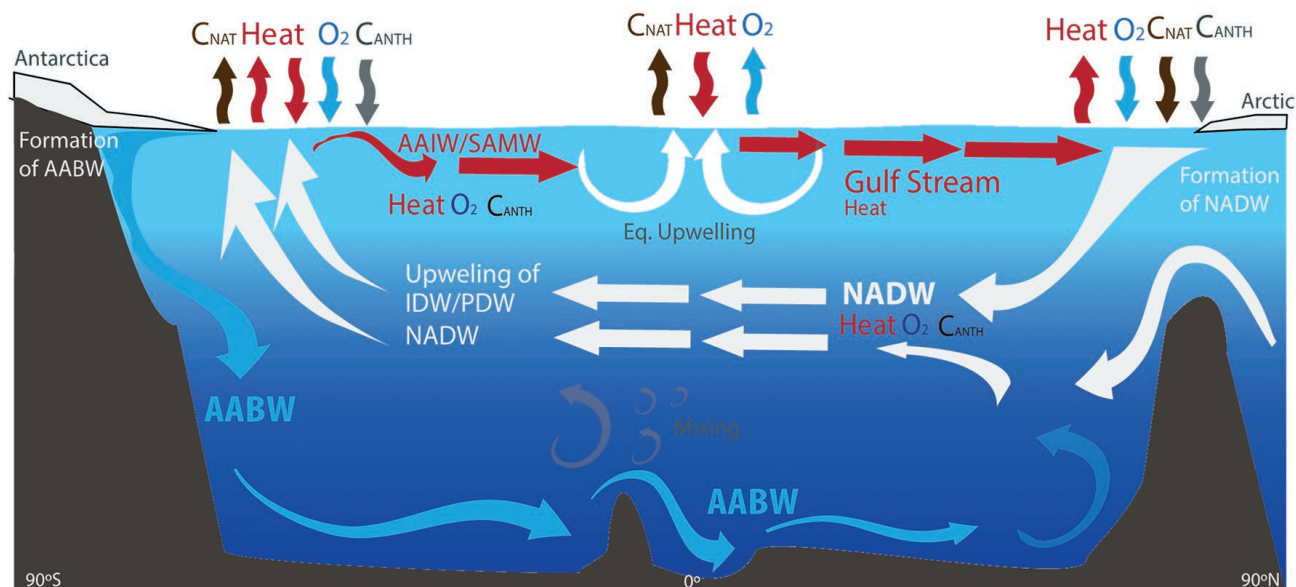


Fig.2 – Ce schéma en deux dimensions illustre de manière simplifiée la CMR et ses impacts sur les grands flux air-mer et le transport de chaleur, d'oxygène (O_2), de carbone anthropique (C_{ANTH}) et naturel (C_{NAT}). Les bassins de haute latitude, tels que l'Atlantique nord, sont des régions de fortes pertes de chaleur, et de fort stockage de C_{ANTH} , de C_{NAT} et d' O_2 . Les remontées d'eaux dans l'océan austral mènent simultanément à des émissions de C_{NAT} , des captures de C_{ANTH} et des ventilations d' O_2 , car les eaux profondes remontées sont pauvres en O_2 et riches en carbone inorganique dissous (DIC). La zone équatoriale est une région d'intenses remontées d'eaux froides et riches en DIC et nutriments, menant à un stockage de chaleur, une production biologique et un dégazage thermique d' O_2 intensifiés, ainsi qu'à de grosses émissions de C_{NAT} [AABW = eaux profondes de l'Antarctique; NADW = eaux profondes de l'Atlantique nord; IDW = eaux profondes de l'Océan Indien; PDW = eaux profondes du Pacifique; AAIW = eaux antarctiques Intermédiaires; SAMW = eaux modales subantarctiques]. © B. Delorme et Y. Eddebbar.



tard le nord de l'Atlantique et ferment ainsi la boucle de la CMR (Marshall and Speer, 2012).

Il est important de garder à l'esprit que les processus gouvernant cette circulation sont très complexes, et impliquent des phénomènes d'upwelling liés à la fois aux vents et au mélange océanique (Talley, 2013). Le mélange turbulent de l'océan profond est ainsi au cœur de ces interactions. Il est actionné par des vagues internes déferlantes, générées par les flux des marées sur la topographie rugueuse, ainsi que par les vents à la surface (Munk and Wunsch, 1998). Ce mélange diffuse la chaleur des eaux de surface vers le bas et fait remonter les eaux profondes, froides et denses. Ces processus complexes permettent d'illustrer la nature entremêlée des circulations entraînées par les différentes composantes de la CMR (simplifiée dans fig 2).

LA CIRCULATION OCÉANIQUE : UN RÉGULATEUR DU CLIMAT

La circulation océanique a des conséquences sur l'état moyen et la variabilité du système climatique. Les phénomènes d'upwelling au niveau de l'équateur, ainsi que la divergence d'eaux froides, riches en carbone et nutriments en direction des pôles, maintiennent à la fois des températures basses le long de l'équateur, mais aussi un large dégazage de carbone naturel et d'oxygène, mêlé à une productivité biologique intense et à une forte absorption de chaleur. Le transport méridien de chaleur vers les pôles qui en découle, et la perte de chaleur vers l'atmosphère associée, modèrent le climat dans les régions de moyennes et hautes latitudes (e.g. Europe du nord-ouest). De plus, les variations dans l'intensité des phénomènes d'upwelling équatoriaux et des courants jouent un rôle central dans les phénomènes El Niño et La Niña. Par ce biais, la circulation océanique influence le climat global sur des échelles interannuelles à décennales, et module ainsi l'intensité du changement climatique (Kosaka and Xie, 2016).

En particulier, la CMR limite les impacts du changement climatique en transportant la plupart de la chaleur d'origine anthropique vers les profondeurs (Kostov *et al.*, 2014). Récemment, les variations de la CMR (et ses impacts sur la rétention de chaleur par l'océan), ont été considérées

comme une explication possible au « hiatus » dans l'augmentation des températures moyennes de surface. Cela s'expliquerait par l'intensification du phénomène de retournement de la circulation superficielle dans le Pacifique (Meehl *et al.*, 2011 ; Balmaseda *et al.*, 2013 ; England *et al.*, 2014), ainsi que par des changements dans les vitesses de formation des eaux de l'Atlantique nord, ou encore des phénomènes d'upwelling accrus dans l'océan Austral (Chen and Tung, 2014 ; Drijfhout *et al.*, 2014). De plus, la remontée d'eaux profondes préindustrielles, qui étaient jusqu'alors isolées des forçages thermiques anthropiques, a été évoquée comme étant un mécanisme clé des tendances de refroidissement de la surface au niveau de l'océan Austral qui ont été observées dans les dernières décennies (Armour *et al.*, 2016).

LA CIRCULATION OCÉANIQUE ET LES DYNAMIQUES BIOGÉOCHIMIQUES

L'océan absorbe plus d'un quart du CO₂ anthropique émis chaque année grâce à des interactions qui impliquent son cycle du carbone biologique et sa circulation (LeQuéré *et al.*, 2013 ; Stocker *et al.*, 2013). Comme pour la séquestration de chaleur, le stockage océanique de carbone s'effectue en majorité dans les hautes latitudes. Dans l'Atlantique nord, la formation des eaux profondes nord-atlantiques est une véritable porte d'entrée du carbone anthropique vers les profondeurs. L'océan Austral est également un réservoir majeur de carbone anthropique, comptant pour presque la moitié du stockage océanique global (Morrison *et al.*, 2015). Dans cette zone, les phénomènes d'upwelling exposent les eaux profondes préindustrielles à des fortes concentrations en CO₂ atmosphérique au niveau de la surface. L'accaparement de carbone dans ces régions reflète alors un équilibre subtil entre un stockage de grande ampleur du carbone anthropique, et un dégazage plus limité de carbone naturel. L'avenir de cet équilibre est cependant obscur ; le prédire nécessite une plus grande compréhension des dynamiques physiques et biogéochimiques qui gouvernent l'océan Austral.

Le taux de formation des eaux intermédiaires et profondes dans les hautes latitudes, et, de même, celui des phénomènes d'upwelling dans l'océan Austral, exercent aussi un contrôle majeur sur la concentration de CO₂



océanique. Ainsi, un stockage substantiel de CO_2 se produit grâce au transport vers les pôles (et donc au transfert de chaleur, de l'océan vers l'atmosphère, qui en découle) et au mélange vertical aux hautes latitudes (Gruber *et al.*, 2001). La descente de ces eaux ventile l'océan intérieur, dans lequel la respiration microbienne consomme en continu l' O_2 issu de la reminéralisation de la matière organique des eaux plongeantes. Le réchauffement de la surface de l'océan entraîne une plus faible solubilité des gaz dans l'eau et en affaiblit ainsi sa ventilation en diminuant sa teneur en oxygène. Une telle diminution dans la disponibilité en oxygène de l'océan a été observée dans plusieurs régions du globe, posant de sérieux problèmes pour les écosystèmes marins, les cycles biogéochimiques, et les pêcheries mondiales (Keeling *et al.*, 2010). Comprendre l'origine de ce déclin en oxygène océanique et tenter de le prédire restent cependant un défi. La teneur en oxygène est en effet étroitement liée à la circulation océanique et à la variabilité naturelle, qui ne sont encore ni bien observées, ni bien comprises.

Des variations dans la circulation océanique auront également une influence sur le taux d'approvisionnement en nutriments, des profondeurs jusqu'à la surface. Une fois de plus, l'océan austral joue un rôle majeur dans cet équilibre, car ses zones d'upwelling fournissent 75 % des nutriments utilisés par la production primaire globale (Morrison *et al.*, 2015). Les dynamiques de la circulation océanique globale ont ainsi des implications décisives pour la productivité primaire marine, origine de la vie dans l'océan.

OBSERVER LA CIRCULATION OCÉANIQUE: UN DÉFI MAJEUR

Observer la circulation océanique est un défi en soi, notamment à cause de ses lentes réponses temporelles et ses larges empreintes spatiales (Abraham *et al.*, 2013). Cependant, de récents efforts en faveur des systèmes d'observation ont fortement amélioré notre compréhension de la circulation océanique. Les observations satellitaires altimétriques de la surface de l'océan, par exemple, ont apporté des informations primordiales sur la vitesse des champs de surface, ainsi que sur la variabilité spatiotemporelle de la circulation poussée par les vents (Rhein *et al.*, 2013). Le World Ocean Circulation Experiment (WOCE), par exemple, a permis de mieux

cerner les composantes et la structure de la CMR, grâce à des mesures hydrographiques de la température, de la salinité, de l' O_2 , des nutriments, etc. Ces données, bien qu'essentielles pour comprendre la CMR, n'en donnent qu'un aperçu dans une région donnée et pour une période particulière. L'observation de la CMR reste donc toujours largement incomplète, et les zones d'ombres concernant sa variabilité spatiotemporelle persistent.

Récemment, le programme de surveillance continue par capteurs RAPID/MOCHA, utilisant 19 amarres situées le long du 26.5°N de latitude de l'Atlantique (Smeed *et al.*, 2016), a apporté des informations nouvelles sur la CMR atlantique (CMRA). La figure 3 montre la variabilité de la CMRA et de ses composants, sur des échelles de temps mensuelles et annuelles. Par exemple, une réduction de l'amplitude de la CMR de presque 50 % a été observée entre 2006 et 2010, suivie par un recouvrement rapide mais partiel en 2011. Une grande partie de cette variabilité est due à des variations dans le transport vers le sud de la NADW.

Aucune tendance de long terme dans l'intensité de la CMR n'a été détectée jusqu'à présent (Rhein *et al.*, 2013). Cependant, les données d'observation restent encore trop restreintes pour traiter les conséquences à long-terme. Les séries temporelles continues de données, comme celles fournies par les capteurs RAPID/MOCHA, sont fondamentales pour évaluer des tendances séculaires, qu'elles soient liées au changement climatique anthropique ou à la variabilité naturelle du climat. Par ailleurs, les progrès récents et l'expansion des programmes de la flotte Argo commencent à peindre une image tridimensionnelle globale de la circulation océanique (Roemmich and Gilson, 2009). Ensemble, ces observations n'offrent pas seulement une richesse d'informations sur la CMR, mais permettent aussi de tester efficacement la validité des modèles du climat global (Danabasoglu *et al.*, 2014).

LA CMR DANS UN MONDE EN RÉCHAUFFEMENT: DES PROJECTIONS POUR LE FUTUR

Avec l'accumulation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, un affaiblissement de la CMR est attendu dans le futur. En effet, le réchauffement et la fonte des

glaces dans les hautes latitudes réduisent la densité des eaux de surface, et intensifient la stratification de la colonne d'eau. Si un effondrement complet de la CMRA est improbable, les modèles climatiques en prédisent tout de même un affaiblissement de l'ordre de 34 % d'ici à 2100, pour un scénario d'émissions fortes (RCP 8.5) (Collins *et al.*, 2013). L'amplitude de cet affaiblissement n'est pas connue avec précision mais le futur de la CMR (et de son rôle dans le stockage de la chaleur et du carbone anthropique) reste très incertain (Stocker, 2013).

Dans l'océan Austral, les vents d'ouest autour du continent de l'Antarctique s'intensifient et se contractent vers le pôle. En réponse, le courant circumpolaire antarctique devrait lui aussi se rapprocher du pôle. Ce déplacement devrait alors intensifier le transport d'Ekman en direction de l'équateur et accentuer la remontée de masses d'eaux profondes et chaudes, produisant un réchauffement plus marqué

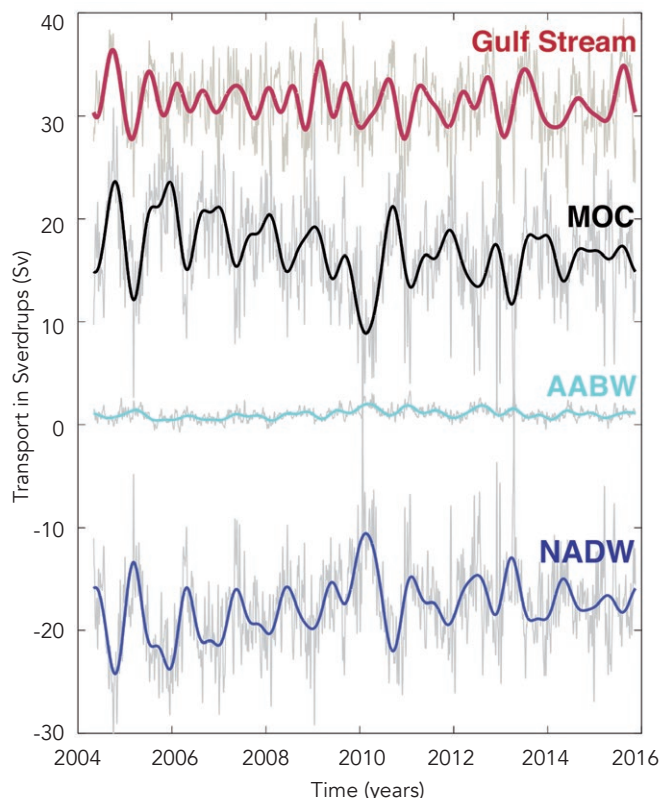


Fig.3 – Cette figure présente les séries temporelles de l'AMOC et de ses composants à 26.5°N, se dirigeant vers le nord, en Sverdrups (1 Sverdrup = 10^6 m³/s). Les lignes en gras indiquent les données lissées sur 6 mois. Les données proviennent des capteurs RAPID/MOCHA (www.rapid.ac.uk). [AABW = eaux profondes de l'Arctique (cyan); MOC = circulation méridienne de retournement (noir); NADW = eaux profondes de l'Atlantique nord (bleu); et Gulf Stream (rouge)]. © B. Delorme et Y. Eddebbar.

entre les latitudes 40°S et 60°S (Collins *et al.*, 2013). Enfin, l'augmentation de la température diminuant la densité de l'eau, la formation de l'AABW et sa descente dans les abysses (en direction du nord) pourrait également s'affaiblir.

De plus, le réchauffement climatique modifie fortement les interactions physiques des hautes latitudes. Par exemple, les interactions entre calotte polaire et circulation océanique ont des répercussions importantes pour le climat et les sociétés humaines. L'intrusion de courants chauds, piégés sous les glaces, accélère significativement la fonte basale (Shepherd *et al.*, 2012). Cet apport d'eau douce fait apparaître un couvercle d'eau froide peu salée à la surface de l'océan, ce qui augmente sa stratification et empêche les eaux intérieures plus chaudes de remonter à la surface (Hansen *et al.*, 2016). Le surplus de chaleur sous la surface est alors entièrement disponible pour faire fondre la banquise. Ceci accentue alors le phénomène de stratification, créant ainsi une boucle de rétroaction positive qui s'alimente par elle-même. De plus, la formation de crevasses au niveau des glaciers, due au réchauffement de l'air à la surface accélère également la fonte des glaces, participant ainsi à l'augmentation du niveau de la mer (DeConto and Pollard, 2016). Ces dernières années, de tels processus de rétroaction font l'objet de recherches, de modélisations et d'observations intensives. Ces dernières pourraient apporter des éléments clés pour les modèles climatiques globaux, qui, à l'heure actuelle, ne prennent pas en compte l'interaction océan-calottes glaciaires, du fait de leurs larges résolutions (Winton *et al.*, 2014).

Comprendre le passé, le présent, et l'avenir de la CMR est crucial pour anticiper le changement climatique du ^{xxi}e siècle. De tels développements seront uniquement rendus possibles par la surveillance continue de la CMR, par une meilleure compréhension des mécanismes de la circulation océanique et de ses interactions avec la cryosphère, ainsi que par l'intégration de ces processus dans les modèles climatiques. La température globale et la concentration en carbone de l'atmosphère étant étroitement liées à la CMR, prendre cette dernière en compte pour définir les stratégies d'atténuation et d'adaptation de long terme est aujourd'hui indispensable.

REMERCIEMENTS

Les auteurs expriment leur profonde gratitude aux professeurs Alain Colin de Verdiere et Leif N. Thomas, ainsi qu'à Clara Grillet et à Marion Grange, pour leur précieuse relecture de ce papier. Ce travail n'aurait pu être mené sans leur contribution et leurs conseils. Les auteurs souhaitent également remercier l'ensemble des étudiants de la Plateforme Océan et Climat pour leurs échanges enrichissants. Ce papier est basé sur le travail de la National Science Foundation Graduate Research Fellowship sous Grant No. DGE-1144086 for Y.E. Le RAPID-WATCH MOC monitoring project est financé par le Natural Environment Research Council et les données sont accessibles gratuitement sur www.rapid.ac.uk/rapidmoc.

RÉFÉRENCES

- ABRAHAM J. P. et al., 2013 – *A Review of Global Ocean Temperature Observations: Implications for Ocean Heat Content Estimates and Climate Change*. Rev. Geophys., 51, 450 – 483.
- ARMOUR K.C., MARSHALL J., SCOTT J., DONOHOE A. and NEWSOM E.R., 2016 – *Southern Ocean Warming Delayed by Circumpolar Upwelling and Equatorward Transport*. Nature Geoscience, 9, 549 – 554.
- BALMASEDA M. A., TRENBERTH K. E. and KALLENE., 2013 – *Distinctive Climate Signals in Reanalysis of Global Ocean Heat Content*. Geophys. Res. Lett., 40, 1754 – 1759.
- CHEN X. and TUNG K. K., 2014 – *Varying Planetary Heat Sink Led to Global-Warming Slowdown and Acceleration*. Science, 345, 897 – 903.
- COLLINS M. et al., 2013 – *Long-Term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility*. 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, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- DANABASOGLU G. et al., 2014 – *North Atlantic simulations in Coordinated Ocean-ice Reference Experiments phase II (CORE-II). Part I: Mean states*. Ocean Modelling, 73, 76-107.
- DECONTO R.M. and POLLARD D., 2016 – *Contribution of Antarctica to Past and Future Sea-Level Rise*. Nature, 531 (7596), pp.591 – 597.
- DRIJFHOUT S. S., BLAKERA. 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*. Geophys. Res. Lett., 41, 7868 – 7874.
- DUTEIL O., BÖNING C. W. and OSCHLIES A., 2014 – *Variability in Subtropical-Tropical Cells Drives Oxygen Levels in the Tropical Pacific Ocean*. Geophysical Research Letters, 41 (24). pp. 8926-8934.
- ENGLAND M. H., MCGREGOR S., SPENCE P., MEEHL G. A., TIMMERMAN A., CAI W., SEN GUPTA A., MCPHADEN M. J., PURICH A. and SANTOSO A., 2014 – *Recent Intensification of Wind-Driven Circulation in the Pacific and the Ongoing Warming Hiatus*. Nature Climate Change, 4, 222-227.
- HANSEN J. et al., 2016 – *Ice Melt, Sea Level Rise and Superstorms: Evidence from Paleoclimate Data, Climate Modeling, and Modern Observations that 2 °C Global Warming Could Be Dangerous*. Atmospheric Chemistry and Physics, 16 (6), pp. 3761 – 3812.
- HUGHES G. and GRIFFITHS R., 2005 – *A Simple Convective Model of the Global Overturning Circulation, Including Effects of Entrainment into Sinking Regions*. Ocean Modelling, 12 (1-2), pp.46 – 79.
- KEELING R. F., KORTZINGER A. and GRUBER N., 2010 – *Ocean Deoxygenation in a Warming World*. Annu. Rev. Mar. Sci., 2, 199 – 229.
- KOSAKA Y. and XIE S.-P., 2016 – *The Tropical Pacific As a Key Pacemaker of the Variable Rates of Global Warming*. Nature Geosci., 9.
- KOSTOV Y., ARMOUR K. C. and MARSHALL J., 2014 – *Impact of the Atlantic Meridional Overturning Circulation on Ocean Heat Storage and Transient Climate Change*. Geophys Res. Lett., 41.

- LEDWELL J. R. et al., 2011 – *Diapycnal Mixing in the Antarctic Circumpolar Current*. Journal of Physical Oceanography, 41, pp. 241 – 246.
- LEQUÉRE C. et al., 2013 – *The Global Carbon Budget 1959-2011*. Earth System Science Data, 5 (1), pp.165 – 185.
- LUMPKIN R. and SPEER K., 2007 – *Global Ocean Meridional Overturning*. J. Phys. Oceanogr., 37, 2550 – 2562.
- MARSHALL J. and SPEER K., 2012 – *Closure of the Meridional Overturning Circulation Through Southern Ocean Upwelling*. Nature Geoscience, 5 (3), pp.171 – 180.
- MEEHL G. A., ARBLASTER J. M., FASULLO J. T., HU A. and TRENBERTH K. E., 2011 – *Model-Based Evidence of Deep-Ocean Heat Uptake During Surface-Temperature Hiatus Periods*. Nature Climate Change.
- MORRISON A. K., FRÖLICHER T. L. and SARMIENTO J. L., 2015 – *Upwelling in the Southern Ocean*. Physics Today, 68 (1), 27-32. Munk, W., 1966. Abyssal Recipes, Deep-Sea Res., 13, pp. 707 – 730.
- MUNK W. and WUNSCH C., 1998 – *Abyssal Recipes II: Energetics of Tidal and Wind Mixing*. Deep-Sea Res., 145, pp.1970 – 2010.
- 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 [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- ROEMMICH D. and GILSON J., 2009 – *The 2004-2008 Mean and Annual Cycle of Temperature, Salinity, and Steric Height in the Global Ocean from the Argo Program*. Progress in Oceanography. 82: 81-100.
- SEND U. and MARSHALL J., 1995 – *Integral Effects of Deep Convection*. J. Phys. Oceanogr., 25, pp. 855 – 872.
- SHEPHERD A. et al., 2012 – *A Reconciled Estimate of Ice-Sheet Mass Balance*. Science, 338, pp.1183 – 1189.
- SMEED D., MCCARTHY G., RAYNER D., MOAT B. I., JOHNS W. E., BARINGER M. O. and MEINEN C. S., 2016 – *Atlantic Meridional Overturning Circulation Observed by the RAPID-MOCHA-WBTS (RAPID-Meridional Overturning Circulation and Heatflux Array-Western Boundary Time Series) Array at 26N from 2004 to 2015*. British Oceanographic Data Centre - Natural Environment Research Council, UK.
- STOCKER T. F. et al., 2013 – *Technical Summary*. 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 [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- TALLEY L., 2013 – *Closure of the Global Overturning Circulation rough the Indian, Pacific, and Southern Oceans*. 26 (1), pp. 80 – 97.
- TALLEY L., PICKARD G., EMERY W. and SWIFT J., 2011 – *Descriptive Physical Oceanography: an Introduction*. Sixth Edition. Elsevier, Boston, MA.
- TOGGWEILER J. R. and SAMUELS B., 1995 – *Effect of Drake Passage on the Global Thermohaline Circulation*. Deep-Sea Res. I 42, 477 – 500.
- WINTON M. et al., 2014 – *Has Coarse Ocean Resolution Biased Simulations of Transient Climate Sensitivity?* Geophysical Research Letters, 41 (23), pp. 8522 – 8529.



L'océan est à bout de souffle

Kirsten Isensee,
Lisa A. Levin,
Denise Breitburg,
Marilaure Gregoire,
Véronique Garçon
et 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 migra-

tion 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 exponentiellement depuis les années 1960 avec actuellement plus de 479 systèmes recensés comme étant hypoxiques (e.g. la mer Noire, la mer Baltique, le 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



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).

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 (EBUSs pour « *Eastern Boundary 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

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

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 du fait de l'influence de la température sur la solubilité de l'oxygène dans l'eau. Le réchauffement de l'océan accroît la stratification due aux différences de densité. En effet, la fonte des glaces et les précipitations modifient la température et la salinité de l'eau. Une stratification a pour conséquence de réduire la ventilation (et donc l'oxygénation) interne des océans (Keeling *et al.*, 2010; Stramma *et al.*, 2008a, 2008b, 2010) et des estuaires (Altieri and Gedan 2014). Par ailleurs, le réchauffement augmente la demande métabolique des organismes et les taux de reminéralisation. Cela tire vers le bas les niveaux d'oxygène. En pleine mer, et en particulier dans le Pacifique nord, les apports atmosphériques de fer et d'azote renforcent la production primaire. Enfin, la décomposition microbienne consomme l'oxygène additionnel (Ito *et al.*, 2016). Le long des bords est des marges continentales, le réchauffement atmosphérique crée des différentiels thermiques entre la terre et la mer qui accentuent les upwellings, ce qui provoque des apports de nutriments plus importants (et la réduction de la production et des processus biogéochimiques associés), ainsi qu'une advection ascensionnelle d'eaux faibles en oxygène (Bakun 1990, 2015; Sydeman *et al.*, 2014; Wang *et al.*,

2015). Le réchauffement pourrait induire une autre source de consommation d'oxygène dans les eaux des marges profondes: la dissociation du méthane enfoui et gelé des hydrates de gaz (Phrampus and Hornbach 2012). L'oxydation aérobie du méthane dans la colonne d'eau devrait épuiser encore davantage les niveaux d'oxygène des eaux intermédiaires (Boetius and Wenzhoffer 2013). Dans plusieurs régions, l'altération liée au climat des schémas de circulation peut intensifier l'hypoxie, soit en renforçant les sous-courants pauvres en oxygène, soit en affaiblissant les courants transporteurs d'oxygène (Gilbert *et al.*, 2005, Bograd *et al.*, 2015, Nam *et al.*, 2015). En revanche, les prévisions d'une augmentation de la fréquence et de l'intensité des cyclones et des ouragans pourraient favoriser le mélange vertical. Cela pourrait atténuer localement l'hypoxie (Rabalais *et al.*, 2009). Le réchauffement devrait aussi allonger les phases d'hypoxie saisonnière (ou avancer leur apparition), et potentiellement renforcer l'impact des efflorescences algales nuisibles (HABs) qui consomment de l'oxygène en se décomposant (Wells *et al.*, 2015).

Diverses variations dans le climat peuvent exacerber l'apport de nutriments, contribuant ainsi à l'hypoxie. La montée du niveau de la mer pourrait de façon indirecte faire disparaître les zones humides, supprimant l'apport de nutriments dû à l'écoulement des eaux vers l'océan côtier. Outre le réchauffement, la concentration de CO_2 dans l'atmosphère peut altérer le fonctionnement des pores des plantes. Elles utilisent alors l'eau de manière plus efficace et libèrent

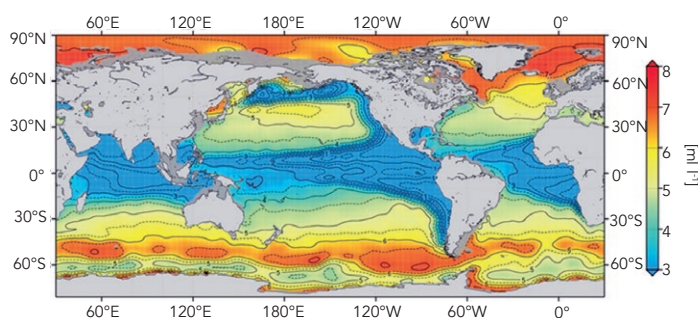


Fig.2 — Concentration d'oxygène (valeur moyenne annuelle, en ml l^{-1}) à une profondeur de 200 m (résolution $1^\circ\text{gré} \times 1^\circ\text{gré}$, espacement des isocourbes: $0,5 \text{ ml l}^{-1}$) (World Ocean Atlas 2013, Garcia *et al.*, 2014).

3 à 6 % d'écoulement d'eau en plus; une eau qui accumule des nutriments avant d'atteindre l'océan (Reay *et al.*, 2009). Enfin, la hausse des précipitations peut contribuer à l'hypoxie en intensifiant les écoulements d'eau, la fonte des neiges, l'érosion du sol, et la stratification. (<http://nca2014.globalchange.gov>).

Des travaux récents suggèrent une expansion potentielle de l'hypoxie côtière. Les OMZs pourraient avoir de larges effets sur les espèces commerciales de poissons, en réduisant la taille des habitats naturels, en altérant les réseaux trophiques, ou en modifiant les interactions entre espèces (y compris avec les pêcheurs). L'effet combiné du réchauffement et de la désoxygénation sur l'indice métabolique des poissons et des invertébrés devrait réduire la taille des habitats naturels et la distribution spatiale des espèces. Même à des niveaux non-létaux, l'exposition à des concentrations faibles en oxygène dissous peut ralentir la croissance, freiner la reproduction, réduire la taille, altérer les comportements et les distributions d'espèces (Cheung *et al.*, 2013). Cela veut dire que l'on s'attend à ce que la désoxygénation de l'océan maintienne une pression croissante sur les écosystèmes aquatiques vivant dans les habitats côtiers et l'océan profond.

Cette expansion 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 diminuer à fournir un environnement favorable à la vie.

À plus grande échelle, plusieurs synthèses globales des données collectées sur l'oxygène océanique montrent que l'étendue des eaux hypoxiques s'est accrue de 4,5 millions de km², à 200 m de profondeur (Stramma *et al.*, 2010). On constate notamment des pertes généralisées dans l'océan Austral (Helm *et al.*, 2011), le Pacifique ouest (Takatani *et al.*, 2012), et l'Atlantique nord (Stendardo and Gruber, 2012). La diminution de la teneur en oxygène a été globalement plus importante dans les zones côtières qu'en haute mer (Gilbert *et al.*, 2010), et souvent plus forte dans les eaux littorales qu'offshore (Bograd *et al.*, 2015).

Les résultats obtenus par modélisation ne sont pas complètement superposables aux données historiques d'oxygène des 40 dernières années (Cabrè *et al.*, 2015); cela signifie que nous devons encore améliorer notre compréhension des mécanismes en jeu dans la distribution de l'oxygène de l'océan global.

Les projections obtenues par 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). De récents efforts ont permis de modéliser la désoxygénation, tout en prenant en compte la variabilité naturelle, afin de prédire à partir de quand apparaîtra la désoxygénation dans les différentes parties de l'océan global (Fig. 3; Long *et al.*, 2016). 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 ma-

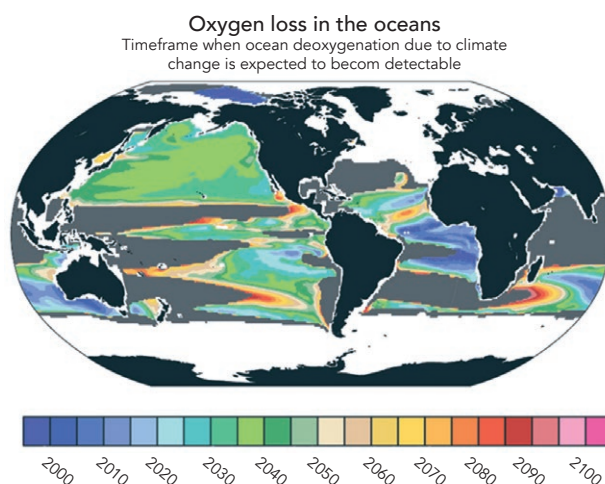


Fig.3 — Année à partir de laquelle la désoxygénation sera détectable en fonction des régions de l'océan, en prenant en compte la variabilité naturelle (from Long *et al.*, 2016).

rins 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 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 socio-économique 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 résultant 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. Il y a moins d'information 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'oxy-

gène océanique et permettrait d'identifier les lacunes dans notre connaissance afin d'orienter les recherches futures. Un nouvel effort 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 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 désoxy-



génération 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 (AMP), 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.

Les défis 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.
- BAKUN A., BLACK B.A., BOGRAD S.J., GARCIA-REYES M., MILLER A.J., RYKACZEWSKI R.R. and SYDEMAN W.J., 2015 – *Anticipated Effects of Climate Change on Coastal Upwelling Ecosystems*. Current Climate Change Reports 2, 85-93.
- BOETIUS A. and WENZHÖFER F., 2013 – *Seafloor Oxygen Consumption Fueled by Methane From Cold Seeps*. Nature Geoscience doi: 10.1038/ngeo1926.
- 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 CMIP5 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.
- BREITBURG D.L., SALISBURY J., BERNHARD J.M., CAI W.J., DUPONT S., DONEY S., KROEKER K., LEVIN L.A., LONG C., MILKE L.M., MILLER S.H., PHELAN B., PASSOW U., SEIBEL B.A., TODGHAM A.E. and TARRANT A., 2015 – *And on Top of All That... Coping with Ocean Acidification in the Midst of Many Stressors*. Oceanography 28: 48-61 (2015)
- 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.
- CHEUNG W.L. et al. – *Shrinking of Fishes Exacerbates Impacts of Global Ocean Changes on Marine Ecosystems*. Nature Climate Change 3, DOI: 10.1038/NCLIMATE1691.
- DEUTSCH C., FERREL A., SEIBEL B., PORTNER H.O. and HUEY R.B., 2015 – *Climate Change Tightens a Metabolic Constraint on Marine Habitats*. Science 348, 1132-1145.
- 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.
- GATTUSO J.P. et al. – *Contrasting Futures for Ocean and Society from Different Anthropogenic CO₂ Emissions Scenarios*. Science 349, DOI: 10.1126/science.aac4722.
- GILBERT D., SUNDBY B., GOBEIL C., MUCCI A. and TREMBLAY G.H., 2005 – *A Seventy-Two Year Record of Diminishing Deep-Water Oxygen in the St. Lawrence Estuary: the Northwest Atlantic Connection*. Limnol. Oceanography, 50, pp. 1654-66.
- GILBERT D., RABALAIS N.N., DIAZ R.J. and ZHANG J. – *Evidence for Greater Oxygen Decline Rates in the Coastal Ocean than in the Open Ocean*. Biogeosciences, 7, pp. 2283-2296.
- 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.
- HELM K.P., BINDOFF N.L. and CHURCH J.A., 2011 – *Observed Decreases in Oxygen Content of the Global Ocean*. Geophys. Res. Lett. 38, DOI: 10.1029/2011GL049513.
- ITO T., NENES A., JOHNSON M.S., MESKHIDZE M. and DEUTSCH C., 2016 – *Acceleration of Oxygen Decline in the Tropical Pacific over the Past Decades by Aerosol Pollutants*. Nature Geoscience 9, 443-447.
- 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. and 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.
- LEVIN L.A. and LE BRIS N., 2015 – *Deep Oceans under Climate Change*. Science 350: 766-768.
- LONG M.C., DEUTSCH, C. and ITO T., 2016 – *Finding Forced Trends in Oceanic Oxygen*. Global Biogeochem. Cycles, 30, pp. 381 – 397.
- MATEAR R.J., HIRST A.C. and 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., BILLETT 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.
- REAY D.S., DENTENER F., SMITH P., GRACE J. and FEELY R., 2015 – *Global Nitrogen Deposition and Carbon Sinks*. Nature Geosciences, 1, pp. 430-37.
- 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.
- SPERLING E.A., FRIEDER C.A. and LEVIN L.A. – *Biodiversity Response to Natural Gradients of Multiple Stressors on Continental Margins*. Proceeding Royal Society B. 283: 20160637
- 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.
- STENDARDO I. and GRUBER N., 2012 – *Oxygen Trends Over Five Decades in the North Atlantic*. J. Geophys. Res., 117, doi: 10.1029/2012JC007909.
- SYDEMAN W.J., GARCÍA-REYES M., SCHOEMAN D.S., RYKACZEWSKI R.R., THOMPSON S.A., BLACK B.A. and BOGRAD S.J., 2014 – *Climate Change and Wind Intensification in Coastal Upwelling Ecosystems*. Science, 345 (6192), 77-80.
- TAKATANI Y., SASANO D., NAKANO T. and MIDORIKAWA T., 2012 – *Decrease of Dissolved Oxygen After the Mid-1980S in the Western North Pacific Subtropical Gyre Along the 137°E Repeat Section*. Global Biogeochemical cycles 26, GB2013, doi: 10.1029/2011GB004227.
- 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.
- WELLS M.L. et al., 2015 – *Harmful Algal Blooms and Climate Change: Learning from the Past and Present to Forecast the Future*. Harmful Algae 49 (2015) 68 – 93.
- WORLD RESOURCES INSTITUTE – www.wri.org/our-work/project/eutrophication-and-hypoxia/interactive-map-eutrophication-hypoxia.



Océan, biodiversité et climat

Gilles Bœuf

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, ce qui nous amène à penser beaucoup plus en océan global. Un autre trait particulier est sa salinité par rapport aux autres eaux libres sur la planète. Celle-ci est extrêmement stable au large (35 psu¹, 1050 mOsm.l⁻¹) et la composition de l'eau océanique est la même partout, et ceci depuis des dizaines de millions d'années. L'océan est ainsi un milieu très stable.

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 re-

lations établies entre les êtres vivants 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 3850 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, dont on connaît de très beaux gisements en Australie, et plus récemment ceux qui

1 Practical salinity unit



viennent d'être découverts au Groenland (3 700 Ma), sont très précieux car ils contiennent dans leurs parties silicifiées les plus anciens fossiles de micro-organismes connus, des cyanobactéries. Celles-ci sont parties à la conquête généralisée de l'océan vers 3700-3200 Ma, alors qu'il n'y avait pas encore d'oxygène atmosphérique. Grâce à leurs pigments spécifiques ces cellules, en présence d'eau, ont alors développé la photosynthèse, qui produit de l'oxygène et des sucres à partir de la lumière et du dioxyde de carbone (CO_2), et ceci avant 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.

Dans cet océan ancestral se sont produits des événements déterminants pour le vivant et la biodiversité: (1) l'apparition de la membrane nucléaire et du noyau individualisé (transition procaryote-eucaryote) vers 2 200 Ma; (2) la capture de cyanobactéries ambiantes qui deviendront des symbiotes et les organites de la cellule, la mitochondrie et le plaste, avec leur propre petit ADN, respectivement vers 2 100 et 1 400 Ma; (3) l'apparition des pluricellulaires et métazoaires vers 2 100 Ma. Il s'y produira aussi un fait exceptionnel, dans cet océan ancestral, c'est l'apparition de la sexualité, tout d'abord chez les procaryotes, plus tard aussi chez les eucaryotes, qui se révélera si importante pour l'explosion de la biodiversité. La reproduction sexuée permet un brassage génétique créateur de nouveauté et d'une diversité sans précédent: tous les individus sont différents. Une population pourvue de sexualité évolue beaucoup plus vite. De plus, la prévalence de la sexualité permet le développement de la « course aux armements » des parasites et de leurs hôtes (co-évolution et dialogue moléculaire, le brassage génétique permettant à terme plus rapidement de « désarmer » le parasite et une sélection sexuelle, bien différente de la sélection naturelle.

Les conséquences physiques des « flux » osmotiques (eau et électrolytes) en environnement marin ont conduit le vivant à deux types de stratégies: (1) dans l'immense majorité des cas, de la première cellule initiale aux crustacés, une régulation isos-

motique intra-cellulaire, entraînant pour l'organisme vivant, séparé de l'eau de mer par une membrane biologique, la même pression osmotique (de l'ordre de 1 000 mOsm.l⁻¹) à l'intérieur (milieux intra-cellulaire et « intérieurs », extracellulaire) que celle de l'eau de mer, (2) plus tard, à partir des arthropodes, une régulation anisosmotique extracellulaire pour laquelle les cellules et fluides internes sont beaucoup moins concentrés (3-400 mOsm.l⁻¹) que l'eau de mer. Ceci permettra la sortie de l'océan. Le comportement perpétuel de boisson en mer, chez un poisson osseux par exemple, associé à des mécanismes très actifs d'excrétion des électrolytes par la branchie, l'amène constamment à trouver un délicat compromis, entre une surface maximale de branchie à développer pour aller capter l'oxygène dans un milieu pauvre et très changeant et par ailleurs une surface minimale pour éviter de graves déséquilibres hydro-minéraux.

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

SPÉCIFICITÉS DE LA BIODIVERSITÉ MARINE

La biodiversité marine est bien particulière. La diversité spécifique connue dans les océans ne dépasse pas 13 % de l'ensemble des espèces vivantes actuellement décrites, soit moins de 270 000. Ceci est peu et peut être lié à deux raisons. La première c'est que les connaissances, surtout pour les zones pro-

fondes et pour les micro-organismes, bactéries et protistes divers, ne sont encore que très partielles : nous sous-estimons donc considérablement la biodiversité océanique. Les nouveaux moyens, comme le couplage entre la cytométrie en flux et les sondes moléculaires permettent la découverte d'une extraordinaire diversité biologique. Les séquençages massifs actuels de la masse d'eau océanique, le « séquençage de mers » (C. Venter, séquençage de tout l'ADN dans un volume d'eau de mer filtrée) apportent des données apparaissant pour la plupart inconnues. La navigation circum-océanique Tara Océans nous a fourni en 2015 des informations très précieuses sur l'abondance et la variété des virus, bactéries et protistes, en particulier des dinoflagellés. Ces protistes pourraient représenter près d'un million d'espèces. 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 co-évolution 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 agro-nomiques ou biomédicales et enfin (4) la mise en place de stratégies de conservation pour préserver et maintenir un patrimoine naturel constituant un héritage naturellement attendu par/pour les générations futures.

À partir de cette biodiversité, les humains pêchent depuis des temps ancestraux, certainement des dizaines de milliers d'années. Dès qu'ils sont parvenus sur des rivages, ils se sont mis à collecter des coquillages, des algues, à piéger des poissons... Comme en agriculture et dans les milieux continentaux, l'humain s'est aussi mis à élever certaines espèces marines sur les littoraux et ceci depuis au moins 4000 ans (Égypte, Chine...). L'exploitation des ressources vivantes aquatiques renouvelables est en plein essor, mais avec de sérieuses inquiétudes sur sa durabilité. Les derniers chiffres disponibles de la FAO en 2013, pour l'année 2012, donnent des valeurs de 79,9 millions de tonnes (Mt) pour les pêches maritimes, 11,5Mt 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. En réponse au réchauffement de la masse d'eau, les stocks halieutiques remontent en moyenne de 72 km

vers le nord tous les 10 ans dans l'hémisphère nord et la surpêche mondiale est très préoccupante: on a extirpé de l'océan entre 50 et 90 % de tous les grands individus des poissons pélagiques en 15 ans! Les $\frac{3}{4}$ de tous les stocks sont pleinement exploités ou surexploités (29 %). L'aquaculture est en plein essor mais pose toujours les questions d'impacts environnementaux, de transplantations d'espèces et, pour certains types d'activités, d'usage de protéines animales dans l'alimentation des espèces d'intérêt (elles sont carnivores). L'océan vivant, ce ne sont pas que ces ressources, ce sont aussi de l'ordre de 25 000 molécules présentes dans les organismes, 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 (93 %) 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 CO₂ (26 %) 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 CO₂ dans la couche de surface ainsi que tous les bio-calcalcificateurs. Les transports océaniques redistribuent ainsi chaleur et salinité, ces deux effecteurs contrôlant grandement la machine climatique. Les courants des bordures ouest et est des continents jouent un rôle déterminant et leurs fluctuations dans le passé ont conduit aux alternances des phases glaciaires.

Si l'océan joue ainsi un rôle essentiel sur le climat, les pertes en diversité biologique et les pollutions altèrent aussi l'océan et causent des conditions de dérèglement climatique en retour. La 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 de l'océan 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. Cette pollution est massive et généralisée, dans tous les endroits du globe, l'humain étant capable de contaminer des zones où il n'est même pas (Arctique et Antarctique)! Les microparticules de plastiques se sont accumulées, sous l'influence des gyres océaniques en gigantesques concentrations dans cinq zones de l'océan mondial. Aucun effluent souillé ne devrait plus parvenir à la mer!

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). Il est aussi très important de légiférer astucieusement avant toutes exploitations minérales profondes, le milieu profond étant particulièrement fragile, de par sa très longue stabilité.

Cela fait beaucoup et il est grand temps de réagir!

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-Calédonie qui mesure 1 600 km de long. Ces deux barrières récifales sont inscrites au Patrimoine Mondial de l'UNESCO (respectivement en 1981 et 2008).



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

- Récifs frangeants (« *fringing reefs* »): ils bordent les côtes et maintiennent une zone active de croissance vers le large et une accumulation de coraux morts du côté terre, formant un platier qui devient avec le temps un lagon.
- 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 mm à plus de 10 cm. De nombreux facteurs influencent ces taux de croissance: lumière, température (optimale entre 22°C 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 zoophytes en raison de leur ressemblance aux plantes, puis madréporaires,

les coraux constructeurs de récifs sont aujourd'hui inclus au sein de l'ordre des Scléractiniaires (sous-classe des Hexacoralliaires, classe des Anthozoa, 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). Il existe à ce jour 9 clades de zooxanthelles qui sont potentiellement des espèces différentes (Pochon & Gates 2010). Chacune d'elles présente des caractéristiques propres, suggérant qu'elles pourraient conditionner l'adaptation des coraux à un environnement donné. 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-violets, 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 distribution 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 et bourgeonnement, 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 trélangs 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 20 000 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 54 000 emplois (Biggs, 2011). Un hectare de corail rapporte chaque année 64 000 à 80 000 euros en opportunités pour le tourisme et les loisirs, selon les estimations compilées par le rapport TEEB. Le seul écotourisme rapporte 800 000 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).

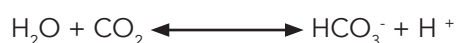
LE RÉCIF CORALLIEN : MENACES LOCALES ET GLOBALES

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 50,7 % de la couverture corallienne initiale.

Parmi les événements globaux qui affectent les récifs, l'augmentation de la température des eaux de surface provoque un phénomène à grande échelle, appelé 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 CO_2 (Erez et al., 2011). Les différences de sensibilité pourraient être dues à une capacité différentielle de l'animal à contrôler le pH de son site de calcification (Holcomb et al., 2014; Venn et al., 2013). Mais l'augmentation de CO_2 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). Le fait que certaines populations de coraux soient capables de résister naturellement à des températures bien plus élevées sans montrer de signe de blanchissement, comme par exemple celles du golfe Persique qui ne commencent à blanchir qu'à des températures supérieures à 34-35°C (Riegl et al., 2011), permet d'espérer qu'une adaptation au réchauffement global est possible. De même, des populations de coraux vivant naturellement à des pH plus acides que la moyenne des océans comme en Papouasie-Nouvelle-Guinée (7,8 par rapport à 8,1) sont tout à fait capables de maintenir une couverture corallienne importante (Shamberger et al., 2014). Malheureusement cette adaptation potentielle à l'acidification des océans ne se retrouve pas sur d'autres sites, comme la Papouasie-Nouvelle-Guinée, où l'on constate au contraire une disparition quasi totale des coraux branchus et une altération profonde du fonctionnement récifal (Fabricius et al., 2011).

RÉFÉRENCES

- ALLEMAND D., FURLA P. and BÉNAZET-TAMBUTTÉ S., 1998 – *Mechanisms of Carbon Acquisition for Endosymbiont Photosynthesis in Anthozoa*. Can J Bot 76: 925-941.
- ALLEMAND D., TAMBUTTÉ É., ZOCCOLA D. and TAMBUTTÉ S., 2011 – *Coral Calcification, Cells to Reefs*. In *Coral Reefs: an Ecosystem in Transition*. Springer Netherlands.
- BARNES D. J. and CHALKER B. E., 1990 – *Calcification and Photosynthesis in Reef-Building Corals and Algae*. In *Coral Reefs*. Amsterdam: Elsevier.
- BIGGS D., 2011 – *Understanding Resilience in a Vulnerable Industry: the Case of Reef Tourism in Australia*. Ecology and Society 16 (1): 30.
- CAIRNS S. D., 1999 – *Species Richness of Recent Scleractinia*. Atoll Res Bull 459: 1-46.
- CAR/ASP, 2003 – *Le coralligène en Méditerranée*. PNUE, 81 pages.
- 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, VA, USA. 23 pages.
- DARWIN C. R., 1842 – *The Structure and Distribution of Coral Reefs. Being the First Part of the Geology of the Voyage of the Beagle, under the Command of Capt. Fitzroy, R.N. during the Years 1832 to 1836*. London: Smith Elder and Co.
- DE'ATH G., FABRICIUS K. E., SWEATMAN H. and PUOTINEN M., 2012 – *The 27-Year Decline of Coral Cover on the Great Barrier Reef and its Causes*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 109 (44), 17995-17999.
- DONEY S. C., V. FABRY J., FEELY R. A. and KLEYPAS J. A., 2009 – *Ocean Acidification: the Other CO_2 Problem*. Ann Rev Marine Sci 1: 169-192.

- DUBINSKY Z. and STAMBLER N., 2011 – *Coral Reefs: an Ecosystem in Transition*. Springer. 552 p.
- 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 DUBINSKY Z. and STAMBLER N. (eds), *Coral Reefs: an Ecosystem in Transition*, Springer Netherlands, pp. 151-176.
- FABRICIUS K. E., LANGDON C., UTHICKE S., HUMPHREY C., NOONAN S. et al., 2011 – *Losers and Winners in Coral Reefs Acclimatized to Elevated Carbon Dioxide Concentrations*. *Nature Clim Change* 1: 165-169.
- 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*. In DUBINSKY Z. and STAMBLER N. (eds), *Coral Reefs: an Ecosystem in Transition*. Springer Netherlands, pp. 187-195.
- GARCIA S. M. and DE LEIVA MORENO J. I., 2003 – *Global Overview of Marine Fisheries*. In SINCLAIR M. and VALDIMARSSON G. (eds), *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.
- GATTUSO J.-P. and HANSSON L., 2011 – *Ocean Acidification*. Oxford University Press. 326 p.
- GOLDBERG W. M., 2013 – *The Biology of Reefs and Reef Organisms*. The University of Chicago Press. 401 p.
- 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 ($\Delta^{13}\text{C}$ and ^{15}N) of Organic Matrix from Coral Skeleton*. *Proc Natl Acad Sci USA* 102: 1525-1530.
- PÊCHEUX M., 2013 – *Review on Coral Reef Bleaching*. Edilivre, 291 p.
- POCHON X. and GATES R. D., 2010 – *A New Symbiodinium Clade (Dinophyceae) from Soritid Foraminifera in Hawaii*. *Molecular Phylogenetics & Evolution*, 56: 492 – 497.
- PORTER J. W. and TOUGAS J. I., 2001 – *Reef Ecosystems: Threats to their Biodiversity*. In *Encyclopedia of Biodiversity*. San Diego: Academic Press, pp. 73-95.
- 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.
- RIEGL B. M., PURKIS S. J., AL-CIBAHY A. S., ABDEL-MOATI M. A. and HOEGH-GULDBERG O., 2011 – *Present Limits to Heat-Adaptability in Corals and Population-Level Responses to Climate Extremes*. *PloS one*. 6 (9): e24802.



- ROBERTS J. M., WHEELER A., FREIWALD A. and CAIRNS S., 2009 – *Cold-Water Corals: the Biology of Deep-Sea Coral Habitats*. Cambridge University Press, 334 p.
- SHAMBERGER K. E. F., COHEN A. L., GOLBUU Y., MCCORKLE D. C., LENTZ S. J. and BARKLEY H. C., 2014 – *Diverse Coral Communities in Naturally Acidified Waters of a Western Pacific Reef*. *Geophys. Res. Lett.*, 41, doi: 10.1002/2013GL058489.
- SHEPPARD C. R. C., DAVY S. K., PILING G. M., 2009 – *The Biology of Coral Reefs*. Oxford University Press, 339 p.
- SMITH S. V. and KINSEY D. W., 1976 – *Calcium Carbonate Production, Coral Reef Growth, and Sea Level Change*. *Science* 194: 937-939.
- SPALDING M. D., RAVILIOUS C. and GREEN E. P., 2001 – *World Atlas of Coral Reefs*. University of California Press, Berkeley, Los Angeles, London. 424 p.
- TAMBUTTÉ S., TAMBUTTÉ É., ZOCCOLA D. and ALLEMAND D., 2008 – *Organic Matrix and Biomineralization of Scleractinian Corals*. In *Handbook of Biomineralization*. In BÄUERLEIN E. (ed), *Handbook of Biomineralization*, Wiley-VCH Verlag GmbH. pp. 243-259.
- 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.
- TEEB, 2010 – *The Economics of Ecosystems and Biodiversity Ecological and Economic Foundations*. Pushpam Kumar, Earthscan, London and Washington.
- 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.
- VERON J. E. N., 1995 – *Corals in Space and Time. The Biogeography & Evolution of the Scleractinia*. Australian Institute of Marine Science.
- VERON J. E. N., 2008 – *A Reef in Time. The Great Barrier Reef from Beginning to End*. The Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, London, England. 289 p.
- 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.
- WILKINSON C., 2008 – *Status of Coral Reefs of the World: 2008*. Global Coral Reef Monitoring Network and Reef and Rainforest Research Centre, Townsville, Australia, 296 p.



Blanchissement des coraux, un réservoir de biodiversité menacé

Depuis une trentaine d'années, la température moyenne des océans ne cesse d'augmenter, ce qui renforce l'intensité, la durée et l'extension du phénomène de blanchissement des coraux. En 2014-2016, suite à une hausse anormale de la température de l'eau de mer accentuée par un épisode *El Niño* très marqué, on constate un événement de blanchissement d'une intensité et d'une ampleur exceptionnelles qui pourrait s'étendre bien au-delà de l'année 2017. Les modèles climatiques prévoient une hausse de la température de surface des océans de 1 à 3 °C d'ici la fin du *xxi*^e siècle, menaçant la survie des récifs du monde entier d'ici 2050. Le degré de résilience des récifs reste faible, voire ponctuel et le stress qu'ils subissent est accentué par d'autres facteurs d'origine anthropique (acidification, hausse du niveau des mers, surexploitation, pollutions...). Pour protéger ce patrimoine naturel dont dépendent plus de 500 millions de personnes dans le monde, il apparaît nécessaire, au-delà des actions locales, de prendre des décisions à l'échelle des gouvernements afin de diminuer l'impact des humains sur le climat.

Malgré leur importance écologique et économique, les récifs coralliens sont, de nos jours, affectés par de nombreux facteurs de stress aussi bien à une échelle locale (surexploitation, techniques de pêche destructrices, pression touristique, pollutions marines, développement côtier) que par des facteurs de stress globaux, telles que la hausse de la température de surface des océans ainsi que l'acidification du milieu marin. Les pressions anthropiques et le changement climatique menacent actuellement la plupart des écosystèmes récifaux dans le monde. À terme, ces facteurs de stress peuvent mener à la rupture de l'association formée entre l'hôte corallien et ses symbiotes photosynthétiques, un phénomène que l'on nomme « blanchissement » (*coral bleaching* en anglais) qui s'apparente, comme le nom l'indique, à une décoloration de l'organisme (perte des symbiotes et/ou des pigments photosynthétiques associés) s'échelonnant sur une période de temps plus ou moins longue. Une diminution modérée de la concentration en symbiotes et/ou en photopigments associés résulte

toutefois d'un phénomène saisonnier et naturel, survenant dès que la température de surface de l'eau de mer excède les moyennes maximales saisonnières et ceci sur une courte période de temps qui varie selon les sites observés. Cependant, depuis une trentaine d'années, la température moyenne des océans ne cesse d'augmenter, dû au réchauffement global, renforçant l'intensité et la durée du phénomène que les scientifiques caractérisent alors de « blanchissement », et qui affecte aujourd'hui les zones récifales du monde entier, du Pacifique à l'océan Indien, en passant par les Caraïbes et la mer Rouge.

LE BLANCHISSEMENT : UN PHÉNOMÈNE RÉCURRENT DANS L'HISTOIRE

Le premier épisode de blanchissement corallien semble avoir été reporté par Yonge et Nicholls sur la Grande Barrière de corail en mars 1929 alors



que la température des eaux de surface atteignait 35 °C, mais il faut attendre le début des années 1980 pour constater une augmentation de la fréquence, de l'intensité et de l'extension des épisodes de blanchissement à travers le monde. En cause, une hausse « record » de la température de surface des océans due au réchauffement climatique, combinée au renforcement du phénomène *El Niño*. Deux événements de blanchissement majeurs ont été reportés en 1998 et 2010. L'épisode de 1998 avait concerné 60 pays et nations insulaires à travers l'océan Pacifique, Indien, Atlantique (Caraïbes), le golfe Persique ainsi que la mer Rouge. Les zones couvrant l'océan Indien avaient été particulièrement touchées, avec plus de 70 % de mortalité observées sur un gradient de profondeur pouvant s'échelonner jusqu'à plus de 50 m. Les fortes anomalies de température de surface de l'océan ont entraîné la perte de plus de 16 % des récifs coralliens à travers le monde. L'année 1998 fut ainsi le premier « épisode de blanchissement global » déclaré par la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). En 2010, à nouveau, un intense phénomène *El Niño* a déclenché un blanchissement extrême des coraux touchant l'ensemble des récifs de la planète avec, pour certaines régions comme l'Asie du sud-est, des conséquences plus importantes en terme d'extension et de mortalité.

2014-2016: UN ÉVÉNEMENT D'UNE INTENSITÉ ET AMPLEUR EXCEPTIONNELLES

L'événement de blanchissement actuel, qui s'étend sur les trois bassins océaniques principaux (Pacifique, Atlantique et Indien) résulte de l'effet combiné d'une hausse anormale de la température de l'eau de mer, accentuée par le réchauffement climatique, et d'un phénomène *El Niño* très marqué, décrit comme l'un des plus intenses jamais observé. Cet événement de blanchissement exceptionnel a débuté en juin 2014 dans la zone ouest du Pacifique, aux abords des Îles de Guam et Mariannes puis s'est étendu jusqu'aux côtes hawaïennes. Il s'est par la suite propagé dans le Pacifique sud, affectant les territoires britanniques de l'océan Indien et la zone des Caraïbes, des Florida Keys, englobant Cuba et la République dominicaine, les Îles Marshall.

En octobre 2015, la NOAA a officiellement annoncé qu'un 3^e événement de blanchissement global était en cours dans les trois bassins océaniques principaux et menaçait 95 % des récifs coralliens américains. À l'issue de l'année 2015, 32 % des récifs à travers le monde avaient été exposés à une anomalie de température équivalente à 4 °C, entraînant des mortalités sur plus de 12000 km². Le début de l'année 2016 fut marqué par la propagation du phénomène dans le Pacifique sud et également sur la Grande Barrière de corail et la côte ouest australienne. Durant le mois de mars 2016, la température moyenne de l'eau de mer était supérieure d'1,5 à 2 °C aux valeurs enregistrées entre 1971 et 2000 dans la zone nord de la Grande Barrière, pour la même période de l'année. Les programmes de prospection aériens et sous-marins ont révélé que sur un total de 911 récifs individuels observés sur la Grande Barrière, 93 % avaient été affectés, et particulièrement les 1000 km de côtes longeant la zone nord de Port Douglas, pourtant considérées jusqu'ici comme parfaitement préservées, car à l'écart des activités humaines. « Nous n'avons jamais vu jusqu'à présent un phénomène de blanchissement à cette échelle. Dans le nord de la Grande Barrière de corail, c'est comme si 10 cyclones avaient eu lieu en même temps » a déclaré le professeur Terry Hughes¹, directeur du Centre d'excellence pour la recherche sur les coraux en Australie (AIMS). De larges colonies, d'une centaine d'années, se meurent, montrant le caractère exceptionnel du phénomène. Dans le Pacifique encore, des événements sévères de blanchissement ont été reportés en Nouvelle-Calédonie ainsi qu'aux Îles Fidji et aux Kiribati où le taux de mortalité a atteint 80 % (Eakin, 2016, person comm, 8th of April). L'événement s'étend au fur et à mesure à la zone ouest de l'océan Indien, aux Maldives, au Kenya, aux Seychelles avec des impacts particulièrement importants dans la zone couvrant le Triangle de corail, en Indonésie. De fortes anomalies de température sont également enregistrées au Moyen-Orient: le golfe Persique, le golfe d'Aqaba ainsi que le golfe de Suez sont encore classés en alerte de niveau 2 (associés à des événements de blanchissements et de mortalités significatifs et étendus), alors que le golfe d'Oman et la zone récifale de la mer Rouge rattachée à l'Égypte restent en état d'alerte niveau 1 (associé à des événements de blanchissements et de mortalités

1 <https://www.coralcoe.org.au/media-releases/only-7-of-the-great-barrier-reef-has-avoided-coral-bleaching>



significatifs). D'autres événements de blanchissements sont attendus durant l'été 2016 au Japon ainsi que dans les Caraïbes. Les chercheurs de la NOAA suggèrent que le blanchissement global observé pourrait s'étendre bien au-delà de l'année 2017.

LE DEVENIR DES RÉCIFS CORALLIENS: ENTRE ESPOIR ET INQUIÉTUDE

En 2015, la température de surface moyenne de l'eau de mer était supérieure de 0,74 °C comparé aux moyennes du xx^e siècle, excédant de 0,11 °C le record de l'année 2014. Les modèles climatiques prévoient une hausse de la température de surface des océans de 1 à 3 °C d'ici la fin du xxi^e siècle. Ainsi, le dépassement du seuil limite de thermotolérance au-dessus duquel les coraux blanchissent, jusque-là exceptionnel et ponctuel, est prévu de devenir annuel ou biennuel et de menacer la survie des récifs du monde entier d'ici 2050. Les conséquences sont alarmantes puisque l'augmentation de la fréquence du blanchissement, comme celle observée dans les Caraïbes (1995, 1998, 2005 puis 2010) par exemple, limite le temps de résilience de l'écosystème et peut entraîner, sur le long terme, de plus forts taux de mortalité.

De récentes études ont toutefois démontré le potentiel d'acclimatation physiologique des coraux aux fortes anomalies de température. Par exemple, certaines espèces coralliennes sont à même de modifier leur population d'algues symbiotiques afin d'optimiser leur résistance au stress thermique ou encore de réguler l'expression de leurs gènes pour renforcer les mécanismes de défenses. Cependant, ce degré de résilience reste faible, voire ponctuel. Il est donc improbable qu'il joue un rôle significatif alors que la température de l'océan ne cesse d'augmenter de manière significative. De plus, la combinaison d'autres facteurs environnementaux tels que l'acidification des océans et la hausse du niveau marin couplés aux menaces locales (la surpêche, la pollution, les dommages physiques, l'érosion des sols, etc.) sont à prendre en considération dans la prédiction du devenir

des récifs coralliens. L'effet synergique de ces facteurs de stress (pollutions marines et surpêche) peut altérer les relations trophiques entre organismes au sein de l'écosystème récifal, en favorisant la croissance excessive d'algues filamenteuses au détriment des coraux, devenant plus susceptibles aux maladies et infections.

LA NÉCESSITÉ D'UNE PRISE DE CONSCIENCE

Ces événements récents inquiètent la communauté scientifique et ont déclenché une prise de conscience sur la nécessité d'agir afin de protéger les récifs coralliens. De nouvelles techniques et de nombreuses ressources ont été mises en place afin de suivre l'extension géographique et l'évolution du blanchissement permettant de mieux comprendre et appréhender la réponse des coraux. Par exemple, l'expédition « Catlin Seaview survey », qui a été lancée en septembre 2012, établit un suivi de l'état des récifs à travers le monde. Dans la même lignée, la France vient, quant à elle, de fêter les 15 ans de l'initiative française pour les récifs coralliens (Ifreco). Ces efforts peuvent aboutir à la mise en place de plans d'action locaux afin de réduire l'empreinte de l'homme sur les écosystèmes récifaux. Mumby & Harborne (2010) ont par exemple démontré l'efficacité des aires marines protégées pour la résilience des récifs dans les Caraïbes. De même, en 2014, la Nouvelle-Calédonie a annoncé la création du Parc naturel de la mer de corail, l'une des plus grandes aires marines protégées au monde (1,3 million de km²). Des solutions d'ingénierie biologique ont même été proposées, suggérant d'utiliser des colonies coralliennes « optimisées » en fonction des nouvelles conditions environnementales dans le but de restaurer les récifs dégradés. Certains scientifiques proposent en effet d'utiliser « l'évolution assistée » pour modifier le seuil de résilience des coraux en réalisant une sélection artificielle en laboratoire, consistant à exposer les coraux à divers stress ou en sélectionnant des souches de symbiotes thermotolérantes.

Le rôle des autorités locales et des organisations non gouvernementales (ONG) est ainsi primordial afin de



préserver ce patrimoine, dont plus de 500 millions de personnes dépendent. Au-delà des actions locales, des décisions à l'échelle des gouvernements ont été prises afin de diminuer l'impact des humains sur le climat. En décembre 2015, un accord international fixant comme objectif une limitation du réchauffement mondial à 1,5 °C - 2 °C d'ici 2100 a été validé par 195 pays (dont la France) participant à la Conférence internationale sur le climat (COP21). Le 3 septembre 2016, la Chine et les USA, les deux plus grandes puissances mondiales et plus gros pollueurs de la planète, ont ratifié cet accord, joignant ainsi l'effort commun. Dans le but de préserver les récifs de notre

planète pour les futures générations, il nous faudra alors proposer des solutions réalistes à travers des programmes fédérateurs, s'adressant à tous : aussi bien aux politiques et entreprises qu'au grand public, aux plus jeunes d'entre nous ainsi qu'aux communautés directement impliquées. Car une protection effective de la biodiversité repose, entre autre, sur l'amélioration des conditions de vie des populations locales, et sur leurs capacités à gérer durablement les ressources des écosystèmes dont elles dépendent².

² Voir en particulier l'action d'ONG telle que Coral Guardian (www.coralguardian.org/association-coral-guardian).

RÉFÉRENCES

- AIMS, 2016 – Western Australian reefs feel the heat from global bleaching event, www.aims.gov.au/docs/media/featured-content.html/-/asset_publisher/Ydk18I5jDwF7/content/western-australian-reefs-feel-the-heat-fromglobal-bleaching-event.
- AINSWORTH T. D. et al., 2016 – *Climate Change Disables Coral Bleaching Protection on the Great Barrier Reef*. Science 352, 338-342 (2016).
- BAHR K. D., JOKIEL P. L. and RODGERS K. S., 2015 – *The 2014 Coral Bleaching And Freshwater Flood Events In Kāne'ohe Bay, Hawai'i*. PeerJ 3, e1136.
- BROWN B., 1997 – *Coral Bleaching: Causes and Consequences*. Coral reefs 16, S129-S138.
- DONNER S. D., SKIRVING W. J., LITTLE C. M., OPPENHEIMER M. and HOEGH-GULDBERG O., 2005 – *Global Assessment of Coral Bleaching and Required Rates of Adaptation under Climate Change*. Global Change Biology 11, 2251-2265.
- EAKIN C. M. et al., 2010 – *Caribbean Corals in Crisis: Record Thermal Stress, Bleaching, and Mortality in 2005*. PloS one 5, e13969.
- FABRICIUS K. E., CSÉKE S., HUMPHREY C. and DE'ATH G., 2013 – *Does Trophic Status Enhance or Reduce the Thermal Tolerance of Scleractinian Corals? A Review, Experiment and Conceptual Framework*. PloS one 8, e54399 (2013).
- FISCHLIN A. et al., 2007 – *Ecosystems, Their Properties, Goods and Services*.
- FITT W., MCFARLAND F., WARNER M. and CHILCOAT G. – *Seasonal Patterns of Tissue Biomass and Densities of Symbiotic Dinoflagellates in Reef Corals and Relation to Coral Bleaching*. Limnology and oceanography 45, 677-685 (2000).
- GLYNN P., 1993 – *Coral Reef Bleaching: Ecological Perspectives*. Coral reefs 12, 1-17.
- GLYNN P. W., PEREZ M. and GILCHRIST S. L., 1985 – *Lipid Decline in Stressed Corals and their Crustacean Symbionts*. The Biological Bulletin 168, 276-284.
- HERON S. F. et al., 2016 – *Validation of Reef-Scale Thermal Stress Satellite Products for Coral Bleaching Monitoring*. Remote Sensing 8, 59.
- HOEGH-GULDBERG O. and RIDGWAY T., 2016 – *Coral Bleaching Hits Great Barrier Reef As Global Temperatures Soar*. Green Left Weekly, 10.
- HOEGH-GULDBERG O., 1999 – *Climate Change, Coral Bleaching and the Future of the World's Coral Reefs*. Marine and freshwater research 50, 839-866.



- ISRS, 2016 – Reef Encounter, 31.
- JOKIEL P. and COLES S., 1990 – *Response of Hawaiian and Other Indo-Pacific Reef Corals to Elevated Temperature*. Coral reefs 8, 155-162.
- PALUMBI S. R., BARSHIS D. J., TRAYLOR-KNOWLES N. and BAY R. A., 2014 – *Mechanisms of Reef Coral Resistance to Future Climate Change*. Science 344, 895-898.
- MUMBY P. J. and HARBORNE A. R., 2010 – *Marine Reserves Enhance the Recovery of Corals on Caribbean Reefs*. PLoS ONE 5, e8657, doi: 10.1371/journal.pone.0008657.
- NICHOLLS R. J. et al., 2007 – *Coastal Systems and Low-Lying Areas*.
- NOAA, 2015 – *Noaa Declares Third Ever Global Coral Bleaching Event: Bleaching Intensifies in Hawaii, High Ocean Temperatures Threaten Caribbean Corals*. www.noaa.gov/news/noaa-declares-third-ever-global-coral-bleaching-event.html.
- NOAA, 2015 – *NOAA Coral Reef Watch: 2015 Annual Summaries of Thermal Conditions Related to Coral Bleaching for NCRMP Jurisdictions*.
- NOAA., 2015 – *State of the Climate: Global Analysis for Annual 2015*. National Centers for Environmental Information, www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201513.
- NORMILE D., 2010 – *Restoration or devastation?* Science 327, 1568-1570.
- PALUMBI S. R., BARSHIS D. J., TRAYLOR-KNOWLES N. and BAY R. A., 2014 – *Mechanisms of Reef Coral Resistance to Future Climate Change*. Science 344, 895-898.
- Studies, C.C.A.C.o.E.C.R., 2016 – *Only 7 % of the Great Barrier Reef Has Avoided Coral Bleaching*. www.coralcoe.org.au/media-releases/only-7-of-the-greatbarrier-reef-has-avoided-coral-bleaching.
- VAN OPPEN M. J. H., OLIVER J. K., PUTNAM H. M. and GATES R. D., 2015 – *Building Coral Reef Resilience Through Assisted Evolution*. Proceedings of the National Academy of Sciences 112, 2307-2313, doi: 10.1073/pnas.1422301112.
- VEGA THURBER R. L. et al., 2014 – *Chronic Nutrient Enrichment Increases Prevalence and Severity of Coral Disease and Bleaching*. Global change biology 20, 544-554.
- WAKE B., 2016 – *Snapshot: Snow White Coral*. Nature Climate Change 6, 439-439.
- WILKINSON C. R., SOUTER D. N. and NETWORK G. C. R. M., 2008 – *Status of Caribbean Coral Reefs after Bleaching and Hurricanes in 2005*. Global Coral Reef Monitoring Network.
- YONGE C. M., NICHOLLS A. G. and YONGE M. J., 1931 – *Studies on the Physiology of Corals*. Vol. 1, British Museum.
- ZANEVELD J. R. et al., 2016 – *Overfishing and Nutrient Pollution Interact with Temperature to Disrupt Coral Reefs Down to Microbial Scales*. Nat Commun 7, doi: 10.1038/ncomms11833.

Plaidoyer pour une attention spécifique à l'océan profond dans le contexte du changement climatique

Lisa A. Levin,
Nadine Le Bris, Erik Cordes,
Yassir Eddebbbar, Rachel M. Jeffreys,
Kirk N. Sato, Chih-Lin Wei
et le groupe de travail sur le
changement climatique de DOSI
Deep-Ocean Stewardship Initiative

Avec 95 % de son volume habitable, l'océan profond a un rôle important dans l'équilibre climatique, et sa mise sous pression dans les années à venir doit attirer notre attention. Entre stockage et redistribution de la chaleur et du carbone émis dans l'atmosphère par les activités anthropiques, il assure divers services écosystémiques utiles à l'homme. Ces services jouent un rôle dans la séquestration du CO₂ et du CH₄ à plus long terme, ainsi que dans le cycle des nutriments sur lequel reposent toutes les chaînes alimentaires, et donc certaines activités économiques comme les pêcheries. L'absorption de chaleur et sa redistribution impactent la distribution des espèces exploitées par l'homme. Absorbant déjà de nombreux polluants et déchets, l'océan profond va devenir le théâtre de nouvelles activités comme l'extraction minière. Mettre en place les mesures clés de l'adaptation au changement climatique demandera l'acquisition de nouvelles connaissances, ainsi qu'un cadre législatif abouti et des outils de gestion performants.

Couvrant plus de la moitié de la planète, et représentant 95 % de son volume habitable, l'océan profond (> 200 m) mérite une attention spécifique dans le contexte du changement climatique, et ce pour plusieurs raisons importantes :

- Les eaux profondes et les fonds océaniques jouent un rôle prédominant dans le stockage de la chaleur et du carbone excédentaires. Ils sont étroitement liés à la surface de l'océan et à l'atmosphère via le mélange vertical des eaux marines, les migrations d'espèces, la sédimentation de particules, et abritent une large variété d'écosystèmes. Toutes ces raisons font des régions profondes une composante essentielle pour analyser le rôle de l'océan dans
- l'adaptation et l'atténuation au changement climatique.
- L'océan profond assure une large variété de services écosystémiques qui commencent seulement à être inventoriés : régulation des gaz à effet de serre, support de biodiversité (y compris la diversité génétique), approvisionnement de nourriture et production d'énergie.
- L'océan profond est de plus en plus affecté par les activités humaines, notamment par l'accumulation de polluants, la surpêche, et les perturbations liées aux activités extractives sur le plancher océanique. À l'heure actuelle, les connaissances manquent pour comprendre comment ces pressions vont interagir avec les facteurs de stress climatiques.



PROTÉGER L'OCÉAN PROFOND NÉCESSITE D'AGRANDIR NOS CONNAISSANCES

Mettre en place les mesures clés d'adaptation au changement climatique nécessitera l'acquisition de nouvelles connaissances, notamment par l'élargissement des programmes d'observation en eaux profondes. Cela permettra de concevoir des aires marines protégées englobant les régions vulnérables, et d'éclairer la gestion environnementale des activités industrielles et le développement de nouvelles politiques ciblant les eaux profondes nationales et internationales.

Intégrer l'océan profond dans la science et les politiques marines est une nécessité nouvelle. Mieux connaître l'hydrologie et l'hydrographie des eaux profondes, ainsi que l'écologie du milieu pélagique et du plancher océanique, est crucial pour les prédictions climatiques et l'évaluation des impacts sociaux (e.g., Mora et al. 2013), en prenant en compte la forte connectivité entre les océans, l'atmosphère et le milieu terrestre. Les nouvelles régulations internationales (par exemple pour l'extraction minière) et les traités (par exemple sur la biodiversité), ainsi que la gestion environnementale et la planification spatiale devront intégrer le rôle de l'océan profond dans le climat et ses processus.

LE FUTUR DE L'OCÉAN PROFOND EN QUELQUES ÉLÉMENTS CLÉS

Nous attirons l'attention sur les thèmes suivants, qui donnent une légitimité à ce plaidoyer pour l'océan profond :

Les services écosystémiques

La vie dans l'océan profond fournit ou régule de nombreux services utiles pour la planète (Armstrong et al. 2012 ; Thurber et al. 2014). Parmi ceux-ci, les plus importants sont la séquestration du CO₂ et du méthane (CH₄), le recyclage des nutriments, et la disponibilité d'abris et de nourriture, qui en font des nourrisseries pour les pêcheries et le support d'une biodiversité importante grâce à des habitats variés. L'océan profond est le plus grand réservoir de

carbone sur Terre, et constitue le dépôt ultime pour la plupart du carbone anthropogénique. La contribution biogénique du carbone dans les eaux profondes est mal quantifiée, mais les écosystèmes chimiosynthétiques, qui possèdent des taux élevés de fixation de CO₂ sous forme de carbone organique transféré vers les espèces pélagiques, pourraient également contribuer à la séquestration du « carbone bleu » (Marlow et al. 2014 ; Trueman et al. 2014 ; James et al. 2016).

Bilans d'énergie thermique

L'océan absorbe 90 % de la chaleur additionnelle piégée par les émissions de gaz à effet de serre anthropogéniques. De celle-ci, 30 % sont stockés à des profondeurs supérieures à 700 m (5^e rapport d'évaluation du GIEC). L'océan est donc un indicateur plus précis du réchauffement planétaire que la température moyenne de surface du globe (Victor and Kennel, 2015). Dans cet environnement stable et majoritairement froid (à l'exception de la Méditerranée, et dans les zones bathyales des régions tropicales), les limites thermiques structurent la distribution des espèces. Les conséquences du réchauffement sur les eaux profondes vont largement influencer les écosystèmes et leur biodiversité. Par exemple, des changements rapides dans les écosystèmes benthiques des eaux profondes ont déjà été documentés, dans les zones de plongée des eaux de surface vers les profondeurs (*downwellings*), ou au contraire de remontée des eaux profondes (*upwellings*), ainsi que dans les régions polaires (e.g., Danovaro et al., 2004 ; Smith et al., 2012 ; Soltwedel et al., 2016). Cependant, discriminer les cycles naturels des impacts anthropiques sur le climat dans l'océan profond nécessite des séries temporelles suffisamment longues (plusieurs décennies) qui manquent encore pour le moment (Smith et al., 2013).

Perturbations biogéochimiques

L'océan profond assure des fonctions majeures de recyclage des éléments chimiques. On s'attend à ce que ces processus subissent des changements importants. Une diminution de la teneur en oxygène, du pH et du taux de saturation de l'aragonite a été observée, et devrait impacter largement les eaux de profondeur intermédiaire (autour de quelques centaines de mètres à 1 km de profondeur) selon tous

les scénarios d'émissions futures (Bopp *et al.*, 2013). L'oxygénation des eaux profondes est étroitement liée à la circulation thermohaline, et les modifications de la teneur en oxygène reflètent les changements de la circulation océanique, à l'échelle de bassins et à l'échelle globale. En tant que régulateur des cycles biogéochimiques de l'azote, du fer, du phosphore et du soufre, l'oxygène peut être central dans la mise en synergie de ces perturbations. Par exemple, la production de N_2O devrait s'accroître à mesure que l'oxygène décline (Codispoti, 2010), induisant un effet de rétroaction de ce gaz à effet de serre sur le climat, même si de larges incertitudes demeurent sur son importance (Martinez-Rey *et al.*, 2015).

Impacts cumulés

De nombreux facteurs de stress dus au changement climatique affectent les fonctions des écosystèmes des eaux profondes (Levin and Le Bris 2015). Ces derniers pourraient être particulièrement vulnérables au changement, en raison de leur stabilité environnementale, des liens étroits qu'ils entretiennent avec la productivité de surface, et avec le régime hydrodynamique. La diversité biologique de l'océan profond est largement façonnée par l'export vers le fond de matière produite par photosynthèse en surface (Woolley *et al.*, 2016); et les modèles CMIP5 prédisent un déclin général de cette productivité primaire avec le changement

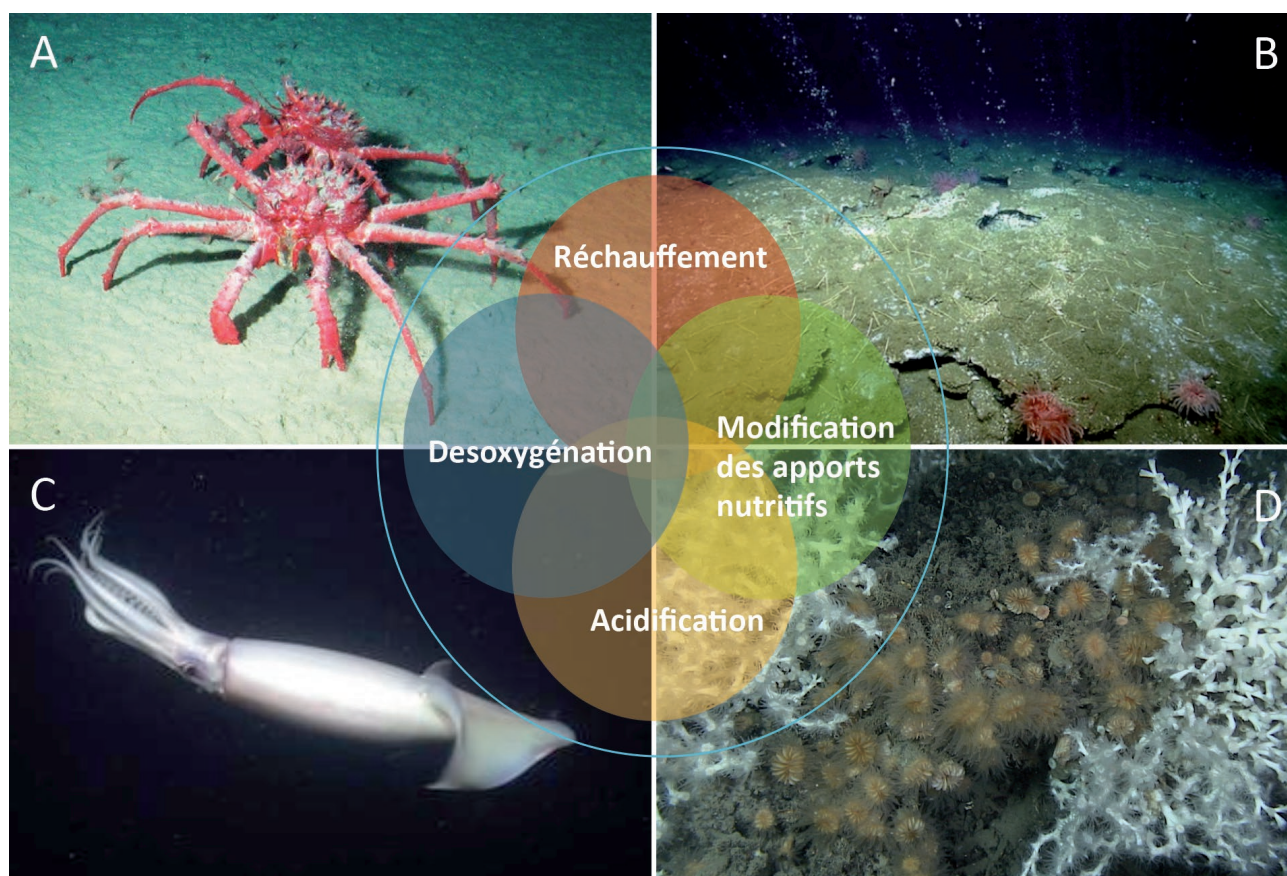


Figure adaptée de Levin and Le Bris 2015. Espèces profondes exposées à différents facteurs de stress climatique, susceptibles d'induire des changements écologiques majeurs. (A) Crabe royal envahissant la marge Antarctique grâce au réchauffement des eaux (9). (B) Faune des sources de méthane dont les émissions sont accélérées par le réchauffement sur la marge de l'est Atlantique. (C) Calamar de Humboldt favorisé par la diminution des teneurs en oxygène dans les eaux intermédiaires sur l'est Pacifique. (D) Coraux d'eaux froides soumis à l'acidification des eaux et particulièrement sensibles au réchauffement des eaux en Méditerranée.

Crédits photographiques: (A) K. Heirman and C. Smith, NSF LARISSA and Ghent University HOLANT projects. (B) Deepwater Canyons 2013 – Pathways to the Abyss, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) – Office of Exploration and Research, Bureau of Ocean Energy Management, and U.S. Geological Survey. (C) N. Le Bris, Laboratoire d'Ecogéochimie des Environnements Benthiques (LECOB), Fondation Total – UPMC. (D) R. Starr, NOAA – Cordell Bank National Marine Sanctuary.

climatique. Des diminutions importantes dans les tropiques et l'Atlantique nord (Bopp *et al.*, 2013), suggèrent des impacts négatifs sur la diversité dans les eaux profondes. Il faudra évaluer comment et dans quelles régions marines ces changements cumulés (réchauffement, acidification, conditions corrosives vis-à-vis de l'aragonite, réduction du flux de nutriments et désoxygénation) peuvent altérer la stabilité des écosystèmes et leur capacité à s'adapter (Lunden *et al.*, 2014 ; Gori *et al.*, 2016). Cela implique de rassembler des connaissances suffisantes sur les effets cumulés des multiples facteurs de stress spécifiques aux régions profondes, afin de construire des scénarios précis de vulnérabilité des écosystèmes.

Des observations nécessaires

Le nombre réduit des observations dans l'océan profond et leur couverture spatiale limitée, conjugués à une résolution spatiale des modèles très large, conduit à des incertitudes importantes. Ces dernières concernent par exemple la variabilité naturelle de l'environnement auquel sont confrontés les organismes des grands fonds, le couplage entre les cycles climatiques et biogéochimiques, et les réponses des *hotspots* de biodiversité aux changements de la circulation hydrodynamique (e.g., monts sous-marins et canyons). De plus, la diversité de la vie dans l'environnement pélagique profond est encore largement inexplorée, bien qu'il représente plus de 95 % du volume habitable de la planète. Les observatoires sur les fonds

marins, et les séries temporelles à long terme qu'ils permettent d'acquérir, commencent à fournir des indications sur la manière dont les écosystèmes des eaux profondes répondent aux perturbations climatiques (Soltweddel *et al.*, 2016 ; Smith *et al.*, 2013). Des études écologiques intégrées de long terme, englobant des écosystèmes d'eaux profondes variés et les *hotspots* les plus vulnérables, sont nécessaires afin d'identifier les menaces qui pèsent sur les services écosystémiques essentiels, et les possibles rétroactions sur le système climatique et les humains.

Synergies des facteurs de stress induits par les activités humaines

Outre les multiples facteurs de perturbation, les écosystèmes de l'océan profond font face à l'accumulation de polluants et de déchets, à des pressions de pêche accrues, et au développement vers les plus grandes profondeurs d'activités d'extraction de ressources énergétiques (Mengerink *et al.*, 2014). A cette liste pourrait s'ajouter à l'avenir des activités d'extractions minières sur le plancher océanique profond. Les efforts déployés pour développer les réglementations, définir et appliquer les études d'impact environnemental, développer des indicateurs de bon état écologique, établir la planification spatiale et créer des aires marines protégées en eaux profondes, nécessiteront d'intégrer le changement climatique à l'analyse, en prenant en compte l'interaction de facteurs de stress cumulés sur les écosystèmes et leur biodiversité.

RÉFÉRENCES

- ARMSTRONG C. W., FOLEY N. S., TINCH R. and VAN DEN HOVE S., 2012 – *Services from the Deep: Steps towards Valuation of Deep Sea Goods and Services*. *Ecosyst. Serv.*, 2, 2 – 13.
- BOPP L., RESPLANDY L., ORR J. C., DONEY S. C., DUNNE J. P., GEHLEN M., HALLORAN P., HEINZE C., ILYINA T., SEFERIAN R. and TJIPUTRA J., 2013 – *Multiple Stressors of Ocean Ecosystems in the 21st Century: Projections with Cmp5 Models*. *Biogeosciences*, 10, 6225 – 6245. doi: 10.5194/bg-10-6225-2013.
- DANOVARO R., DELL'ANNO A. and PUSCEDDU A., 2004 – *Biodiversity Response to Climate Change in a Warm Deep Sea: Biodiversity and Climate Change in the Deep Sea*. *Ecology Letters* 7, 821 – 828.
- GORI A., FERRIER-PAGÈS C., HENNIGE S. J., MURRAY F., ROTTIER C., WICKS L. C. and ROBERTS J. M., 2016 – *Physiological Response of the Cold-Water Coral *Desmophyllum dianthus* to Thermal Stress and Ocean Acidification*. *PeerJ* 4, e1606. doi: 10.7717/peerj.1606.
- JAMES R.H., BOUSQUET P., BUSSMANN I., HAECKEL M., KIPFER R., LEIFER I., NIEMANN H., OSTROVSKY I., PISKOZUB J., REHDER G., TREUDE T., VIELSTÄDTE L. and GREINERT J., 2016 – *Effects of Climate Change on Methane Emissions from Seafloor Sediments in the Arctic Ocean: a Review: Methane Emissions from Arctic Sediments*. *Limnology and Oceanography*.
- LUNDEN J. J., MCNICHOLL C. G., SEARS C. R., MORRISON C. L. and CORDES E. E., 2014 – *Acute Survivorship of the Deep-Sea Coral *Lophelia pertusa* from the Gulf of Mexico under Acidification, Warming, and Deoxygenation*. *Frontiers in Marine Science* 1.
- LEVIN L. A. and LE BRIS N., 2015 – *Deep Oceans under Climate Change*. *Science* 350: 766-768.
- MARLOW J. J., STEELE J. A., ZIEBIS W., THURBER A. R., LEVIN L. A. and ORPHAN V. J., 2014 – *Carbonate-Hosted Methanotrophy Represents an Unrecognized Methane Sink in the Deep Sea*. *Nature Communications* 5, 5094.
- MARTINEZ-RAY J., BOPP L., GEHLEN M., TAGLIABUE A. and GRUBER N., 2015 – *Projections of Oceanic N₂O Emissions in the 21st Century Using the IPSL Earth System Model*. *Biogeosciences* 12, 4133-4148.
- MENDERINK K. J., VAN DOVER C. L., ARDRON J., BAKER M., ESCOBAR-BRIONES E., GJERDE K., KOSLOW J. A., RAMIREZ-LLODRA E., LARA-LOPEZ A., SQUIRES D., SUTTON T., SWEETMAN A. K. and LEVIN L. A., 2014 – *A Call for Deep-Ocean Stewardship*. *Science* 344: 696-698.
- MORA C., WEI C.-L., ROLLO A., AMARO T., BACO A. R., BILLETT 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.
- SMITH C. R., GRANGE L. J., HONIG D. L., NAUDTS L., HUBER B., GUIDI L. and DOMACK E., 2011 – *A Large Population of King Crabs in Palmer Deep on the West Antarctic Peninsula Shelf and Potential Invasive Impacts*. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, rspb20111496. doi: 10.1098/rspb.2011.1496.
- SMITH K. L., RUHL H. A., KAHRU M., HUFFARD C. L. and A. SHERMAN A., 2013 – *Deep Ocean Communities Impacted by Changing Climate over 24 Y in the Abyssal Northeast*. *PNAS* 110: 19838-41.
- SOLTWEDEL T., BAUERFEIND E., BERGMANN M., BRACHER A., BUDAEVA N., BUSCH K., CHERKASHEVA A., FAHL K., GRZELAK K., HASEMANN C., JACOB M., KRAFT A., LALANDE C., METFIES K., NÖTHIG E.-M., MEYER K., QUÉRIC N.-V., SCHEWE I., WŁODARSKA-KOWALCZUK M. and KLAGES M., 2016 – *Natural Variability or Anthropogenically-Induced Variation? Insights from 15 Years of Multidisciplinary Observations at the Arctic Marine LTER Site HAUSGARTEN*. *Ecological Indicators* 65, 89 – 102.
- THURBER A. R., SWEETMAN A. K., NARAYANASWAMY B. E., JONES D. O. B., INGELS J. and HANSMAN R. L., 2014 – *Ecosystem Function and Services Provided by the Deep Sea*. *Biogeosciences* 11: 3941-3963.
- TRUEMAN C. N., JOHNSTON G., O'HEA B. and MACKENZIE K. M., 2014 – *Trophic Interactions of Fish Communities at Midwater Depths Enhance Long-Term Carbon Storage and Benthic Production on Continental Slopes*. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 281, 20140669 – 20140669.
- VICTOR D. and KENNEL C., 2014 – *Ditch the 2 °C Warming Goal*. *Nature* 514: 30-31.
- WOOLLEY S. N. C., TITTENSOR D. P., DUNSTAN P. K., GUILLERA-ARROITA G., LAHOZ-MONFORT J. J., WINTLE B. A., WORM B. and O'HARA T. D., 2016 – *Deep-Sea Diversity Patterns Are Shaped by Energy Availability*. *Nature* 533: 393-396.

Les services écosystémiques de l'océan profond

Le concept de services écosystémiques (SE) intègre les fonctions écologiques et les valeurs économiques des écosystèmes qui contribuent au bien-être humain. Cette approche déjà utilisée pour la gestion des eaux côtières, l'est encore peu pour l'océan profond, alors qu'il représente 97 % du volume des océans. Les SE de l'océan profond englobent des services d'approvisionnement comme les pêcheries ou des agents industriels, des services de régulation comme le stockage du carbone, et des services culturels tels que l'inspiration artistique. Mais la pression sur l'océan profond s'accroît sous la forme d'activités anthropiques directes et indirectes qui s'y développent. Cette synergie des impacts est largement inconnue et le vide juridique de certaines parties de l'océan demande la plus grande précaution.

INTRODUCTION

Les services écosystémiques (SE) sont généralement définis comme les contributions au bien-être humain fournies par les écosystèmes (MEA, 2005; TEEB, 2010; Haines-Young and Potschin, 2013). Ce concept intègre les processus écologiques et les valeurs économiques pour expliquer comment la santé des écosystèmes impacte la sphère socio-économique mondiale. Les SE peuvent être évalués monétairement pour favoriser la prise de décision, et être intégrés dans des outils de gestion, comme la planification spatiale marine ou le management basé sur les écosystèmes (Jobstvogt *et al.*, 2014). Des approches écosystémiques ont déjà été utilisées pour la gestion des eaux terrestres ou superficielles (e.g., Seidl *et al.*, 2016; Gunderson *et al.*, 2016), mais très peu ont été appliquées à l'océan profond. Les services écosystémiques dans l'océan profond sont illustrés dans la figure 1. Ils correspondent aux catégories déjà définies pour les autres écosystèmes : l'approvisionnement (ressources issues des écosystèmes), la régulation des processus naturels, les services culturels (bénéfices immatériels).

Les services d'approvisionnement des eaux profondes comprennent les pêcheries, l'usage de molécules pharmaceutiques, d'agents industriels, et de biomatériaux (Leary, 2004; Mahon *et al.*, 2015). Les services de régulation englobent l'adaptation et l'atténuation au réchauffement climatique, les contrôles biologiques, l'absorption des déchets (Armstrong *et al.*, 2012; Thurber *et al.*, 2014). Les services culturels attachés à l'océan profond, sont des supports éducatifs, des aspects esthétiques et une source d'inspiration pour les arts; ces bénéfices culturels intègrent aussi la valeur donnée à une ressource existante, ou sa protection pour les générations présentes et futures.

De nombreuses fonctions naturelles (comme la productivité primaire ou le cycle des nutriments) contribuent directement ou indirectement à ces services, et doivent aussi être gardées à l'esprit pour continuer à bénéficier des SE en eaux profondes. Par exemple, la régénération des nutriments est une fonction qui soutient la pêche (Armstrong *et al.*, 2012; Thurber *et al.*, 2014), et qui advient surtout dans les régions où il y a des remontées d'eau profonde importantes (e.g., courants

de bord est des continents et en Antarctique) ou locales (e.g., tourbillons à proximité des monts sous-marins). Ces nutriments alimentent la photosynthèse, qui à son tour soutient des pêcheries importantes comme les sardines ou les anchois.

L'augmentation des activités anthropiques dans l'océan profond a créé un besoin urgent d'évaluation des impacts sur la santé des écosystèmes. Les émissions de CO₂ d'origine anthropique, absorbées par l'océan, ont produit un réchauffement, une désoxygénation et une acidification des eaux qui amplifient les impacts des activités humaines sur les habitats profonds (telles que la pêche, les forages gaziers et pétroliers ou les résidus miniers). Il est important de considérer ces effets cumulatifs dans les eaux profondes, et comment les SE en seront affectés, afin de les gérer au mieux.

LES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES PROFONDS DANS LA RÉGULATION DU CLIMAT

L'océan, par des procédés physiques, chimiques et biologiques, a absorbé environ un tiers du CO₂ émis dans l'atmosphère depuis le milieu du xx^e siècle (IPCC, 2014). L'océan profond devient donc un réservoir de chaleur majeur, et joue un rôle dans le ralentissement du changement climatique (IPCC, 2014; Thurber et al., 2014). Cette séquestration du carbone par l'océan profond deviendra encore plus cruciale à mesure que les émissions de CO₂ vont continuer de s'accroître, mais les effets liés à cette absorption vont modifier le milieu : réchauffement, désoxygénation, acidification,

modification des nutriments, sous-saturation en carbonate de calcium... Ces effets cumulatifs pourront poser des problèmes aux activités qui prennent place en eaux profondes. Les études futures devront évaluer les effets cumulatifs complexes de ces modifications sur la biodiversité, le fonctionnement des écosystèmes et les services écosystémiques de l'océan profond.

La séquestration du carbone par l'océan profond s'appuie sur une pompe biologique efficace (i.e., le transfert du carbone, produit biologiquement, et transporté physiquement de la surface vers l'océan profond). L'enfouissement du carbone, issu de l'océan de surface, dans les sédiments du fond des océans contribue à la régulation du climat, parce qu'il soustrait ce carbone à l'atmosphère pour des milliers à des millions d'années (Xiao et al., 2010).

De plus, ce carbone est une source importante de nourriture pour de nombreux organismes qui subviennent aux besoins des poissons de l'océan profond. Comment le changement climatique global affecte la pompe biologique, et par conséquent l'export et la séquestration du carbone dans l'océan profond, reste un sujet majeur des recherches en cours (voir Turner, 2015). Des observations à long terme montrent que les phénomènes vont varier en fonction de la région considérée (Levin and Le Bris, 2015).

Les gaz à effet de serre, comme le méthane (CH₄) et le CO₂, pénètrent naturellement dans l'océan par les structures géologiques du plancher océanique, telles que les cheminées hydrothermales ou les suintements de méthane. Cependant, la fixation biologique du CH₄ et du CO₂ par des micro- et des

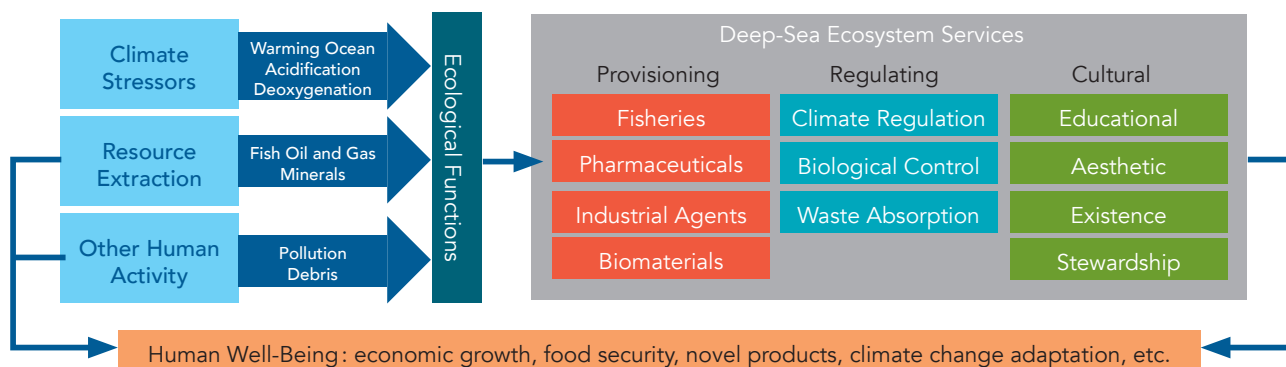


Fig.1 — La relation entre les facteurs de stress climatique d'origine anthropique, les services écosystémiques de l'océan profond et le bien-être humain. © J. T. Le et K. N. Sato.



macro-organismes dans ces écosystèmes profonds empêche ces gaz de pénétrer dans la colonne d'eau. Ce filtre biologique de CH₄ et de CO₂ sur le fond de mer est un autre service de régulation qui bénéficie indirectement aux espèces commerciales (Thurber *et al.*, 2014).

LES ACTIVITÉS HUMAINES DIRECTES DANS L'Océan PROFOND

Aux impacts liés au réchauffement climatique, il faut rajouter les activités humaines qui augmentent (Thurber *et al.*, 2014). L'océan profond est riche de ressources naturelles et leur extraction peut être dommageable pour ses nombreux habitats hétérogènes. Par exemple, la demande de poissons augmentant (FAO, 2014), les pêcheries gagnent en profondeur dans la colonne d'eau et vers le fond (Watson and Morato, 2013). Le chalutage perturbe et enlève des structures physiques et des sédiments du fond marin, ce qui peut mener à une diminution des populations de poissons commerciaux, et d'autres espèces associées au fond de mer (Buhl-Mortensen *et al.*, 2015). En outre, les espèces pêchées dans l'océan profond mettront plus de temps à se reconstituer, car beaucoup d'entre elles ont des durées de vie plus longues que les espèces d'eau de surface (Norse *et al.*, 2012).

D'autres activités extractives existent, notamment le pétrole, le gaz, et potentiellement les minéraux. Les exploitations et forages de pétrole et de gaz gagnent les eaux profondes, augmentant le risque de pollution comme des fuites de pétrole (comme le Deepwater Horizon; Merrie *et al.*, 2014). La régulation de l'exploitation commerciale minière en eaux profondes est en cours de développement (ISA, 2015). Plusieurs dépôts minéraux d'intérêt ont été trouvés sur les cheminées hydrothermales, sur les monts sous-marins et dans les plaines abyssales. Tous accueillent différentes communautés biologiques qui peuvent contribuer à leur manière aux SE. La perturbation de ces écosystèmes via les impacts humains directs comme les activités minières, le chalutage, et d'autres activités extractives (telles

que les forages pétroliers et gaziers) vont probablement troubler la fonction régulatrice de l'océan profond, provoquant un fort risque d'une perte aiguë de ces services sur le long terme.

SYNERGIE DES IMPACTS POTENTIELS (RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE ET ACTIVITÉS ANTHROPIQUES)

L'impact de la cumulation des facteurs de stress climatique multiples et des activités extractives, peut mener à des effets additifs, antagonistes, ou synergétiques sur les SE (Crain *et al.*, 2008). Les fonctions et processus écosystémiques de l'océan profond ne sont pas bien connus, de même que leurs interactions et dynamiques. Cela rend difficile la prévision de l'évolution des SE face aux impacts humains directs et indirects. Cela pourrait permettre d'invoquer le principe de précaution (Déclaration de Rio, 1992), et de mettre en lumière le besoin de nouvelles approches pour mieux comprendre l'océan profond et les bénéfices qu'il procure.

Le réchauffement des eaux profondes influencera non seulement le service de régulation que l'océan profond fournit en tant que puits thermique, mais aussi fortement les écosystèmes et leur biodiversité, compte tenu de la stabilité actuelle de cet environnement froid. Par exemple, le réchauffement en Amérique du Sud a induit un éventail de déplacements vers les pôles dont des crabes. L'arrivée de ces prédateurs vers l'Antarctique risque d'affecter des communautés qui évoluaient depuis des millions d'années sans eux (Smith *et al.*, 2012). La combinaison réchauffement – acidification – désoxygénation, triple assaut de facteurs stressants, va réduire la compatibilité des habitats avec les organismes calcifiants constructeurs de récifs, comme les coraux d'eau froide (Gruber, 2011; Lunden *et al.*, 2014). La biodiversité joue également un rôle fonctionnel clé dans la plupart des autres SE (Palumbi *et al.*, 2009; Science for Environment Policy, 2015), même si leur relation est encore mal comprise (Balvanera *et al.*, 2014). Comme ces impacts s'accroissent, les communautés biologiques des eaux profondes seront de plus en plus vulnérables.

DÉFIS JURIDICTIONNELS DANS LA MISE EN ŒUVRE DES SE EN EAUX PROFONDES

Il y a plusieurs défis dans l'opérationnalisation de l'approche écosystémique de l'océan profond, notamment ; comment les fonctions se convertissent en services écosystémiques, le potentiel de recouvrement et l'échelle de temps, et la valorisation économique des SE. Ces défis sont liés au manque de connaissance et de données (Le *et al.*, submitted). D'autres défis, tels que les aspects juridiques et leurs applications, sont des lacunes à prendre en compte dans le cadre réglementaire en cours de développement.

L'océan profond est le plus grand écosystème au monde, comprenant plus de 90 % du volume vivable de la planète (Levin and Le Bris, 2015). Cependant, la majorité de cet espace se situe en dehors des zones économiques exclusives (ZEE) des pays, et doit ainsi être réglementée et gérée à l'international. Un des outils courants de gestion, la planification spatiale marine, pourrait potentiellement utiliser l'évaluation des SE pour délimiter les aires marines protégées (AMP). Par exemple, une valeur seuil de SE pourrait être établie pour les AMP, et modulée en fonction de l'intérêt, grâce à des estimations d'approvisionnement du SE de référence. Toutes les zones fournissant plus que cette valeur se verraient dotées d'une protection spatiale. Le caractère international de nombreuses ressources des eaux profondes rend cela difficile, du fait des vides juridiques ou chevauchement de juridictions, et de la diversité des outils de gestion.

En général, les AMP montrent une résilience et un potentiel de récupération plus élevés après des événements perturbants (Huvenne *et al.*, 2016). Dans les zones au-delà des juridictions nationales, l'organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) a désigné plusieurs espèces et habitats des eaux profondes comme des Écosystèmes marins vulnérables (EMV, tels les coraux d'eau froide, les cheminées hydrothermales de Reykjanes Ridge, les monts sous-marins dans le Pacifique). En général, une fois identifiés, les EMV sont protégés de toute activité humaine, mais différents managements permettent parfois quelques activités de pêche.

L'Autorité internationale des fonds marins (AIFM) est l'organe juridique qui gère la juridiction des zones au-delà des juridictions nationales, mais seulement sur le sol et le sous-sol des océans. En plus de reconnaître des EMV, l'AIFM peut mettre en place des protections spatiales appelées zones d'intérêt environnemental particulier (ZIEP ; AIFM, 2011). De larges portions de la Zone de Fracture Clarion-Clipperton, une province qui concentre des nodules polymétalliques, et qui connaît de nombreuses demandes d'exploration minière, ont été désignées comme des ZIEP (Wedding *et al.*, 2013). Enfin, les Nations unies développent un instrument nouveau, la « Biodiversité au-delà des juridictions nationales » (Blasiak and Yagi, 2016).

Les réserves marines dans lesquelles aucune extraction de ressource n'est autorisée, sont efficaces pour accroître l'abondance, la diversité, et la productivité des organismes marins (Lubchenco *et al.*, 2003). De plus, des réseaux de réserves marines sont considérés plus efficaces pour maintenir la connectivité entre les populations marines, les protégeant davantage contre le changement climatique qu'une réserve marine isolée. La distribution spatiale des espèces marines évolue suite aux modifications de température, de concentration en oxygène et en fonction de la présence des carbonates. Il est essentiel que les réseaux de réserves marines considèrent de nouvelles approches prenant en compte l'adaptation des organismes et des humains au changement climatique (Schmitz *et al.*, 2015 ; Jones *et al.*, 2016).

Les AMP sont des outils de gestion importants parce qu'elles protègent des zones fournissant des SE et ont donc une grande utilité pour la société. Incorporer les SE dans les outils de protection spatiale associerait une valeur à l'AMP (c'est-à-dire que la valeur d'une AMP serait égale à celle du SE qu'elle fournit directement ou indirectement). Les valeurs estimées des AMP pourraient donner des informations afin de prendre des décisions concernant leur mise en application (par exemple le niveau d'application, et qui en est responsable). Bien que la valorisation économique soit pour le moment difficile, elle sera davantage gérable et précise à mesure que les connaissances et les données sur les SE de l'océan profond s'accumuleront.

LE MANQUE DE CHARISME DES SE DES EAUX PROFONDES

Un autre défi dans la mise en œuvre de l'approche des SE en eaux profondes pour une gestion multifacteurs, est le manque d'intérêt du grand public vis-à-vis de l'océan profond. Les humains sont physiquement et émotionnellement déconnectés de l'environnement des grands fonds, encore davantage qu'avec tout autre SE hors de vue, comme le concept de carbone bleu, qui est la séquestration du carbone par l'océan. La manière la plus efficace de combler ce manque d'intérêt est d'améliorer la compréhension scientifique, et la sensibilisation du public. Il n'a jamais été aussi important d'éveiller les consciences sur les SE des eaux profondes, de promouvoir la transparence et l'imputabilité de leur gestion, et de renforcer leur conservation et la recherche. C'est le rôle de Deep Ocean Stewardship Initiative (DOSI), un regroupement de scientifiques internationaux, d'ingénieurs et de spécialistes en politique, droit, et économie, qui conseillent sur la gestion de l'utilisation des ressources en eaux profondes, et sur les stratégies potentielles pour maintenir l'intégrité des écosystèmes à l'intérieur et au-delà des juridictions nationales (<http://dosi-project.org/>). Des émissions diffusées en direct depuis l'océan profond sur internet par l'Office d'exploration et de recherche sur les océans de l'Administration nationale de l'atmosphère et de l'océan des États-Unis (NOAA), permettent à quiconque disposant d'une connexion internet d'être témoin des processus biologiques et géologiques qui ont lieu dans l'océan profond. Au milieu d'autres chercheurs et explorateurs des eaux profondes, ces organisations soulignent l'importance des approches interdisciplinaires pour mieux comprendre comment l'océan profond fonctionne, et comment les services qu'il fournit seront affectés par les différents scénarios climatiques à venir.

CONCLUSION

L'océan profond est le plus grand écosystème au monde, et accueille une diversité d'habitats qui par leur fonctionnement sont utiles à la société. Ces services écosystémiques peuvent être d'ordre extractif (comme la pêche) ou non extractif (comme la régulation du climat), et pour une gestion environnementale il est essentiel de considérer les deux; d'autant plus compte tenu des multiples facteurs de stress liés au climat et à l'activité humaine. Les émissions de CO₂ augmentant toujours, il devient crucial que la régulation du climat par l'océan profond soit davantage reconnue, afin de continuer à profiter de ce service, et des autres services qu'elle influence, comme ceux liés aux cycles biogéochimiques et aux communautés biologiques (Fig. 1). Bien qu'il y ait encore des défis à relever (tels que réduire l'incertitude scientifique, les vides juridictionnels, ou le manque d'engagement public), le développement de mesures protectives contre les dégradations de l'environnement devrait contribuer à assurer une utilisation environnementale et économique soutenable de l'océan profond et de ses nombreux services écosystémiques.



RÉFÉRENCES

- ARMSTRONG C.W., FOLEY N.S., TINCH R. and VAN DEN HOVE S., 2012 – *Services from the Deep: Steps Towards Valuation of Deep Sea Goods and Services*. Ecosyst. Serv. 2, 2 – 13. doi: 10.1016/j.ecoser.2012.07.001.
- BALVANERA P., SIDDIQUE I., DEE L., PAQUETTE A., ISBELL F., GONZALEZ A., BYRNES J., O'CONNOR M.I., HUNGATE B.A. and GRIFFIN J.N., 2014 – *Linking Biodiversity and Ecosystem Services: Current Uncertainties and the Necessary Next Steps*. Bioscience. 64, 49-57. doi: 10.1093/biosci/bit003.
- BLASIAK R. and YAGI N., 2016 – *Shaping an International Agreement on Marine Biodiversity Beyond Areas of National Jurisdiction: Lessons From High Seas Fisheries*. Marine Policy. 71, 210-216. Doi: 10.1016/j.marpol.2016.06.004.
- BUHL-MOTENSEN L., ELLINGSEN K.E., BUHL-MORTENSEN P., SKAAR K.L. and GONZALEZ-MIRELES G., 2015 – *Trawling Disturbance on Megabenthos and Sediment in the Barents Sea: Chronic Effects On Density, Diversity, And Composition*. ICES J. Mar. Sci. doi: 10.1093/icesjms/fsv200.
- CRAIN C. M., KROEKER K. and HALPERN B.S., 2008 – *Interactive and Cumulative Effects of Multiple Human Stressors in Marine Systems*. Ecol. Lett. 11, 1304-1315.
- FAO, 2014 – *The State of World Fisheries and Aquaculture: Opportunities and challenges*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- GRUBER N., 2011 – *Warming Up, Turning Sour, Losing Breath: Ocean Biogeochemistry under Global Change*. Phil. Trans. Roy. Soc. A., 369 (1943), 1980-1996. doi: 10.1098/rsta.2011.0003.
- GUNDERSON L.H., COSNES B. and GARMESTANI A.S., 2016 – *Adaptive Governance of Riverine and Wetland Ecosystem Goods and Services*. J. Env. Man. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.05.024.
- HAINES-YOUNG R. and POTSCHIN M., 2013 – *Common International Classification of Ecosystem Services (CICES): Consultation on Version 4, August-December 2012*. EEA Framework Contract No EEA/IEA/09/003.
- HUVENNE V.A.I., BETT B.J., MASSON D.G., LE BAS T.P. and WHEELER A.J., 2016 – *Effectiveness of a Deep-Sea Cold-Water Coral Marine Protected Area, Following Eight Years Of Fisheries Closure*. Biol. Cons. 200, 60-69.
- International Seabed Authority, 2011 – *Environmental Management Plan for the Clarion-Clipperton Zone*. IBSA/17/LTC/7. Kingston, Jamaica.
- International Seabed Authority, 2015 – *Developing a Regulatory Framework for Mineral Exploitation in the Area*. International Seabed Authority, Kingston, Jamaica.
- IPCC, 2014 – *Climate Change 2014: Synthesis Report Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.), IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- JOBSTVOGT N., HANLEY N., HYNES S., KENTER J. and WITTE U., 2014 – *Twenty Thousand Sterling under The Sea: Estimating the Value of Protecting Deep-Sea Biodiversity*. Ecol. Econ. 97, 10 – 19. doi: 10.1016/j.ecolecon.2013.10.019.
- JONES K.R., WATSON J.E., POSSINGHAM H.P. and KLEIN C.J., 2016 – *Incorporating Climate Change into Spatial Conservation Prioritisation: A Review*. Biol. Cons., 194, 121-130.
- LE J.T., LEVIN L.A. and CARSON R.C., 2016 – *Incorporating Ecosystem Services into Environmental Management of Deep-Seabed Mining*. Deep Sea Res. II. doi: 10.1016/j.dsr2.2016.08.007.
- LEARY D.K., 2004 – *Bioprospecting and the Genetic Resources of Hydrothermal Vents on the High Seas: What is the Existing Legal Position, Where are we Heading and What are our Options?* Macquarie Journal of International and Comparative Environmental Law. 137.
- LEVIN L.A. and LE BRIS N., 2015 – *Deep Oceans under Climate Change*. Science 350: 766-768.
- LUBCHENCO J., PALUMBI S.R., GAINES S.D. and ANDELMAN S., 2003 – *Plugging a Hole in the Ocean: the Emerging Science of Marine Reserves*. Ecol. App., 13 (1), S3-S7.
- LUNDEN J.J., MCNICHOLL C.G., SEARS C.R., MORRISON C.L. and CORDES E.E., 2014 – *Acute Survivorship of the Deep-Sea Coral Lophelia Pertusa from the Gulf of Mexico under Acidification, Warming, and Deoxygenation*. Front. Mar. Sci., 1, 78. doi: 10.3389/fmars.2014.00078.

- MAHONE B.P., BHATT A., VULLA D., SUPURAN C.T. and MCKENNA R., 2015 – *Exploration of Anionic Inhibition of the α -Carbonic Anhydrase from Thiomicrospira Crunogena XCL-2 Gammaproteobacterium: a Potential Bio-Catalytic Agent for Industrial CO₂ Removal*. Chem. Eng. Sci. 138, 575-580. doi: 10.1016/j.ces.2015.07.030.
- MERRIE A., DUNN D.C., METIAN M., BOUSTANY A.M., TAKEI Y., ELFERINK A.O., OTA Y., CHRISTENSEN V., HALPIN P.N. and ÖSTERBLOM H., 2014 – *An ocean of surprises – Trends in Human Use, Unexpected Dynamics and Governance Challenges in Areas Beyond National Jurisdiction*. Glob. Environ. Chang. 27, 19 – 31. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2014.04.012.
- Millennium Ecosystem Assessment, 2005 – *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press, Washington DC.
- NORSE E.A., BROOKE S., CHEUNG W.W.L., CLARK M.R., EKELAND I., FROESE R., GJERDE K.M., HAEDRICH R.L., HEPPELL S.S., MORATO T., MORGAN L.E., PAULY D., SUMAILA R. and WATSON R., 2012 – *Sustainability of Deep- Sea Fisheries*. Marine Policy. 36, 307-320.
- PALUMBI S.R., SANDIFER P.A., ALLAN J.D., BECK M.W., FAUTIN, D.G., FOGARTY M.J., HALPERN B.S., INCZE L.S., LEONG J.A., NORSE E., STACHOWICZ J.J. and WALL D.H., 2009 – *Managing for Ocean Biodiversity to Sustain Marine Ecosystem Services*. Front. Ecol. Environ. 7, 204 – 211. doi: 10.1890/070135.
- RAMIREZ-LLODRA E., TYLER P.A., BAKER M.C., BERGSTAD O.A., CLARK M.R., ESCOBAR E., LEVIN L.A., MENOT L., ROWDEN A.A., SMITH C.R. and VAN DOVER C.L., 2011 – *Man and the Last Great Wilderness: Human Impact on the Deep Sea*. PLoS One, e22588. doi: 10.1371/journal.pone.0022588.
- Rio Declaration on Environment and Development, 1992 – Principle 15.
- SCHMITZ O.J., LAWLER J.J., BEIER P., GROVES C., KNIGHT G., BOYCE JR D.A., BULLUCK J., JOHNSTON K.M., KLEIN M.L., MULLER K. and PIERCE D.J., 2015 – *Conserving Biodiversity: Practical Guidance about Climate Change Adaptation Approaches in Support of Land-Use Planning*. Nat. Areas J., 35 (1), 190-203.
- Science for Environment Policy, 2015 – *Ecosystem Services and the Environment*. In-depth Report 11 produced for the European Commission, DG Environment for the Science Communication Unit, UWE, Bristol. Available at: <http://ec.europa.eu/science-environment-policy>.
- SEIDL R., SPIES T.A., PETERSON D.L., STEPHENS S.L. and HICKE J.A., 2016 – *Searching for Resilience: Addressing the Impacts of Changing Disturbance Regimes on Forest Ecosystem Services*. J. Appl. Ecol. 53, 120-129. doi: 10.1111/1365-2664.12511.
- SMITH C.R., GRANGE L.J., HONIG D.L., NAUDTS L., HUBER B., GUIDI L. and DOMACK E. 2011 – *A Large Population of King Crabs in Palmer Deep on the West Antarctic Peninsula Shelf and Potential Invasive Impacts*. Proc. Roy. Soc. B, rspb20111496. doi: 10.1098/rspb.2011.1496.
- TEEB, 2010 – *The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Mainstreaming the Economics of Nature. A Synthesis of the Approach*. Conclusions and Recommendations of TEEB.
- THURBER A.R., SWEETMAN A.K., NARAYANASWAMY B.E., JONES D.O.B., INGELS J. and HANSMAN R.L., 2014 – *Ecosystem Function and Services Provided by the Deep Sea*. Biogeosciences Discuss. 11, 3941-3963. doi: 10.5194/bgd-11-3941-2014.
- TURNER J.T., 2015 – *Zooplankton Fecal Pellets, Marine Snow, Phytodetritus and the Ocean's Biological Pump*. Prog. Oceanog., 130, 205-248.
- WATSON R.A. and MORATO T., 2013 – *Fishing Down the Deep: Accounting for Within-Species Changes in Depth of Fishing*. Fisheries Research. 140, 63-65.
- WEDDING L.M., FRIEDLANDER A.M., KITTINGER J.N., WATLING L., GAINES S.D., BENNETT M., HARDY S.M. and SMITH C.R., 2013 – *From Principles to Practice: a Spatial Approach to Systematic Conservation Planning in the Deep Sea*. Proc. Biol. Sci. 280, 20131684. doi: 10.1098/rspb.2013.1684.
- XIAO N., HERNDL G.J., HANSELL D.A., BENNER R., KATTNER G., WILHELM S.W., KIRCHMAN D.L., WEINBAUER M.G., LUO T., CHEN F. and AZAM F., 2010 – *Microbial Production of Recalcitrant Dissolved Organic Matter: Long-Term Carbon Storage in the Global Ocean*. Nature Reviews. 8, 593-599.

Les services écosystémiques marins en Europe

Clara Grillet,
Claire Bertin,
Jennifer T. Le
et Adrien Comte

Le concept de services écosystémiques (SE) désigne les nombreux bénéfices que retirent les sociétés humaines d'écosystèmes en bonne santé. Cette notion a des implications théoriques et pratiques car elle pense la science en termes économiques afin de sensibiliser la population à la valeur des écosystèmes, le but étant d'utiliser les SE pour fonder une gestion environnementale efficiente économiquement et durablement. Les SE sont particulièrement utiles pour comprendre les écosystèmes marins et côtiers, qui sont traditionnellement peu soumis à des régulations sur les problématiques de la protection de l'environnement et de la planification spatiale. De plus, le concept de services écosystémiques souligne le rôle crucial de l'océan en tant que régulateur climatique et combien il est indispensable pour mettre en œuvre des projets d'atténuation et d'adaptation aux défis posés par les changements climatiques. La mise en œuvre de la gestion intégrée, qui prend en compte les SE, existe déjà à l'échelle régionale au sein de l'Union européenne. La prochaine étape nécessite donc d'étendre l'approche SE à d'autres régions, comme la Méditerranée, afin d'assurer la résilience des écosystèmes et d'empêcher la dégradation des services qu'ils fournissent.

INTRODUCTION

Le terme de "services écosystémiques" est né dans les années 1970 pour sensibiliser le public à la nécessité de protéger la biodiversité. C'est un concept utilitariste qui pense le fonctionnement des écosystèmes en termes de biens et de services destinés aux populations humaines. La Convention sur la diversité biologique de 1992 définit les écosystèmes comme "un complexe dynamique formé de communautés de plantes, d'animaux et de micro-organismes et de leur environnement non vivant qui, par leur interaction, forment une unité fonctionnelle". Les écosystèmes sont donc composés d'animaux, plantes, minéraux et populations humaines qui vivent ensemble dans un espace commun. Les interactions au sein du système peuvent produire un ensemble de services utiles aux sociétés humaines. Ces services

sont liés à l'exploitation des ressources naturelles (bois, poissons), à la régulation de l'environnement (qualité de l'eau, pollinisation) ou encore constituent des services culturels (loisirs, patrimoine naturel). Toutefois, les modes de vie des sociétés humaines créent souvent une pression importante sur le capital naturel, c'est-à-dire sur les ressources naturelles de ces écosystèmes ainsi que sur leur fonctionnement. Par conséquent, des activités humaines comme la surpêche, l'exploitation des ressources pétrolières, le rejet de déchets ou encore le transport maritime ont des répercussions négatives, aussi bien directes qu'indirectes, sur la capacité des écosystèmes à produire ces services écosystémiques (Costanza et al., 2014). Le concept de SE a donc été développé pour mesurer l'impact des pressions anthropiques sur la santé des écosystèmes et leur capacité à fournir des services.

L'approche des SE a pour but d'évaluer les impacts en intégrant l'écologie et l'économie. Il s'agit d'identifier les fonctions écologiques pour mieux les traduire en unités de valeur économique. Un écosystème fonctionne en utilisant ses ressources naturelles pour produire les biens et les services qui augmentent le bien-être humain (Van den Belt et al., 2016). Ainsi, un écosystème côtier a un montant fixe de capital naturel. Par exemple, les mangroves constituent des habitats pour de nombreuses espèces de poissons; et sont notamment un lieu de nurserie pour les juvéniles (Chumra et al., 2003). En protégeant les jeunes poissons, les mangroves maintiennent et augmentent les populations de poissons disponibles pour les pêcheries locales (Aburto-Oropeza et al., 2008). Ainsi, cet écosystème produit un service précieux en fournissant de la nourriture et des habitats. De même, ce territoire produit souvent d'autres services. Les mangroves font partie des systèmes biochimiques les plus actifs du monde et sont par conséquent d'importants puits de carbone (Chumra et al., 2003; Barbie et al., 2011). De plus, leur système complexe de racines atténue l'érosion côtière (Wolanski, 2007). Le concept de SE

se penche donc sur la manière dont les populations humaines sont dépendantes des écosystèmes, quels bénéfices ces écosystèmes produisent au sens utilitariste du terme, et comment les gérer et les protéger pour la conservation de la biodiversité et le maintien de ces services pour l'Homme.

UN CONCEPT ANTHROPOCENTRÉ

Le concept de SE est, dans son essence même, centré sur l'humain. Les fonctions écosystémiques sont seulement considérées comme étant des services s'ils contribuent à améliorer le bien-être des êtres humains. Il existe plusieurs classifications des différents types de services que les écosystèmes fournissent. Une typologie reconnue est l'Évaluation des écosystèmes pour le millénaire (Millenium Ecosystem Assesment (MEA), 2005). Ce cadre divise les SE en quatre groupes. D'autres catégorisations, comme l'Économie des écosystèmes et de la biodiversité (The Economics of Ecosystems and Biodiversity (TEEB), 2010), utilisent des regroupements semblables.

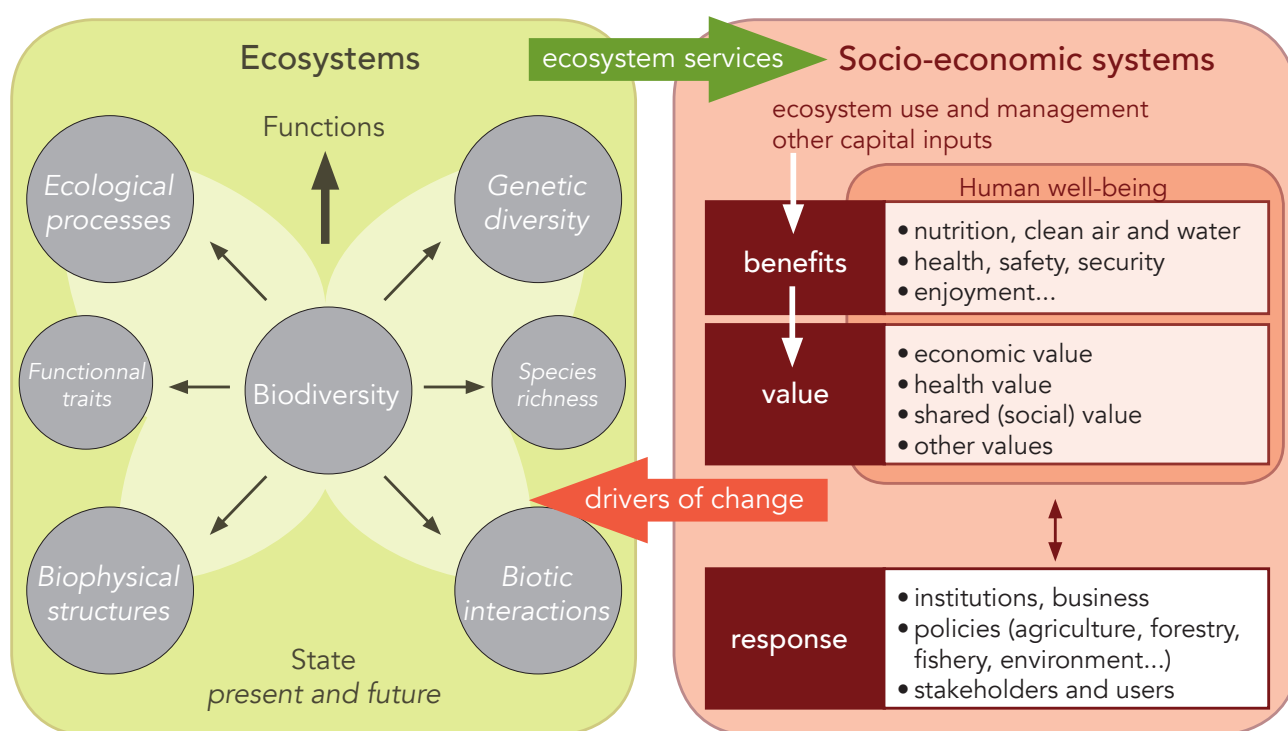


Fig.1 – Cadre conceptuel pour l'évaluation des écosystèmes au niveau européen. © biodiversity.europa.eu/maes.



En général, les écosystèmes marins et côtiers produisent :

- des services d'approvisionnement : pêcheries, bioprospection, matériaux de construction ;
- des services de soutien : maintien du cycle de vie pour la faune et la flore, production primaire et secondaire (ex : photosynthèse), cycle des éléments et des nutriments ;
- des services de régulation : séquestration et stockage du carbone, prévention de l'érosion, traitement des eaux usées, modération des phénomènes météorologiques extrêmes ;
- des services culturels : tourisme, loisirs, bénéfices esthétiques et spirituels.

Des espaces côtiers jusqu'aux profondeurs abyssales, l'océan recouvre la majorité de la planète et fournit une série de services à la société. Certains services de régulation et services culturels sont peu souvent pris en compte dans le processus de prise de décision bien qu'ils soient significatifs (ex : l'océan absorbe presque le tiers du dioxyde de carbone émis (GIEC, 2014)). Les SE marins sont le plus souvent pris pour acquis. On suppose évident que les poissons vivent dans l'océan, que les bateaux naviguent sur les mers et que les touristes marchent librement sur la plage. Comme ces services sont considérés comme allant de soi, ils sont peu souvent pris en compte dès lors qu'il s'agit de prendre des décisions quant aux investissements et aux aménagements. Le concept de SE met en valeur les bénéfices cachés que les humains tirent de leurs écosystèmes, par exemple en donnant un prix monétaire à ces services (TEEB, 2010). Il est difficile d'évaluer et de quantifier l'ensemble des services écosystémiques côtiers et marins, car un même écosystème peut avoir un impact local, régional et global ; sans compter que la collecte de données est souvent fastidieuse (Pendleton, 2016). Il demeure que nombre de recherches poussées concluent que la valeur monétaire totale des SE marins et côtiers atteignait 20 900 milliards de dollars par an en 2011 (Costanza et al., 2014). En dépit de la perte de biodiversité, notamment avec la détérioration des récifs coralliens, les SE gagnent en valeur depuis 20 ans grâce à une augmentation de la recherche dans le domaine.

SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES MARINS ET CHANGEMENT CLIMATIQUE

De nouvelles données ont montré que plusieurs SE sont directement reliés aux politiques relatives aux changements climatiques, tant pour l'atténuation que pour l'adaptation. En premier lieu, plusieurs écosystèmes côtiers et marins sont importants pour la séquestration de carbone. Les écosystèmes côtiers comme les mangroves, herbiers et marécages peuvent stocker et retenir le carbone d'une façon non négligeable. La destruction de ces écosystèmes coûte entre 6 000 et 42 000 milliards de dollars par an en dommages économiques (Pendleton et al., 2012). Plusieurs programmes actuellement en cours essaient d'évaluer si ces écosystèmes pourront être couverts par les mécanismes REDD + (Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation) dans le futur (Herr et al., 2011).

S'agissant de l'adaptation, les écosystèmes marins et côtiers constituent un moyen de subsistance primordial pour des millions de personnes à travers le monde, principalement par les pêcheries et le tourisme (Allison et al., 2016). Ces écosystèmes sont vulnérables aux impacts des changements climatiques. C'est pourquoi il est nécessaire d'établir des formes d'adaptation afin de protéger les écosystèmes et les services qu'ils rendent, et par-là protéger les humains (Gattuso et al., 2015). Les mangroves et les récifs coralliens protègent les villes littorales contre l'érosion des côtes, une fonction désormais essentielle en raison de l'élévation du niveau des mers et du changement de la distribution planétaire des cyclones (Das et Vincent, 2009 ; Gedan et al., 2010 ; Pramova et al., 2012). Herbiers et huîtres protègent également les côtes de l'érosion (Swann, 2008).

Il est envisageable que les effets négatifs des changements climatiques (ex : l'augmentation de la température et du niveau des mers, l'acidification et la désoxygénation de l'océan, la multiplication des phénomènes météorologiques extrêmes)

vont du moins modifier sinon altérer la fonction d’approvisionnement en services des écosystèmes côtiers et marins dans le futur (Craft et al., 2009). Il est donc important de pouvoir évaluer l’approvisionnement actuel des SE des écosystèmes marins et côtiers afin de comprendre les arbitrages et opportunités futurs pour mieux s’attaquer aux questions mondiales telles que les changements climatiques.

LA GESTION DES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES EN MILIEU MARIN

À l’origine, le concept de SE s’appliquait aux écosystèmes terrestres, il s’est petit à petit appliqué aux écosystèmes côtiers et marins, en intégrant les interfaces terre/mer. L’océan a des frontières beaucoup plus fluides que les systèmes terrestres, ce qui rend difficile à cartographier les flux de services en l’absence de données scientifiques supplémentaires (Jobstvogt et al., 2014). La planification spatiale des espaces marins est par conséquent moins développée et n’est devenue une question politique de premier plan que récemment. Océan et atmosphère sont également fortement liés car les changements atmosphériques peuvent modifier la composition chimique des océans (Screen et Francis, 2016). Ces relations complexes et interconnectées rendent difficiles la gestion des systèmes côtiers et marins, ce qui demande de développer des stratégies innovantes pour s’y atteler.

De plus, la mise en œuvre des différentes régulations est souvent compliquée par des questions relatives aux juridictions. Les États sont juridiquement compétents dans leurs zones économiques exclusives (ZEE), habituellement tracées à 200 milles nautiques des côtes. Elles peuvent parfois s’étendre jusqu’à la fin de leur plateau continental, dont la longueur est plus variée. Cette division en zones maritimes restreintes signifie qu’une large partie de l’océan n’est pas sujette à régulation étatique. Dans le but de protéger efficacement les écosystèmes

marins, la Convention des Nations unies sur le droit de la mer de 1982 définit les droits et responsabilités des États sur l’océan mondial. L’accord a créé également plusieurs organes de gouvernance comme l’Autorité internationale des fonds marins qui gère les ressources des fonds marins hors des territoires étatiques. Mais la question de la gestion des zones situées au-delà des limites aux juridictions nationales, comme la colonne d’eau et le plancher océanique, demeure. L’action collaborative interétatique reste une des seules manières pour les États de créer un cadre juridique visant à protéger les écosystèmes.

Les sociétés humaines ont toutes les raisons d’adopter une approche protectrice et durable pour développer les écosystèmes marins et côtiers. Bien que la traduction des processus écologiques en SE demeure encore peu claire, la biodiversité demeure souvent au cœur de l’approvisionnement en services (Palumbi et al., 2008 ; Cardinale et al., 2012) aussi bien que la résilience et la capacité de se remettre des impacts (Worm et al., 2006 ; Lindegren et al., 2016). Les écosystèmes en bonne santé fournissent plus de services, aussi bien monétaires que non monétaires, que ceux perturbés ou dégradés. C’est pourquoi intégrer le concept de SE comme un nouvel outil de gestion des espaces marins, par exemple la planification spatiale marine ou encore la gestion basée sur les écosystèmes, devient de plus en plus important à mesure qu’augmente l’empreinte écologique humaine sur l’océan (Böhnke-Heinrichs et al., 2013). Plus particulièrement, les grands fonds sont de plus en plus touchés par l’activité humaine (Ramirez-Llodra et al., 2011 ; Le and Sato, 2016). Par exemple, les activités de pêche ont un impact grandissant sur les écosystèmes des grands fonds car les pêcheries se déplacent plus profondément dans la colonne d’eau en raison de l’augmentation de la température des mers. Par ailleurs, les compagnies d’extraction d’énergie fossile s’intéressent de plus en plus aux ressources minières et au pétrole des fonds marins au fur et à mesure que les ressources sur terre s’amenuisent.

UN OUTIL PRATIQUE POUR LA GESTION DURABLE DES ÉCOSYSTÈMES MARINS ET CÔTIERS

Il existe déjà des programmes actuels d'évaluation des SE marins et côtiers à travers le monde, tant au niveau mondial qu'aux échelles nationales et locales. Ces évaluations ont trois buts définis. Premièrement, elles identifient et quantifient les bénéfices tirés de l'océan et des différents écosystèmes côtiers en termes de biens et services écosystémiques. Ensuite, elles réunissent l'information et les données afin d'améliorer la gestion et la planification marine. Enfin, elles sont utiles pour faire part de la valeur de l'océan. Les évaluations sont parfois systématiques, comme pour le programme français "Évaluation française des écosystèmes et services écosystémiques", et permettent d'identifier les différentes alternatives et opportunités

pour mieux gérer la biodiversité (EFESE, 2016). D'autres systèmes d'évaluation vont encore être utilisés pour améliorer la planification marine et la gestion à l'échelle locale. Le projet VALMER est un exemple d'évaluation dont le but est d'enrichir les connaissances sur les SE dans la Manche afin de parfaire la gestion et la planification (VALMER, 2016). Les études portées sur les SE peuvent également être utilisées pour communiquer sur le rôle des environnements marins et côtiers. Par exemple, la valeur d'un requin vivant sur l'île de Palau est 16,6 fois plus importante que la valeur d'un requin mort (tué pour la vente de ses ailerons (Jolly, 2011)). Par ailleurs, une récente étude du WWF a pour but de montrer la valeur considérable de l'environnement marin (Ocean Wealth Report, 2015). Mais ces études sont souvent menées selon des critères propres à chaque État, ce qui rend les comparaisons entre évaluations difficiles et ne permet pas de trouver un résultat unanime sur l'état de la biodiversité dans les écosystèmes transnationaux.

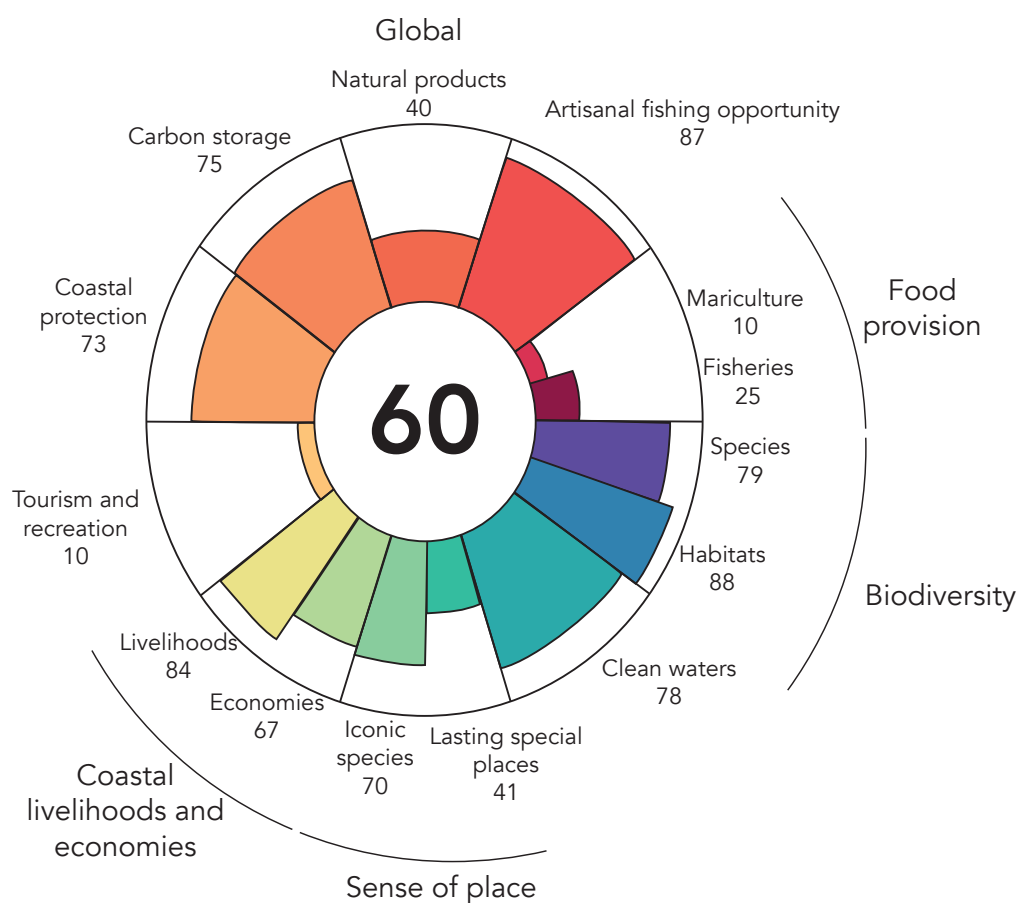


Fig.2 – Critères pris en compte dans la création de l'Indicateur de la santé de l'océan. © Halpern et al., 2012. With permission.



Depuis 2012, un nouvel indicateur a été développé pour remédier à cette situation. Le Ocean Health Index (OHI, ou Indicateur de la santé de l'océan) compile des données provenant du monde entier pour donner une évaluation de l'état de santé des océans au sein de la zone économique exclusive de chaque État (Halpern et al., 2012). L'OHI classe les pays sur la base de nombreux indicateurs afin d'identifier les points de pression, d'amélioration et de force. Cet indicateur innovant crée donc un standard transparent et global qui prend en compte les intérêts divergents (préservation ou exploitation des ressources naturelles océaniques). L'OHI doit donc être utilisable "par les scientifiques, les gestionnaires, les décideurs politiques et le public" afin d'évaluer et de communiquer sur les résultats donnés par les différentes politiques de gestion intégrée (Halpern et al., 2012). L'OHI serait particulièrement intéressant pour promouvoir la collaboration interétatique, évaluer les tendances touchant à la santé des écosystèmes marins au niveau mondial et informer les décideurs politiques au niveau national.

INTÉGRER LE CONCEPT DE SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES DANS LE PROCESSUS DÉCISIONNEL ET L'ÉLABORATION DES POLITIQUES PUBLIQUES: L'EXEMPLE DE L'APPROCHE COLLABORATIVE DE L'UNION EUROPÉENNE

Des politiques qui intègrent à la gestion des espaces marins l'approche SE sont déjà mises en œuvre au sein de l'Union européenne (UE). Depuis le 17 juin 2008, tous les États membres de l'UE doivent se conformer à la Directive-Cadre Stratégie pour le milieu marin (DCSMM), qui dispose dans son article 1.3 que "la gestion des activités humaines [doit permettre] l'utilisation durable des biens et des services marins par les générations actuelles et à venir" (Europa, 2016). Cette directive a pour objectif principal de garantir le bon état écologique (BEE)

du milieu marin européen d'ici à 2020. Le BEE est un indicateur standard calculé à partir de 11 critères qualitatifs qui évalue la capacité d'un écosystème à fonctionner correctement et durablement (MEEM, 2013). La DCSMM suit donc l'approche SE en promouvant une gestion intégrée: les écosystèmes marins sont protégés dans le but de garantir leurs fonctions écologiques, et ainsi les services qu'ils produisent.

En France par exemple, les zones maritimes sont divisées en plusieurs sous-régions, chacune comprenant de vastes écosystèmes délimités par des frontières administratives. Chaque sous-région développe et met en œuvre un Plan d'action pour le milieu marin (PAMM) (Ministère de l'Ecologie, 2011). Des réunions de concertations sont menées avec l'ensemble des parties prenantes (élus, scientifiques, pêcheurs...) et des consultations publiques sont organisées pour faire un état des lieux des caractéristiques physiques, biologiques, économiques et sociales. Ces consultations ont également pour but d'identifier et de présenter les pressions liées aux activités humaines tout en exposant les différents objectifs des politiques publiques envisagées (Direction interrégionale de la mer, 2015). Au niveau européen, différents groupes de travail sont organisés autour de différentes thématiques, comme le BEE, et sont fédérés par un groupe de coordination centrale. De plus, l'approche SE de la directive encourage les États membres voisins à collaborer et à faire des actions concertées pour protéger les écosystèmes qu'ils partagent.

LA GESTION INTÉGRÉE EN MÉDITERRANÉE: L'EXEMPLE DES HERBIERS DE POSIDONIE

Les herbiers de posidonie (*posidonia oceanica*) sont des plantes aquatiques à fleur, côtières, ayant une expansion très lente: 1 m en 100 ans (Boudouresque et al., 2010). C'est une espèce endémique à la Méditerranée qui joue un rôle essentiel pour la biodiversité marine: près de 50 espèces caractéristiques, c'est-à-dire des espèces qui ne

vivent qu'au sein de cet habitat, ont été identifiées (Campagne *et al.*, 2015). Ces herbiers constituent de véritables forêts sous-marines. Ces herbiers, ou prairies, ont différentes fonctions écologiques : source de nourriture pour de nombreuses espèces comme les oursins et les labres ; lieu de reproduction et lieu de nurserie privilégié pour les juvéniles qui s'y développent en individus adultes car ils y trouvent nourriture et protection. Les herbiers de posidonie sont des lieux qui accueillent de nombreuses espèces de poissons. Cette biodiversité marine est une garantie pour de multiples activités économiques, aussi bien en tant que vivier pour la pêche artisanale que site récréatif.

De plus, par leurs rhizomes et leurs racines, les herbiers de posidonie fixent les sédiments du fond meuble et protègent ainsi la côte de l'érosion causée par des phénomènes climatiques comme les tempêtes. De même, les feuilles mortes de posidonie amenées sur les plages par les courants et les vents protègent les plages en empêchant le sable d'être emporté lors de tempêtes, ce qui permet de protéger le trait de côte en évitant l'érosion. Enfin, les herbiers de posidonie constituent un outil potentiel d'atténuation des changements climatiques grâce à leur stockage du carbone.

Cependant ces herbiers sont vulnérables et sont notamment soumis à de fortes pressions dues aux activités humaines : ancres de bateaux qui les arrachent, urbanisation des côtes, augmentation des infrastructures comme les ports et les digues qui détruisent les herbiers en les recouvrant (Telesca *et al.*, 2015). Or la destruction ou la détérioration de ce milieu a un impact sur la présence des espèces marines, ce qui entraîne une perte de biodiversité : les espèces se déplacent ou disparaissent. Ceci provoque une baisse du nombre de poissons et d'espèces différentes dans la zone, ce qui rend les activités de pêche plus difficiles et fait perdre de son attractivité aux activités récréatives.

CONCLUSION

Le concept de services écosystémiques est une notion anthropocentrée qui vise à souligner les bénéfices que les humains retirent de leur installation au sein d'écosystèmes en bonne santé. La valorisation économique de ces services est devenue l'étalon de mesure pour l'ensemble des parties prenantes, qui décident de façon collaborative des meilleures politiques à adopter pour protéger et utiliser durablement ces multiples écosystèmes. L'approche des services écosystémiques est particulièrement utile pour promouvoir la gestion intégrée des ressources naturelles. Comme les écosystèmes ne connaissent pas de frontières, le concept de services écosystémiques constitue un outil de collaboration pour les États afin qu'ils protègent et exploitent durablement leurs ressources en commun. Puisqu'un écosystème dégradé produit moins de services, les coûts totaux associés à la gestion non intégrée d'un espace seront plus élevés que dans le cas d'une gestion prenant en compte les services écosystémiques. C'est pourquoi l'approche des services écosystémiques est intelligente économiquement et écologiquement : la prise en compte de ces services rendus par les différents écosystèmes coûte moins d'argent tout en encourageant une gestion durable. Sur le long terme, elle augmente les bénéfices tirés de ces mêmes écosystèmes marins et côtiers.



RÉFÉRENCES

- ALLISON E. H. and BASSETT H. R., 2015 – *Climate Change in the Oceans: Human Impacts and Responses*. Science, 350 (6262), 778-782.
- ABURTOOROPEZA O., EZCURRA E., DANEMANN G., VALDEZ V., MURRAY J. and SALA E., 2008 – *Mangroves in the Gulf of California Increase Fishery Yields*. In: PNAS, 105 (30): 10456-10459. doi: 10.1073/pnas.08046011050.
- BARBIER E. B., HACKER S. D., KENNEDY C., KOCH E. W., STIER A. C. and SILLIMAN B. R., 2011 – *The Value of Estuarine and Coastal Ecosystem Services in Ecological Monographs*. 81: 169 – 193. doi: 10.1890/101510.1.
- BOHNKEHENRICH A., BAULCOMB C., KOSS R., HUSSAIN S. S. and DE GROOT R.S., 2013 – *Typology and Indicators of Ecosystem Services for Marine Spatial Planning and Management in Journal of Environmental Management*. 130: 135-140. doi: 10.1016/j.envman.2013.08.027.
- BOUDOURESQUE C., 2010 – *Structure et fonctionnement des écosystèmes benthiques marins. L'écosystème à Posidonia oceanica*. Centre d'océanologie de Marseille. http://www.com.univmrs.fr/~boudouresque/Documents_enseignement/Ecosystemes_MPO_3_Posidonia_web_2010.pdf.
- CAMPAGNE C., SALLES J.-M., BOISSERY P. and DATER J., 2015 – *The Seagrass Posidonia Oceanica: Ecosystem Services Identification and Economic Evaluation of Goods and Benefits in Marine Pollution Bulletin*. Volume 97, Issues 1-2, pp. 391-400.
- CARDINALE B. J., DUFFY J. E., GONZALEZ A., HOOPER D. U., PERRINGS C. et al., 2012 – *Biodiversity Loss and Its Impact on Humanity*. Nature. 486: 5967. doi: 10.1038/nature11148.
- COSTANZA R., D'ARGE R., DE GROOT R., FARBERK S., GRASSO M., HANNON B., LIMBURG K., NAEEM S., O'NEILL R., PARUELO V. L., RASKIN J., SUTTONK R. G. and VAN DEN BELT P., 1997 – *The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital*. Nature. Vol. 387: 253-260.
- COSTANZA R., DE GROOT R., SUTTON P., VAN DER PLOEG S., ANDERSON S. J., KUBISZEWSKI I., FARBER S. and KERRY TURNER R., 2014 – *Changes in the Global Value of Ecosystem Services in Global Environmental Change*. Vol. 26: 152-158.
- DIRECTION INTERREGIONALE DE LA MER NORD ATLANTIQUE MANCHE OUEST, 2015 – *Plans d'actions pour le milieu marin: consultation du public sur les programmes de mesures*. http://www.dirm.nordatlantiquemancheouest.developpementdurable.gouv.fr/plansdactionspourlemilieumarinconsultationa418.html#sommaire_1.
- EFEESE, 2016 – *L'essentiel du cadre conceptuel*. http://www.developpementdurable.gouv.fr/IMG/pdf/Efese_cadre_conceptuel.pdf.
- EUROPA, 2016 – *European Commission, Environment, Marine and Coast, Coastal and marine policy. Our Oceans, Seas and Coasts*.
- GATTUSO J. P., MAGNAN A., BILLÉ R., CHEUNG W. W. L., HOWES E. L., JOOS F. and HOEGH-GULDBERG, O., 2015 – *Contrasting Futures for Ocean and Society from Different Anthropogenic CO₂ Emissions Scenarios*. Science, 349 (6243), aac4722.
- 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., STUART CHAPIN F., CROWDER L. B., DALY K. L., DONEY S. C., ELFES C., FOGARTY M. J., GAINES D. S., JACOBSEN K. I., BUNCE KARRER L., LESLIE H. M., NEELEY E., PAULY D., POLASKY S., RIS B., ST MARTIN K., STONE G. S., RASHID SUMAILA U. and ZELLER D., 2012 – *An Index to Assess the Health and Benefits of the Global Ocean*. Nature, 488: 615-622. http://ec.europa.eu/environment/marine/eucoastandmarinepolicy/marinestategyframeworkdirective/index_en.htm
- HERR D., PIDGEON E. and LAFFOLEY D. (eds.), 2011 – *Blue Carbon Policy Framework: Based on the first workshop of the International Blue Carbon Policy Working Group*. Gland, Switzerland: IUCN and Arlington, USA: CI. vi + 39pp.
- IFREMER – *Directive Cadre Stratégie Pour le Milieu Marin, Niveau national*. <http://sextant.ifremer.fr/fr/web/dcsmm/niveaunational>.
- IPCC, 2014 – *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.). IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.



- JOBSTVOGT N., TOWNSEND M., WITTE U. and HANLEY N., 2014 – *How Can We Identify and Communicate the Ecological Value of Deepsea Ecosystem Services?* PLoS ONE. 9 (7): e1000646. doi: 10.11371/journal.pone.01000646.
- JOLLY D., 2011 – *Priced Off the Menu? Palau's Sharks Are Worth \$1.7 Million Each, a Study Says.* The New York Times, 2 May 2011.
- LE J. T. and SATO K. N., 2016 – *Ecosystem Services of the Deep Ocean.* Ocean and Climate Platform, www.ocean-climate.org.
- LINDEGREN M., CHECKLEY D. M., OHMAN M. D., KOSLOZ J. A. and GOERICKE R., 2016 – *Resilience and Stability of a Pelagic Marine Ecosystem.* Proc. R. Soc. B. doi: 10.1098/rspb.2015.1931.
- MILLENIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT, 2005 – *Ecosystems and Human Wellbeing: a Framework for Assessment.* Island Press, 2005: 2536 at <http://millenniumassessment.org/documents/document.765.aspx.pdf>.
- MINISTERE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DES TRANSPORTS ET DU LOGEMENT, 2011 – *Pour un bon état écologique du milieu marin. La mise en œuvre de la directive-cadre stratégie pour le milieu marin.* http://www.dirmmemn.developpementdurable.gouv.fr/IMG/pdf/2011_06_06_brochure_DCSMM.pdf.
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'ÉNERGIE ET DE LA MER, 2013 – *Pour un bon état écologique du milieu marin en 2020. La mise en œuvre de la directive-cadre stratégie pour le milieu marin.*
- PALUMBI S. R., SANDIFER P. A., ALLAN J. D., BECK M. W. and FAUTIN D. G. et al., 2008 – *Managing for Ocean Biodiversity to Sustain Marine Ecosystem Services.* Front. Ecol. Environ. 7 (9): 204211. doi: 10.1890/070135.
- PENDLETON L., DONATO D. C., MURRAY B. C., CROOKS S., JENKINS W. A., SIFLEET S. and MEGONIGAL P., 2012 – *Estimating Global "Blue Carbon" Emissions from Conversion and Degradation of Vegetated Coastal Ecosystems.* PLoS one, 7 (9), e43542.
- PENDLETON L. H., THEBAUD O., MONGRUEL R. C. and LEVREL H., 2016 – *Has the value of global marine and coastal ecosystem services changed?* Marine Policy 64 (2016) 156 – 158.
- RAMIREZ-LLODRA E., TYLER P.A., BAKER M.C., BERGSTAD O.A., CLARK M.R. et al., 2011 – *Man and the Last Great Wilderness: Human Impact on the Deep Sea.* PLoS ONE 6 (8): e22588. doi: 10.1371/journal.pone.0022588.
- SCREEN J. A. and FRANCIS J. A., 2006 – *Contribution of Seaice Loss to Arctic Amplification Is Regulated by Pacific Ocean Decadal Variability.* Nature Climate Change. doi: 10.1038/nclimate3011.
- THE ECONOMICS OF ECOSYSTEMS BIODIVERSITY, 2010 – *The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Mainstreaming the Economics of Nature: A Synthesis of the Approach, Conclusions and Recommendations of TEEB.* p.1-36.
- TRUEMAN C. N., JOHNSTON G., O'HEA B. and MACKENZIE K. M., 2014 – *Trophic Interactions of Fish Communities at Midwater Depths Enhance Long-Term Carbon Storage and Benthic Production on Continental Slopes.* Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences 281, 20140669 – 20140669.
- UNEP and GRID-ARENDAL, 2008 – *Vital Water Graphics, an Overview of the State of the World's Fresh and Marine Waters.* 2nd Edition, www.unep.org/dewa/vitalwater/article168.html.
- UNITED NATIONS, 1992 – *Convention on Biological Diversity.* www.cbd.int/doc/legal/cbden.pdf.
- VALMER, 2016 – <http://www.valmer.eu>.
- VAN DEN BELT M., GRANEK E., GAILL F., HALPERN B., THORNDYKE M. and BERNAL P., 2016 – *World Ocean Assessment I: The First Global Integrated Marine Assessment, Part III: Assessment of Major Ecosystem Services from the Marine Environment (Other than Provisioning Services) Chapter 3. Scientific Understanding of Ecosystem Services in World Ocean Assessment,* www.un.org/depts/los/global_reporting/WOA_RPROC/Chapter_03.pdf.
- VASSALLO P., PAOLI C., ROVERE A., MONTEFALCONE M., MORRI C. and BIANCHI C., 2013 – *The Value of the Seagrass Posidonia Oceanica: a Natural Capital Assessment.* Volume 75, Issues 1-2, 15 October 2013, pp. 157-167.
- WOLANSKI E., 2007 – *Estuarine ecology.* Elsevier Science, 1st edition.
- WORM B., BARBIER E. B., BEAUMONT N., DUFFY J. E., FOLKE C. et al., 2006 – *Impacts of Biodiversity Loss on Ocean Ecosystem Services.* Science. 314: 787790. doi: 10.1126/science.1132294.

Les réseaux d'aires marines protégées et le changement climatique : un plaidoyer politique

Un océan en bonne santé permettra une meilleure résistance des écosystèmes au changement climatique, et donc un renforcement des services écosystémiques indispensables à la viabilité de la planète. Mais face à une pression de plus en plus importante sur un océan qui doit par ailleurs intégrer le développement de nouvelles activités anthropiques, les enjeux politiques doivent associer la réduction des émissions de CO₂ et les enjeux de protection de la biodiversité. Sur les quelque 10000 aires marines protégées existantes au niveau mondial, nombreuses le sont seulement sur le papier. Vingt pays maritimes comptent à eux seuls 80 % de la surface de l'ensemble des aires marines protégées. Une des principales difficultés dans le fonctionnement d'un réseau d'AMP est leur gouvernance et leur cogestion entre les acteurs publics, les secteurs professionnels et les usagers de la mer. Afin de maintenir un climat viable pour l'humanité, les politiques internationales et gouvernementales doivent entrer dans une logique d'adaptation et d'atténuation, et intégrer l'océan comme solution basée sur la nature, pour lutter contre le changement climatique.

La connaissance sur le fonctionnement des écosystèmes marins a progressé ces dernières années, en particulier dans le domaine de la connaissance des interrelations systémiques avec le climat. Cette amélioration de la connaissance sur les écosystèmes océaniques a permis de sensibiliser les décideurs et d'accélérer leur prise de décision concernant la protection des océans, en raison même de l'urgence de la situation climatique, et au regard du rôle régulateur de l'océan pour le climat. Les décisions de la COP 21 de la Convention-cadre des Nations unies sur le changement climatique et de l'Accord de Paris ont montré le chemin à suivre. Le cheminement politique vers une meilleure prise en compte de la protection de l'océan dans les politiques du climat doit donc se poursuivre et se faire grâce à cette amélioration de la connaissance.

La protection des écosystèmes marins pouvant dans une certaine mesure atténuer les effets du

changement climatique, l'océan est de ce fait partie des solutions basées sur la nature pour lutter contre le changement climatique. Des habitats marins en bonne santé permettent également aux espèces marines de mieux s'adapter au changement climatique.

Sur la base de cette évidence scientifique qui démontre que le bon fonctionnement des écosystèmes marins permet de fournir des services écosystémiques indispensables à la viabilité de la planète, y compris sur le plan climatique, les gouvernements doivent adopter de nouvelles politiques du climat fondées sur des solutions basées sur la nature. Ils doivent les relier à la politique de réduction des émissions de CO₂ et ainsi fusionner l'enjeu de la protection de la biodiversité avec l'enjeu climatique. La protection de la biodiversité marine grâce aux aires marines protégées fait partie de cette stratégie.

Les politiques de protection des habitats marins sont devenues d'autant plus nécessaires que l'anthropisation des océans se nourrit du développement des activités en mer lié à la croissance bleue. Les impacts des nouvelles activités maritimes se cumulent avec l'accroissement des impacts sur la mer des activités humaines basées à terre. Ces facteurs d'altération dégradent progressivement les écosystèmes marins. Corrélativement, l'accélération de la dégradation des écosystèmes marins diminue à son tour la capacité des océans dans son rôle d'atténuation du changement climatique. Elle met aussi en péril la sécurité physique, alimentaire et économique des populations côtières, en particulier pour les petits États insulaires.

Une stratégie nationale ambitieuse suppose la création d'un organisme national dédié à la bonne gestion des activités en mer, capable de restaurer les milieux marins dégradés et capable d'agir pour la dépollution de la mer. Cet organisme est indispensable pour créer, gérer avec efficacité, et animer un réseau national cohérent et résilient d'aires marines protégées et coopérer avec les pays dont ils partagent les mers régionales.

Pour être efficace vis-à-vis d'une politique conjointe de la biodiversité et du climat, la priorité des politiques d'aires marines protégées doit être orientée vers la protection stricte des zones clés pour la biodiversité et pour les services écosystémiques. Elle doit viser l'objectif de protection absolue des habitats marins vulnérables à forte valeur écologique et biologique dont la biomasse associée séquestre une grande quantité de carbone, comme les récifs coralliens, les mangroves, les herbiers marins, les marais salés et les estuaires. Cette protection doit se prolonger vers les eaux profondes, canyons et monts sous-marins de la haute mer dans le cadre des politiques à mener au sein des conventions régionales sur les mers. La protection ne s'arrête pas à la limite des zones économiques exclusives. Les registres des zones marines d'importance écologique et biologique de la Convention sur la diversité biologique (EBSAs – *Ecologically and biologically significant areas*) montrent que les écosystèmes chevauchent les eaux sous juridiction et la haute mer. Le rôle des réseaux d'aires marines protégées est finalement d'assurer la connectivité biologique et écologique qui renforce

la résilience des écosystèmes marins. Pour cela, ils doivent être représentatifs et distribués de manière cohérente dans leur rôle de contribution à la résistance au changement climatique.

Le concept de création d'un réseau global résilient d'aires marines protégées fait appel à un éventail assez large d'outils de protection relevant d'approches sectorielles variées. Cela va de la plus petite aire marine communautaire pour les besoins de la pêche locale ou pour l'écotourisme (LMMA – *Locally-Managed Marine Area*), aux grandes aires marines protégées (LMA – *Large Marine Areas*). Il faut croiser et relier les objectifs relevant de tous les outils sectoriels de protection des océans. Les zones marines particulièrement sensibles reconnues et désignées par l'Organisation maritime internationale (OMI, PSSAs – *Particularly Sensitive Sea Areas*) ou les zones marines vulnérables de l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO, VME – *Vulnerable Marine Areas*) ont aussi leur place dans la construction d'un réseau global résilient d'aires marines protégées pour le climat. Cette intégration donnerait de la cohérence au réseau mondial des aires marines protégées vis-à-vis du changement climatique. Cela faciliterait aussi la gouvernance de la mer. Cette approche intersectorielle de la protection des océans pour le climat peut être facilitée par les pratiques politiques régionales. Les protocoles des parties contractantes des conventions sur les mers régionales doivent ajuster leurs objectifs de protection de la biodiversité et des écosystèmes à ceux de la lutte contre le changement climatique. Dans ce cadre, les organisations régionales des pêches doivent se rapprocher des conventions régionales sur les mers pour élaborer des stratégies communes, comme c'est le cas pour la Convention OSPAR qui a permis d'identifier et de proposer des aires marines protégées de haute mer en Atlantique nord-est. De nouvelles alliances sont à trouver, notamment pour construire des synergies intersectorielles dans le domaine de la recherche sur le fonctionnement des écosystèmes marins.

La réponse aux changements climatiques par les réseaux d'aires marines protégées sera améliorée si les effets cumulatifs des facteurs de stress sont réduits. Les réseaux d'aires marines protégées

répondront également mieux aux changements climatiques et aux autres facteurs de stress s'ils sont gérés efficacement. La gestion doit être adaptative mais renforcée d'un point de vue réglementaire. Les gestionnaires doivent disposer également d'une capacité logistique et technique pour assurer leur mission qui inclut le suivi scientifique des impacts climatiques.

Malheureusement, toutes ces conditions sont loin d'être réunies dans la plupart des pays. Le réseau des aires marines protégées dans le monde ne couvre aujourd'hui qu'à peine 4 % des océans. Cette situation ne cadre pas avec les engagements des États pris à Nagoya en 2010 lors de la 10^e Conférence de la Convention sur la diversité biologique fixant l'objectif de 10 % à atteindre d'ici 2020. Elle l'est d'autant moins que les scientifiques et les ONG, réunis à Sydney en 2014 pour le congrès mondial des parcs, préconisent la protection stricte de 30 % des habitats marins dans toute leur diversité et répartition.

À ce bilan quantitatif très incomplet s'ajoute un problème qualitatif. La plupart des aires marines protégées ne disposent pas de moyens humains et matériels suffisants pour mettre en œuvre de réelles mesures de gestion et de conservation ; c'est-à-dire la recherche et le suivi scientifique, la réglementation des activités, la réduction des pollutions, la surveillance, l'accueil et l'information du public. Sur les quelques 10 000 aires marines protégées existantes au niveau mondial, rares sont celles qui bénéficient d'un statut de protection forte où les prélèvements sont interdits. Les aires marines protégées dans le monde sont pour un grand nombre d'entre elles des aires marines protégées de papier. À cette situation très disqualifiante pour acquérir de la légitimité, s'ajoute une disparité spatiale. Vingt pays maritimes comptent à eux seuls 80 % de la surface de l'ensemble des aires marines protégées dans les océans. Ces aires se concentrent géographiquement et spatialement. On assiste d'ailleurs à une compétition pour la désignation de la plus grande aire marine protégée dans l'océan Pacifique, là où la pression anthropique est moindre.

Cela fait du chiffre pour les statistiques mais cela ne répond en rien pas à l'idée de la création d'un grand réseau cohérent, représentatif et résilient d'aires marines protégées à l'échelle globale qui concerne plus de 150 pays maritimes dans le monde.

Les politiques gouvernementales pour la protection des habitats marins doivent s'attacher à régler l'une des difficultés de la création des aires marines protégées qui est le problème de la gouvernance et de la cogestion des aires marines protégées entre les acteurs publics, les secteurs professionnels et les usagers de la mer. De nombreuses expériences et témoignages ont montré que les aires marines protégées les plus efficaces étaient celles qui associaient étroitement les acteurs socio-économiques à la définition des règles et des mesures de protection de la mer, en particulier le monde de la pêche. Des mécanismes nouveaux de gouvernance participative sont à mettre en œuvre et doivent s'ouvrir aux enjeux climatiques. Cela est d'autant plus nécessaire que la notion de protection de la mer diffère très largement des concepts retenus pour la protection des habitats terrestres. La gestion de la mer basée sur l'écosystème est une démarche scientifique opérationnelle qui reconnaît la complexité des écosystèmes marins et l'existence d'interconnexions entre leurs composantes physiques et biologiques à mettre en relation avec des activités humaines en mer très dispersées et très hétérogènes.

L'utilisation de l'enjeu climatique pour renforcer les politiques de création et de gestion des aires marines protégées permettrait de tenir compte des liens entre les principales composantes de l'écosystème et de la socio-économie maritime lors de l'ébauche de la planification spatiale des activités marines, et ceci sur une base transversale. Une approche socio-écologique fondée sur la connaissance, sur la consultation et la collaboration des acteurs, la sensibilisation des décideurs et des acteurs, mène à une gestion adaptative. La gestion adaptative répond ainsi à un processus itératif qui consiste à évaluer l'efficacité de la gestion et à prendre en compte les nouvelles connaissances scientifiques pour ajuster

et appliquer les régimes de gestion. Ce processus pourrait ainsi continuer à favoriser l'atteinte des objectifs de la protection des océans avec ceux du climat dans le cadre de la croissance bleue.

Les politiques gouvernementales de protection des habitats marins doivent mettre en place des cercles vertueux fondés sur la socio-écologie maritime et sur l'approche écosystémique de la gestion de la mer. C'est à l'intérieur de ces cercles que s'inséreront les mesures de planification spatiale et de gestion basée sur les écosystèmes pour répondre au problème de l'adaptation au changement climatique. La réponse politique à la protection des océans pour le climat se trouve dans la mise en place de systèmes de gouvernance de la mer, permettant un juste équilibre dans une planification spatiale marine et prenant en compte les intérêts des acteurs de la mer avec ceux d'un climat viable pour l'humanité. La planification spatiale marine doit être à cet égard le point de convergence des approches croisées « *Bottom up – Top down* » de la protection des océans.

Les États disposant d'un patrimoine marin conséquent et ayant établi des politiques maritimes intégrées doivent jouer un rôle pilote. Ils doivent inspirer les autres États à prendre des mesures gouvernementales pour la gestion intégrée côtière et la protection de la mer. Cela suppose aussi que

tous les pays maritimes adoptent des politiques nationales de l'environnement marin reposant sur des dispositions législatives et réglementaires plus fortes et sur des outils de gouvernance et de gestion intégrée de la mer basée sur la préservation des écosystèmes marins.

Les gouvernements doivent être appelés à reconsidérer les stratégies globales, régionales et nationales de conservation des habitats marins en croisant les enjeux de la biodiversité marine avec ceux du changement climatique, et répondre dans le même temps aux enjeux du développement durable des océans (ODD 14). Les politiques internationales et gouvernementales de protection des habitats marins doivent entrer dans cette logique des politiques d'adaptation et d'atténuation des impacts du changement climatique.

Les programmes et les politiques environnementales des Nations unies doivent évoluer dans ce sens. La Convention sur le changement climatique et la Convention sur la diversité biologique suivent depuis trop longtemps des chemins séparés. La prise en compte de la relation systémique entre les écosystèmes marins et le climat permettrait très certainement de mieux faire converger ces deux conventions des Nations unies vers une approche conjointe de leurs objectifs.

Océan, changements climatiques et migration humaine

Le rôle de l'océan dans la régulation du climat le place au cœur des enjeux économiques et sociaux du changement climatique et, notamment, des enjeux relatifs à la migration environnementale. Mais s'il limite le réchauffement global, l'océan est aussi fortement perturbé par ce bouleversement majeur. Son rôle de régulation et les services écosystémiques qu'il fournit, sont menacés. L'élévation du niveau de la mer, l'augmentation de la fréquence de phénomènes climatiques destructeurs, tels que les tempêtes de type cyclonique ou les marées de très grande amplitude, ont des conséquences sur les communautés humaines et peuvent être à l'origine de mouvements migratoires. Leur anticipation permettrait de réduire la vulnérabilité des milieux naturels et des communautés qui en dépendent.

L'océan est fondamental pour les équilibres naturels qui permettent la vie sur notre planète. Son importance dans la régulation du climat le place au cœur des enjeux économiques et sociaux du changement climatique, et notamment des enjeux relatifs à la migration environnementale. Car s'il limite le réchauffement climatique, il est fortement perturbé par ce bouleversement majeur. Plus chaud, plus acide, moins bien oxygéné, il se transforme. Son rôle de régulation, ainsi que les services écosystémiques qu'il fournit, sont menacés. La capacité d'absorption des chocs climatiques, par la planète et par ses populations, ainsi que leurs modes d'adaptation aux déséquilibres, en sont affectés.

Les modifications que l'océan subit participent à l'élévation du niveau de la mer et à l'augmentation de la fréquence de phénomènes climatiques destructeurs, tels que les tempêtes de type cyclonique ou les marées de très grande amplitude. Ces modifications notables de l'environnement marin ont des

conséquences sur la sécurité et la vulnérabilité des communautés humaines (inondations, érosion des côtes) ainsi que des conséquences économiques, et peuvent être à l'origine de mouvements migratoires.

UN RÔLE CENTRAL DANS LA RÉGULATION DU CLIMAT

L'océan échange en permanence des gaz, de l'eau et de la chaleur avec l'atmosphère, et il les redistribue autour du globe ; ces mécanismes sont déterminants pour le climat mondial.

Il possède également un rôle de régulation qui permet de limiter le réchauffement global. En effet, ses eaux absorbent plus de 90 % de l'excès de chaleur généré par l'augmentation de l'effet de serre. Par ailleurs, il absorbe également près d'un quart du CO₂ émis par les activités humaines.



L'océan modère donc les fluctuations du climat qui, si elles n'étaient régies que par l'atmosphère, seraient beaucoup plus rapides.

Cependant, ses capacités de stockage de la chaleur et du CO₂ ne sont pas infinies et sa faculté d'absorption tend à baisser dans certaines régions océaniques. Les mécanismes de « pompe à carbone » qu'il assure sont d'ordre physique et biologique. Si la répartition de la biodiversité marine, et notamment du plancton végétal, ou bien si certains paramètres physiques (température, salinité, pH) subissent des variations brutales, alors le rôle de régulation de l'océan risque d'être affecté.

Même si elles ont un impact variable d'une région à l'autre, les conséquences du réchauffement se font sentir dans l'ensemble de l'océan mondial. Les observations scientifiques montrent que ses eaux se réchauffent, deviennent plus acides et sont moins bien oxygénées. Non seulement ces paramètres affectent ses capacités à maintenir son rôle de régulation et sa résilience face aux perturbations climatiques, mais ils ont également des conséquences immédiates sur les côtes et les écosystèmes marins.

Un océan en bonne santé, c'est un climat préservé : c'est sur ce constat que se sont accordés les représentants des États qui se sont réunis à l'occasion de la COP21, à Paris, fin 2015.

UN OCÉAN QUI CHANGE : LES IMPACTS SUR LES COMMUNAUTÉS HUMAINES

Si les modifications liées au changement climatique affectant l'océan mondial ont des impacts directs sur les populations insulaires et littorales, leurs répercussions vont bien au-delà de ces seules régions : l'environnement, l'économie et la vie sociale de nombreuses communautés peuvent se voir fragilisés.

La hausse du niveau des mers

Selon le rapport du GIEC de 2014, le niveau moyen global de la mer a augmenté de près de 20 cm au cours de la période 1901-2010. Il est par ailleurs probable que les niveaux extrêmes (lors de tempêtes par exemple) ont augmenté depuis 1970. Les modélisations les plus récentes font état d'une élévation du niveau de la mer de près de 2 m à la fin du siècle. Si cette élévation n'est pas uniforme dans toutes les régions, son rythme risque de s'accélérer dans les années à venir.

Cette hausse du niveau moyen des eaux marines provoque une érosion des côtes ; cette dernière entraîne une perte des terres arables et des réserves hydriques du fait de la salinisation des sols et des nappes phréatiques. Les côtes reculent et les inondations menacent lors des épisodes de très grandes



Surpeuplée, l'île de Malé, capitale des Maldives, est protégée par des digues. Deux îles artificielles surélevées ont été édifiées à 2 km de là en comblant le lagon avec des tonnes de sable et de corail mort. Elles accueillent des immeubles, un hôpital, une mosquée et l'aéroport. © Shahee Ilyas – CC BY-SA 3.0.



marées ou de tempêtes violentes - des événements qui ont de surcroît tendance à se multiplier.

Les installations côtières (habitations, infrastructures, industries, activités agricoles et aquacoles) sont particulièrement vulnérables face à ces phénomènes météorologiques. Ils peuvent en effet engendrer d'importants dégâts économiques mais aussi des pertes humaines.

Or, nombre de grandes métropoles sont situées à proximité du littoral – notamment en Asie du Sud et en Asie du Sud-Est. Les zones côtières les plus basses telles que les grandes plaines deltaïques, particulièrement attractives en raison de leur richesse en ressources et en raison de leur accès aux voies maritimes, comptent parmi les zones les plus densément peuplées au monde. Ainsi, selon l'OCDE, 40 millions de personnes habitant les grandes villes côtières sont aujourd'hui menacées de submersion ; ce chiffre ne pourra que croître avec la hausse de la population mondiale et la tendance à l'urbanisation.

Les petits États insulaires se trouvent également en première ligne face au réchauffement climatique. L'érosion, la salinisation et la perte de terres sont déjà une réalité pour ces nations ne disposant que de superficies habitables et cultivables limitées.

La biodiversité marine affectée: quelles conséquences sur les moyens de subsistance ?

Le réchauffement, l'acidification et la désoxygénation des eaux affectent les espèces marines et perturbent les chaînes alimentaires de l'océan.

Si certaines espèces s'adaptent, d'autres migrent vers des eaux plus froides en profondeur ou vers le nord, voire disparaissent. La pêche et l'aquaculture sont impactées par ces déplacements de la faune marine. L'acidification affecte le phytoplancton élaborant un squelette calcaire, la croissance des larves de poissons, l'édification de la coquille de certains mollusques mais aussi le développement des récifs coralliens qui abritent des milliers d'espèces marines.

La désoxygénation (les eaux plus chaudes contiennent moins d'oxygène et l'augmentation de la stratification liée au réchauffement des eaux en surface diminue la ventilation) affecte aussi bien les zones côtières que la haute mer. Elle pourrait, elle aussi, avoir des conséquences majeures sur la conchyliculture, l'aquaculture et la pêche.

À ces modifications s'ajoutent une surexploitation des écosystèmes marins fragilisés par la pollution et

La COP21 et l'Accord de Paris

Le 12 décembre 2015, un accord historique pour lutter contre le changement climatique a été adopté à Paris par 195 pays. Pour la première fois, l'océan figure dans un texte additionnel de la Convention pour le climat. Cité dans le préambule du texte final (*« notant qu'il importe de veiller à l'intégrité de tous les écosystèmes, y compris les océans... »*), cette mention est le signe d'une prise de conscience mondiale quant à l'importance des liens entre océan et climat. Et pour permettre de renforcer encore la prise en compte du rôle de l'océan, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a décidé en avril 2015 de réaliser un Rapport Spécial qui sera consacré aux interactions entre le climat, l'océan et la cryosphère.

L'Accord de Paris représente également une avancée majeure en matière de reconnaissance des liens entre la migration humaine et le changement climatique, en faisant référence pour la première fois aux migrants dans le préambule du texte final¹, et en demandant la création d'un groupe de travail spécial pour *« élaborer des recommandations relatives à des démarches intégrées propres à prévenir et réduire les déplacements de population liés aux effets néfastes des changements climatiques et à y faire face »*².

¹ Décision 1/CP.21 de la CCNUCC, préambule p. 2: « Conscientes que les changements climatiques sont un sujet de préoccupation pour l'humanité tout entière et que, lorsqu'elles prennent des mesures face à ces changements les Parties devraient respecter, promouvoir et prendre en considération leurs obligations respectives concernant les droits de l'Homme [...] (et) des migrants [...] »

² Décision 1/CP.21 de la CCNUCC, Pertes et préjudices – articles 49 et 50, p. 8

une gestion des ressources et des activités humaines non durables, comportements qui accélèrent encore leur dégradation.

Dans de nombreuses régions, les rendements générés par des activités économiques telles que la pêche, diminuent. Les PMA (Pays les moins avancés) sont généralement les plus impactés : leurs infrastructures côtières sont plus fragiles (nombre d'entre elles sont situées dans des zones touchées par les tempêtes tropicales) et la subsistance des populations est souvent fortement liée à la pêche. Pour certains pays, tels les PEID (Petits États insulaires en développement), c'est toute l'économie du pays qui est menacée. D'autres doivent faire face à un afflux de populations originaires du littoral vers l'intérieur des terres ou vers les grandes villes, à la recherche de davantage de sécurité et de nouveaux moyens de subsistance. Des sociétés aux modes de vie traditionnels peuvent ainsi être contraintes de changer très rapidement, en vue de s'adapter aux bouleversements majeurs que subissent leurs conditions de vie. Ce phénomène peut entraîner une perte de repères culturels et identitaires, un sentiment d'insécurité, et une érosion des traditions et du savoir autochtone. Pour certaines de ces communautés, la migration devient la seule solution répondant aux défis posés par le changement climatique.

Déplacements des populations vulnérables

Depuis 1990, le GIEC observe que le changement climatique risque de provoquer une augmentation des déplacements de populations, principalement dans les pays en développement et les communautés les plus pauvres, et plus particulièrement dans les régions côtières et les îles basses. En effet, la migration et les déplacements forcés liés aux impacts du changement climatique sur l'océan et sur la dégradation des écosystèmes marins constituent déjà une réalité dans de nombreuses régions du monde.

Ainsi, les déplacements forcés consécutifs à des inondations ou à l'érosion côtière ont déjà eu lieu dans de nombreux pays. Certains gouvernements (au Vietnam, au Vanuatu et en Papouasie-Nouvelle-Guinée par exemple) mettent en œuvre des stratégies de relocalisation des communautés vulnérables.

La migration peut également constituer une stratégie collective pour les communautés dont les moyens de subsistance dépendent fondamentalement de ressources marines aujourd'hui menacées. Ainsi par exemple, au Sénégal, la baisse des rendements halieutiques amène les habitants de villages côtiers à migrer vers les villes afin de rechercher de nouvelles sources de revenu.

Le 5^e rapport d'évaluation du GIEC (2015) mettait en exergue le fait que les populations qui ne possèdent pas les moyens de planifier leur migration sont soumises à une exposition plus élevée aux événements météorologiques extrêmes et ce, en particulier, dans les pays en développement à faible revenu. Dans ce contexte, il est important d'insister sur le fait que la migration peut constituer une stratégie de réinvention et de régénération des modes de vie et des moyens de subsistance.

DES SOLUTIONS POSSIBLES POUR S'ADAPTER

Pourtant, certains scénarios catastrophes de dégradation des écosystèmes marins et de déplacements forcés de populations peuvent être anticipés.

Une gestion plus durable des ressources naturelles marines, une mise en œuvre de projets de conservation et de réhabilitation d'écosystèmes, des initiatives de réduction de risques de catastrophes, des politiques d'adaptation au changement climatique, une création d'emplois alternatifs, ou encore une migration planifiée et facilitée, constitueraient autant de propositions destinées à réduire la vulnérabilité des milieux naturels et des communautés qui en dépendent.

Gérer durablement les services écosystémiques et les ressources

L'importance des écosystèmes marins pour les populations humaines se mesure en termes de services et en termes de ressources. Ils jouent un rôle essentiel dans les politiques d'atténuation (actions permettant de réduire l'effet de serre) en absorbant du CO₂ et dans les politiques d'adaptation au changement climatique.



Protection, réhabilitation et gestion durable des services écosystémiques, notamment en s'appuyant sur les savoirs autochtones, peuvent contribuer à protéger les communautés qui en dépendent, renforcer leurs moyens de subsistance et ainsi prévenir les migrations forcées.

Ainsi par exemple, les herbiers sous-marins, les zones humides littorales, les mangroves et les récifs coralliens agissent-ils comme autant de puits de carbone. Constituant une zone tampon avec la mer, ils jouent également un rôle de protection des côtes : on estime qu'ils absorbent 75 à 90 % des vagues et de la houle et qu'ils diminuent ainsi de façon importante la force érosive de celles-ci. Enfin, ces écosystèmes représentent une sécurité alimentaire et une réserve de matières premières, et génèrent des activités économiques. En décembre 2015, lors de la COP21, Jean-Claude de l'Estrac, Secrétaire général de la Commission de l'Océan Indien (COI), cosignait avec l'Union européenne une déclaration reconnaissant « l'importance des menaces et des défis créés par les changements climatiques, en particulier l'élévation du niveau de la mer, l'accroissement des risques naturels, la perte de la biodiversité et leurs conséquences économiques et financières. » (Source : revue de presse de la COI produite par le centre de documentation). La protection, la gestion durable et la restauration de ces écosystèmes, sont donc reconnues comme participant de la lutte contre les dangers climatiques et contre la pauvreté.

Le développement de réseaux d'aires marines protégées pourrait également permettre une meilleure conservation de la biodiversité tout en préservant des activités traditionnelles de subsistance, en s'appuyant sur les savoir-faire et les modes de gouvernance des populations locales.

De nombreux projets de restauration ont déjà été entrepris, aussi bien dans des PEID que le long des côtes et des estuaires particulièrement fragilisés de pays non insulaires. La réhabilitation des récifs coralliens par le développement de récifs artificiels (structures à implantations de boutures), la replantation de mangrove et la protection de zones humides, ont un impact immédiat. En effet, ces démarches participent à la protection des terres et des populations en fournissant aux communautés du littoral des ressources, ce qui améliore leurs moyens de subsis-

tance. Ainsi par exemple, aux îles Samoa américaines, un programme de replantation de palétuviers financé par le PNUD (Programme des Nations unies pour le développement) a permis le développement de filières de commercialisation de produits issus de la mangrove tels les crabes ou la teinture qui, une fois extraite des plantes, sert à la réalisation de sarongs et d'objets d'artisanat. En 2010, au Bangladesh, le PNUD a également initié un important programme de plantation de mangrove le long de la côte et ce, en partenariat avec les autorités nationales et les communautés locales : en 2012, plus de 6000 hectares de mangrove ont déjà été replantés. Aux Maldives, les projets de réhabilitation du récif grâce à l'implantation de structures artificielles sur lesquelles on installe des boutures de coraux se voient couplés avec le développement d'infrastructures éco-touristiques.

Soutenir les populations vulnérables

Face aux risques de survenue d'événements extrêmes, les politiques et les programmes de gestion des risques et de réponses aux catastrophes doivent à l'évidence être renforcés. Ils doivent notamment mieux prendre en compte les besoins des populations les plus vulnérables, afin de mieux planifier et de mieux gérer les déplacements « forcés » de populations (déplacements pouvant faire suite à des inondations ou à des tempêtes par exemple).

La préparation des populations face aux risques côtiers au moyen de programmes de formation et de campagnes d'information apparaît elle aussi comme un soutien prioritaire destiné à aider ces populations à mieux répondre aux catastrophes, à mieux s'adapter au changement climatique et à mieux gérer les ressources (eau, ressources alimentaires, etc.).

Afin de réduire la vulnérabilité des communautés exposées aux risques, que ceux-ci soient en lien avec des catastrophes soudaines ou des dégradations lentes (salinisation des terres et des réserves d'eau douce par exemple), une relocalisation des populations peut être envisagée comme une solution, dès lors qu'elle est anticipée et qu'elle s'accompagne de politiques et de plans à long terme prenant en compte les besoins spécifiques des communautés concernées. Ces plans peuvent désigner des zones de relogement, ou, lorsque le territoire est limité, envisager d'autres solutions. Aux Maldives, par



exemple, des îles artificielles construites en comblant des zones de lagon accueillent aujourd'hui un aéroport, un hôpital, des logements et des écoles. De son côté, du fait de la submersion partielle et de la salinisation des sols, la République de Kiribati a acheté des terres à Fidji (28 km²) afin, dans un premier temps, de pouvoir cultiver des plantes nourricières et de subvenir aux besoins alimentaires d'une partie de la population en cas de risques extrêmes. D'autres pays comme les îles Tuvalu, la Papouasie-Nouvelle-Guinée, les îles Tonga ou les îles Cook, envisagent également à plus ou moins long terme de reloger leurs communautés. Ces pays intègrent aujourd'hui, dans leurs plans nationaux d'adaptation au changement climatique, la migration et la relocalisation planifiée.

Certains États commencent à reconnaître les bénéfices de la migration et le potentiel des migrants dans la gestion des risques de catastrophes et l'adaptation, notamment à travers le transfert de compétences ou les envois de fonds ciblés. À travers la suppression de frais sur les transferts ou encore la création de fonds spéciaux, les îles Samoa et l'Indonésie ont ainsi facilité l'envoi de fonds par leurs diasporas. Certaines de ces aides financières sont destinées à l'aide à la reconstruction qui fait suite aux catastrophes naturelles. D'autres pays innovent dans leur création de mécanismes d'investissements dans le but d'attirer les capitaux de leurs diasporas vers des projets d'adaptation au changement climatique (des projets qui pourraient par exemple inclure la réhabilitation des écosystèmes marins ou le développement de techniques de pêche durable).

D'autres encore, notamment les PEID, développent des accords de migration bilatéraux ou régionaux, qui pourraient permettre aux populations touchées par les conséquences néfastes du changement climatique de diversifier leurs ressources par le recours à l'emploi à l'étranger.

Coopérer pour avancer

En avril 2016, lors de la signature de l'Accord du climat aux Nations unies, de nombreux chefs d'États et de gouvernements ont fait part de leurs attentes et de leurs espoirs. M. Ahmed Ali Say, Ministre délégué chargé de la coopération internationale de Djibouti, a ainsi déclaré :

« La désertification, l'appauvrissement des sols, l'assèchement des puits, les inondations, l'augmentation du niveau de la mer sont des aléas récurrents contre lesquels les populations se battent avec leurs maigres moyens. Aussi, doit-on ancrer l'atténuation et l'adaptation aux changements climatiques au centre des actions visant à combattre la pauvreté dans tous nos pays. ». Les représentants de nombreux pays en développement ont également souligné le fait que leurs émissions de gaz à effet de serre sont très faibles, mais leurs populations sont néanmoins parmi les plus exposées aux catastrophes climatiques, d'où un appel quasi unanime à la solidarité internationale. En effet, la mobilisation au niveau mondial, l'établissement de politiques de partenariats et de coopération pour le développement, le transfert de technologies et le déblocage de financements internationaux afin de développer les politiques d'atténuation et d'adaptation sont essentiels pour limiter les impacts du changement climatique et les déplacements de population. Quant au rôle de l'océan, il a été rappelé le 8 juin 2016, lors de la Journée mondiale de l'océan, par le Secrétaire général de l'ONU, M. Ban Ki-moon, qui a déclaré que la santé des océans est au cœur des mesures prévues aux fins de l'application de l'Accord de Paris pour s'adapter aux changements climatiques et pour les atténuer.

La reconnaissance croissante des liens entre océan, climat et migrations humaines a incité l'Organisation internationale pour les migrations (OIM) et la Plateforme Océan & Climat à s'associer en vue d'améliorer la compréhension et la sensibilisation sur l'interaction entre ces trois champs.

L'Organisation internationale pour les migrations est une organisation intergouvernementale comptant 165 États membres. Créée en 1951, l'OIM est la principale organisation intergouvernementale active sur la scène migratoire. L'OIM s'efforce de promouvoir des migrations humaines et ordonnées dans l'intérêt de tous, de renforcer la coopération internationale en matière migratoire, de faciliter la recherche de solutions pratiques aux problèmes de migration, et enfin de fournir une aide humanitaire aux migrants dans le besoin. Depuis plus de 20 ans, l'OIM se penche sur les liens entre la migration, l'environnement et le changement climatique à travers des activités de recherche, de dialogue politique et d'opérations sur le terrain.

RÉFÉRENCES

- AUSTRALIAN BUREAU OF METEOROLOGY AND COMMONWEALTH SCIENTIFIC AND INDUSTRIAL RESEARCH ORGANISATION (CSIRO), 2014 – *Climate Variability, Extremes and Change in the Western Tropical Pacific: New Science and Updated Country Reports*.
- BELL J.D. et al., 2011 – *Vulnerability of Tropical Pacific Fisheries and Aquaculture to Climate Change*. Secretariat of the Pacific Community, Noumea, New Caledonia.
- CCNUCC – *Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques*, <http://unfccc.int/> [consulté le 04/07/2016].
- COURNIL C. et GEMENNE F., 2010 – *Les populations insulaires face au changement climatique: des migrations à anticiper*. Vertigo. Revue électronique en sciences de l'environnement, 10 (3).
- DASGUPTA S., LAPLANTE B., MEISNER C., WHEELER D. and YAN J., 2007 – *The Impact of Sea Level Rise on Developing Countries: a Comparative Analysis*. Climatic Change, 93 (3), p. 379 – 388.
- FORESIGHT, 2011 – *Migration and Global Environmental Change*. Final Project Report, Londres, Government Office for Science.
- IOM, 2014 – *IOM Outlook on Migration, Environment and Climate Change*. Genève, International Organization for Migration.
- IONESCO D., MOKHNACHEVA D. et GEMENNE F., 2016 – *Atlas des migrations environnementales*. Paris, Presses de Sciences Po.
- IPCC, 2014 – *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Working Group II Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, sous la direction de C.B. FIELD, V.R. BARROS, D.J. DOKKEN, K.J. MACH, M.D. MASTRANDREA, T.E. BILIR, M. CHATTERJEE, K.L. EBI, Y.O. ESTRADA, R.C. GENOVA, B. GIRMA, E.S. KISSEL, A.N. LEVY, S. MACCRACKEN, P.R. MASTRANDREA et L.L. WHITE, Cambridge, Cambridge University Press.
- MATHIS J.T., COOLEY S.R., LUCEY N., COLT S., EKSTROM J., HURST T., HAURI C., EVANS W., CROSS J.N. and FEELY R. A., 2015 – *Ocean Acidification Risk Assessment for Alaska's Fishery Sector*. Progress in Oceanography, 136, p. 71 – 91.
- NICHOLLS R.J., HANSON S., HERWEIJER C., PATMORE N., HALLEGATTE S., CORFEE-MORLOT J., CHÂTEAU J. and MUIR-WOOD R., 2008 – *Ranking Port Cities with High Exposure and Vulnerability to Climate Extremes: Exposure Estimates*. OECD Environment Working Paper, 1, Paris, OECD Publishing.
- OCÉAN ET CLIMAT, 2015 – *Fiches scientifiques*. www.ocean-climate.org, 116 pages, Octobre 2015.
- PIGUET E. et LACZKO F., 2014 – *People on the Move in a Changing Climate: The Regional Impact of Environmental Change on Migration*. Dordrecht, Springer.
- NATIONS UNIES – *Couverture des réunions & communiqués de presse*, [en ligne], www.un.org/press/fr/2016/envdev1659.doc.htm [consulté le 18/07/2016].

L'océan dans les contributions nationales du pourtour méditerranéen

La COP21 marque la consécration des contributions nationales dans les négociations climatiques internationales. L'océan, présenté comme le « *grand oublié*¹ » des négociations climatiques internationales lors de la COP21, a été remis sur la table des négociations. Comme tous les sujets, l'océan a dû être ardemment défendu pour arriver sur l'agenda politique international. Que sont les Contributions Prévues Déterminées au niveau National et comment sont-elles élaborées par les États ? Aujourd'hui, comment l'océan est-il pris en compte par les pays du bassin méditerranéen dans leurs contributions nationales ?

La mer Méditerranée, berceau de la civilisation, subit depuis longtemps des modifications anthropiques (notamment littoralisation). Cette mer semi-fermée est souvent décrite comme une zone d'étude idéale, une forme d'océan miniature. Sur le plan politique et économique, cette région est toute aussi intéressante car composée d'États connaissant de fortes divergences. La Méditerranée paraît adéquate pour étudier la prise en compte de l'océan dans les Contributions Prévues Déterminées au niveau National (CPDN) et ainsi chercher à mieux comprendre les raisons incitant - ou dissuadant - les États à intégrer l'océan dans leurs politiques d'adaptation et d'atténuation.

Après un bref retour historique sur la formation des contributions nationales, nous nous intéresserons à comment les États forment leurs intérêts en protection de l'environnement, pour comprendre pourquoi les pays du bassin méditerranéen s'intéressent plus ou moins à l'océan dans ces contributions.

LES CONTRIBUTIONS NATIONALES

L'approche dominante dans les négociations climatiques, a longtemps été de lancer une politique au niveau international afin de pousser à l'action sur l'échelle nationale (logique « *top-down* » ou descendante). Par exemple, la majorité des ministères de l'environnement ont été créés après la création du Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE) en 1972, qui a prôné cette action. La 19^e session de la Conférence des Parties à la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC, Varsovie, novembre 2013) adopte une logique inverse (« *bottom-up* »), de bas en haut. Elle propose un système de Contributions Prévues Déterminées au niveau National. Ce sont des « *plans disponibles au public, commençant en 2020 dans le cadre d'un nouvel accord climatique international, qui détaillent ce que chaque État prévoit de mettre en œuvre afin de faire face à un climat qui change* »². Les États doivent d'abord s'accorder sur leurs objectifs vis-à-vis de la CCNUCC. Ces objectifs s'inscrivent

1 Plaidoyer de la Plateforme Océan et Climat



dans un traité, l'Accord de Paris, adopté lors de la COP21 en décembre 2015. Bien qu'elles n'aient pas de portée juridique contraignante, les CPDN permettent « *d'améliorer la clarté, la transparence et la compréhension des contributions prévues* »³.

Ces contributions lient des objectifs d'engagement ambitieux et équitables en termes d'adaptation et d'atténuation avec les priorités nationales spécifiques à chaque pays. Elles contiennent certaines informations : année de référence, délai de la mise en œuvre de la politique, portée, méthodologie utilisée, ainsi qu'une estimation de l'équité et de l'ambition de la contribution en vue des circonstances nationales.

Il n'existe aucune obligation de forme pour les CPDN. Certaines sont très courtes, et n'ont que des engagements chiffrés, alors que d'autres peuvent atteindre vingt pages et détailler les ambitions du pays secteur par secteur. La contribution de l'Union européenne ne fait que 5 pages. Elle détaille en quoi cette contribution est équitable et ambitieuse, puis fait l'inventaire des secteurs de l'économie concernés. Cette contribution est centrée autour de la réduction chiffrée des émissions. À l'inverse, la contribution marocaine, longue de 17 pages, fait état de ses circonstances nationales, à savoir un accroissement économique et démographique en contexte de changement climatique. Elle propose un premier objectif de réduction des émissions inconditionnel et un second objectif conditionné par les aides internationales qui lui seront fournies, puis elle développe les politiques en matière d'atténuation et d'adaptation.

En adoptant une approche *bottom-up*, on espère inciter à un plus fort engagement de la part des États. Pour le moment, ce pari semble gagné : si une soixantaine d'États a pris des engagements en 2009 et 2010, ils sont aujourd'hui 177 à avoir signé l'Accord de Paris⁴.

LA MISE À L'AGENDA POLITIQUE

L'agenda politique est défini par Garraud (dans Hassenteufel, 2010) comme « l'ensemble des problèmes faisant l'objet d'un traitement, sous quelque forme que ce soit, de la part des autorités publiques, et donc susceptibles de faire l'objet d'une ou plusieurs décisions ». Ce sont tous les sujets qui pourront être l'objet de décisions politiques.

La rude compétition pour l'agenda politique

Au niveau national comme au niveau international, on observe une forte concurrence des problèmes pour atteindre l'agenda politique. Tous les sujets ne peuvent pas être à l'agenda.

Les sujets ne sont pas publics à l'origine : ils doivent être construits comme tel. Par exemple, tous les citoyens ne sont pas *a priori* concernés par l'élévation du niveau de la mer, et celle-ci n'est donc pas perçue comme un problème de société ou un problème public. Les acteurs (société civile, associations, entreprises, partis politiques) concernés par cette question peuvent se mobiliser et reconstruire la perception de l'élévation du niveau de la mer, afin d'en faire un problème public. Ils peuvent, par exemple, montrer les impacts de ce phénomène sur les ressources en eau, en aliments, ou sur l'économie et la société du pays. Le problème de l'élévation du niveau de la mer devient un problème construit comme public. Mais face à une surabondance de ces problèmes, un choix s'impose.

Selon Hilgartner et Bosk (1998) « *l'attention publique est une ressource rare [...] les problèmes doivent lutter pour occuper un espace dans les arènes publiques* »⁵. Cette compétition est permanente, à la fois pour accéder et pour rester sur l'agenda politique.

La politique environnementale et les priorités qui en découlent ne forment pas une exception à cette règle. Cette compétition entre sujets ou problèmes a des impacts sur les thèmes abordés dans les contributions nationales des États.

2 "Decoding Intended Nationally Determined Contributions (INDCS): A Guide for Understanding Country Commitments", World Resources Institute, July 2015.

3 Voir l'article 2.b de la décision « Moyens de poursuivre la mise en œuvre de la plate-forme de Durban » (1/CP.19).

4 <http://www.cop21.gouv.fr/un-record-plus-de-160-pays-attendus-a-new-york-le-22-avril-pour-signer-laccord-de-paris/> consulté le 20 septembre 2016.

5 Dans Hassenteufel 2010.

La définition de l'intérêt national en termes d'environnement

Les délégations étatiques ont pour mandat de définir et défendre l'intérêt national au niveau international. On considère que l'intérêt, et donc la position d'un État, lors de négociations internationales climatiques dépendent principalement de deux variables indépendantes qui s'appuient sur le principe que les États sont rationnels (Morin et Orsini, 2015).

La première variable est la vulnérabilité du pays, c'est-à-dire l'étendue des dégâts environnementaux subis par un État, sa population ou encore son territoire. En toute logique, plus un pays sera atteint négativement par un phénomène, plus il voudra le combattre. La seconde variable est celle des coûts d'abattement, c'est-à-dire le remplacement d'équipements, le développement de nouvelles technologies, l'abandon d'une technologie ou d'une manière de procéder. Si le coût d'une solution est excessif au regard du problème, alors il n'est pas rationnel pour l'État d'adopter cette solution. En revanche, si son coût est faible au regard des effets engendrés par la vulnérabilité, le pays aura une plus forte incitation à agir. Le pays procède à une analyse des coûts et des bénéfices de son changement de comportement en fonction des informations qui lui sont disponibles. Les intérêts des États évoluent selon le problème environnemental donné⁶. Cette vision de la décision publique ne prend pas en compte d'autres facteurs, comme l'existence d'une bureaucratie qui défend ses intérêts (la survie d'institutions existantes), par exemple⁶. Les tendances géopolitiques sous-jacentes peuvent influencer la prise de position et la définition de l'intérêt des États – la fin de la Guerre froide a facilité la coopération internationale et la prolifération de régimes plus globaux

(Terhalle et Delpledge, 2013). Elle permet toutefois de comprendre une partie de la définition de l'intérêt des États et de leur comportement sur la scène internationale.

Les fenêtres d'opportunité

D'après John Kingdon, « *lorsqu'un problème est reconnu, qu'une solution est développée et disponible au sein de la communauté des politiques publiques, qu'un changement politique en fait le moment adéquat pour un changement de politique et que les contraintes potentielles ne sont pas trop fortes* », alors un problème construit comme public pourra accéder à l'agenda politique.

Pour avoir une fenêtre d'opportunité (c'est-à-dire une possibilité d'entrer sur l'agenda politique), il faut avoir identifié un problème, une solution et une volonté politique. C'est là tout l'intérêt de cultiver la recherche. Elle permet d'identifier un problème et peut même proposer des réponses concrètes sur l'origine dudit problème. La recherche de solutions doit aussi être une priorité pour les chercheurs et les acteurs mobilisés, s'ils souhaitent voir leur problème atteindre l'agenda politique environnemental. La volonté politique peut naître d'une forte mobilisation de la société civile, d'une échéance électorale, ou encore d'un événement marquant, comme une tempête de grande ampleur. Sans cette volonté politique, les décideurs sont moins enclins à écouter les résultats de la recherche.

⁶ Par exemple, la contribution marocaine explique que le pays « doit en priorité minimiser les risques d'impacts du changement climatique, en raison de l'importante vulnérabilité de certaines activités économiques, comme l'agriculture, la pêche, l'aquaculture, la foresterie et le tourisme, et certains milieux de vie, comme les oasis, le littoral et les montagnes. »

Les comportements attendus des États en fonction de leurs intérêts		Degré de vulnérabilité	
		Faible	Elevé
Coût d'abattement	Faible	Spectateur	Promoteur
	Elevé	Obstructionniste	Intermédiaire

Fig.1 — Source: Sprinz et Vaahatoranta, 1994 dans Morin et Orsini, 2015.

L'OCÉAN DANS LES CONTRIBUTIONS NATIONALES DES PAYS MÉDITERRANÉENS: LES FAITS

L'océan : une irremplaçable et précieuse ressource

Une ressource (sur)exploitée

L'océan est une source de revenus pour tous les États de la Méditerranée. Il est difficile de trouver des chiffres exacts concernant la part du PIB provenant directement ou indirectement de la mer. Certes, le tourisme balnéaire, la pêche et le trans-

port maritime, entre autres, sont des secteurs profitables. Néanmoins, ces activités génèrent des pressions sur leur environnement: surpêche, pollution, urbanisation excessive, surexploitation des ressources en eau. Or, dans des pays arides et semi-arides, l'eau est une ressource précieuse que peut fournir l'océan grâce à la désalinisation, pouvant accentuer le stress exercé sur ce milieu. La désalinisation est citée dans la moitié des contributions des États de la Méditerranée (Égypte, Israël, Maroc, Tunisie), à la fois comme ressource actuelle et à venir. Israël souhaite utiliser cette technique pour faire face à une hausse de la demande en eau, le Maroc cherche à augmenter ses ressources en eau d'ici

	PIB/habitant 2011-2015	Zones terrestres et marines protégées (en pourcentage du territoire national)	Croissance annuelle de la population, en pourcentage	Longueur du trait de côte (en km)	Frontières terrestres (en km)	Élévation moyenne (en m)	Territoire dont le niveau est inférieur à 5 m (en pourcentage)	Total mots concernant l'océan
Algérie	5 484,1 \$	7,5	1,9	998	6 734	800	0	6
Égypte	3 365,7 \$	9,6	2,2	2 450	2 612	321	1,6	24
Israël	37 206,2 \$	8,6	1,9	273	1 068	508	0,4	5
Liban	10 057,9 \$	0,9	1,2	225	484	125	0,4	14
Maroc	3 190,3 \$	20,1	1,4	1 835	2 362,5	909	0,2	17
Monaco	163 651,6 \$	99,7	0,3	4,1	6	NA	25,3	1
Tunisie	4 420,7 \$	3,7	1,0	1 148	1 495	246	1,9	29
Turquie	\$10 515,0 \$	0,2	1,2	7 200	2 816	1 132	0,5	2

Données provenant de la CIA Factbook et de la Banque Mondiale

Pour tenter de quantifier la prise en compte de l'océan dans les CPDN des États du bassin méditerranéen (hors UE, Syrie et Libye), des mots clefs en rapport avec l'océan ont été comptabilisés. Les mots choisis sont les suivants: adaptation, acidification, aquaculture, biodiversité, blue carbon, blue economy, coast, coastline, coastal, coral, deoxygenation, desalinization, ecosystem(s), fishery (ies), marine, maritime, mangrove, marsh, mitigation, ocean warming, offshore, reef, sea level rise. Ces mots ont été choisis pour l'essentiel dans le plaidoyer de la Plateforme Océan et Climat.

La Tunisie est en tête du classement, avec 29 apparitions de ces mots (hormis adaptation et atténuation), suivi de près par l'Égypte (24), le Maroc (17) et le Liban (14).

L'Union européenne, la Syrie et le Libye n'ont pas été prises en compte car ils n'avaient pas de contribution nationale. L'Union Européenne a écrit une contribution groupée pour tous ses États membres. La Syrie et le Libye n'ont pas écrit de contribution, au regard de la situation politique, économique et sociale de ces deux États.

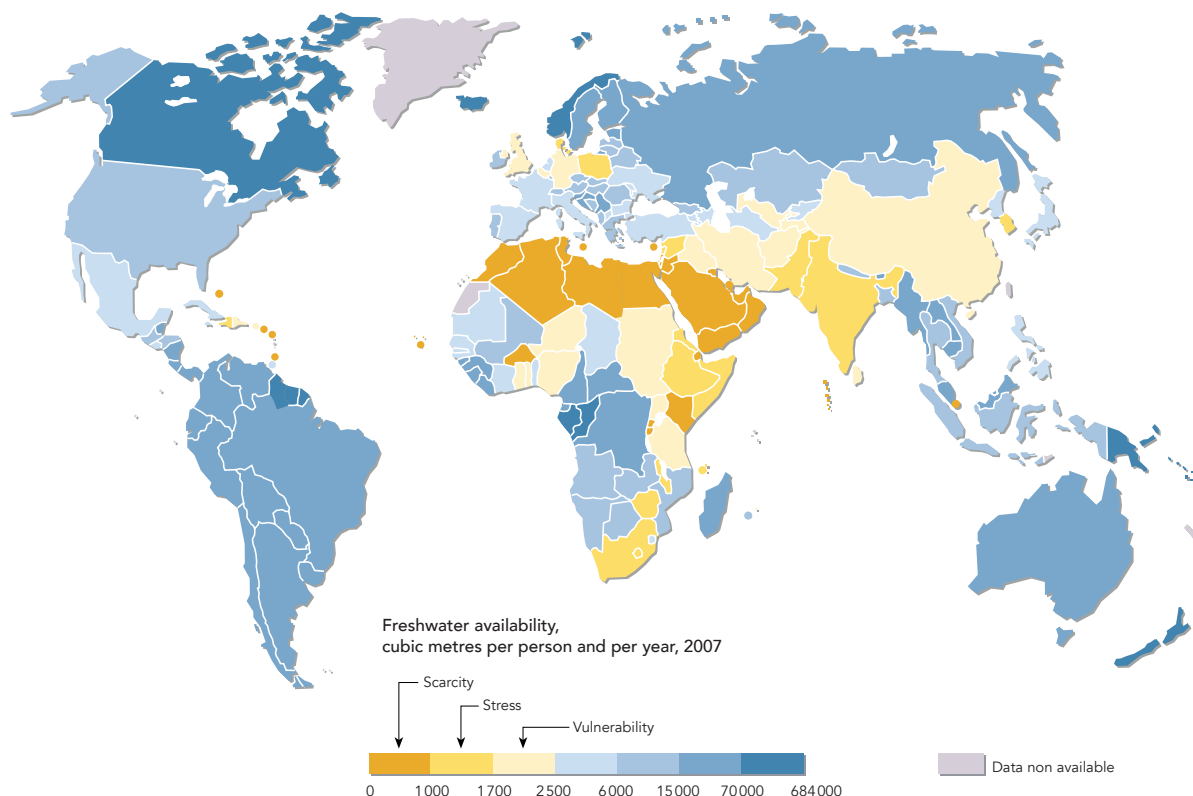


Fig.2 — Disponibilité de l'eau douce en mètres cubes par personne et par an, en 2007. Source : FAO, United Nations, World Resource Institute (WRI), Designer : Philippe Rekacewicz 2006.

2030, alors que la Tunisie prévoit d'installer des petites centrales de désalinisation afin de subvenir aux besoins au niveau local dans les zones touristiques⁷.

Des pressions indirectes

La Méditerranée subit aussi des pressions indirectes. Face aux phénomènes de désertification et de perte de terres arables, certaines populations rurales sont en situation d'exode forcée vers les centres urbains, souvent proches du littoral. En parallèle, on observe une croissance annuelle de la population de 1,4 % en moyenne sur les pays méditerranéens (hors Union européenne). Ces pays font face à une pression démographique, généralement concentrée autour du littoral.

Le bassin méditerranéen doit faire face à une pression supplémentaire: la pollution provoquée à la fois par l'industrie, l'agriculture, les villes et le tourisme se déverse dans les milieux marins.

Méditerranée : quels enjeux, quelles solutions ?

L'océan comme source de vulnérabilité

Si les États du bassin méditerranéen effectuent un état des lieux de leurs circonstances nationales (contexte politique, économique et social, entre autres), c'est parce que les conséquences des changements climatiques s'ajoutent souvent à un contexte national déjà fragile. Par exemple, le Liban évoque l'agitation politique de la région, son taux de pauvreté élevé et l'accroissement de 30 % de sa population entre 2013 et 2015, due à la crise de réfugiés syriens. D'après la contribution libanaise, ces facteurs intensifient le stress sur une économie et des ressources naturelles déjà sous pression⁸.

Or les pays du Moyen-Orient et du versant sud de la Méditerranée ont la particularité de se situer dans la

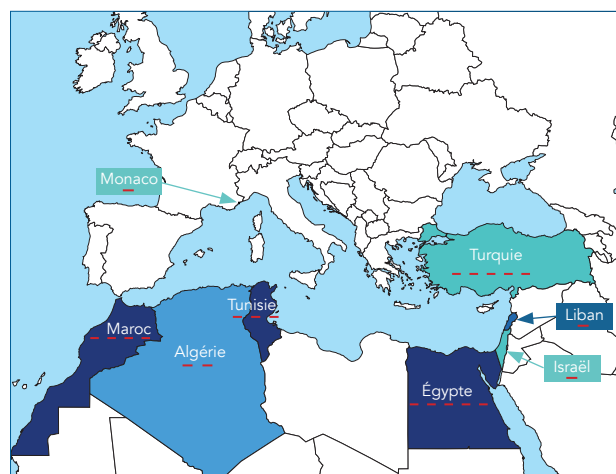
⁷ CPDN Israël, Maroc et Tunisie.

⁸ "To exacerbate matters, the Syrian crisis has led to the arrival of around 1,13 million registered refugees to the country, increasing Lebanon's population by 30 % in just over 2 years and adding stress to the already-stretched economy and natural resources." INDC Lebanon.

seule région au monde qui manque d'eau⁹. Le changement climatique aura des impacts forts sur le littoral et sur la distribution en eau. L'élévation du niveau de la mer va affecter directement une ressource indispensable : l'eau douce. L'intrusion en eau salée est une préoccupation majeure pour des pays comme la Tunisie et l'Égypte dont plus de 1,5 % du territoire national se situe en dessous de la barre de 5 mètres d'élévation au-dessus du niveau de la mer. Selon la contribution tunisienne, environ 50 % de ses ressources disponibles dans les nappes côtières encourent un risque de salinisation. La montée du niveau de la mer salinise aussi les terres arables. Outre la détérioration de ressources aussi élémentaires que l'eau et la nourriture, l'élévation du niveau de la mer endommage les infrastructures en bord de mer, notamment les installations touristiques, portuaires, ou encore des centrales électriques, ce qui porte atteinte à l'économie du pays. Le déplacement de populations en est une autre conséquence. Par exemple, en Algérie, plus de 85 % de la population vit dans le Nord du pays, donc proche du littoral. En Égypte, des grandes villes comme Alexandrie ou Port-Saïd se trouveront sous les eaux. Ces énormes flux de population potentiels peuvent déséquilibrer encore le pays¹⁰.

L'élévation du niveau de la mer oblige les États à adapter leur secteur touristique s'ils veulent toujours bénéficier de ce revenu. Le tourisme balnéaire dégage des revenus importants : 90 % du tourisme est côtier en Tunisie, 80 % au Liban, 80 % en Israël. En 2015, 11,4 % du PIB égyptien provenait du tourisme, dont 35 % de tourisme côtier. Les récifs coralliens, très vulnérables aux changements climatiques, sont le 4^e secteur touristique de l'Égypte.

L'augmentation de la température de l'océan provoque une redistribution des espèces marines et un déplacement des stocks de poissons, dont les répercussions sur l'industrie de la pêche peuvent être consé-



Longueur du trait de côte (km)		Nombre de mots liés à l'océan	
1-500	—	1-5	
501-1000	--	6-10	
1001-1500	---	11-15	
1501-2000	----	> 15	
> 2001	-----		

Fig.3 — Récurrence de mots liés à l'océan dans les CPDN du bassin méditerranéen comparée à la longueur du trait de côte, en 2016. © L. Ras.

quentes. La prolifération rapide d'algues nuisibles est alors stimulée, ce qui peut baisser l'attractivité d'une destination touristique. La vulnérabilité économique des zones littorales est un thème récurrent dans les contributions qui abordent l'océan.

Un outil à développer

Nombreux sont les pays qui se considèrent vulnérables face à l'océan. Mais l'océan peut aussi permettre une adaptation et une atténuation face au changement climatique.

Une gestion planifiée du littoral permet d'éviter une urbanisation excessive et désordonnée, en mettant la priorité sur des zones moins facilement submersibles ou sujettes à érosion. L'Égypte et le Maroc proposent tous deux ce type de solutions¹¹. La refo-

⁹ Selon l'Indice Falkenmark.

¹⁰ "Estimations indicate that sea level rise by 50cm leads to serious impacts on low-level lands in Delta and adjacent highly populated cities such as Alexandria and Port Said. Consequently, this will result in a more significant challenge, which is the migration of people from the affected areas to other areas, thus affecting the efficiency of different services and increasing the financial cost required for their development." Egyptian Arab Republic INDC.

¹¹ Le Maroc a déjà élaboré une « Stratégie Nationale de la Gestion Intégrée du Littoral ». L'Égypte prévoit une gestion intégrée de la côte ("Adaptation options for coastal zones are highly site-dependent. However, changes in land use, integrated coastal zone management, and proactive planning for protecting coastal zones are necessary adaptation policies." INDC Egypt).

restation permet aussi de limiter l'érosion côtière à un plus faible coût. Le Maroc propose de reconverter près d'un million d'hectares de céréales vers des plantations fruitières qui protégeraient les espaces agricoles de l'érosion¹².

En termes d'atténuation, les énergies marines renouvelables permettent de diminuer l'utilisation de gaz torchés ou d'énergies fossiles.

12 La contribution marocaine évoque la "reconversion de près d'un million d'hectares de céréales vers les plantations fruitières qui son de nature à protéger les espaces agricoles de toutes les formes d'érosion".

Ainsi, il semblerait que les États qui traitent le plus l'océan dans leurs CPDN sont ceux dont l'économie et la société seront touchées le plus fortement par les changements climatiques. L'Égypte et la Tunisie ont des secteurs touristiques balnéaires très forts, beaucoup de terres arables, des villes et des aquifères qui seront potentiellement submergées dans les décennies à venir, touchant de plein fouet leurs économies. Le manque à gagner, si ces États ne s'adaptent pas rapidement, est énorme. Il est dans l'intérêt de ces États d'agir, en prenant en compte l'océan dans leurs contributions nationales.



RÉFÉRENCES

- BANQUE MONDIALE – <http://donnees.banquemondiale.org/pays>.
- BENBLIDA M., 2011 – *L'efficience d'utilisation de l'eau et approche économique*. Etude nationale, Algérie, Plan Bleu, Centre d'activités régionales PNUE/PAM.
- CIA WORLD FACTBOOK – <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/index.html>.
- COP21 – *Fiche d'analyse contributions nationales*. Dossier de presse, cop21.gouv.fr.
- COP21 – <http://www.cop21.gouv.fr/un-record-plus-de-160-pays-attendus-a-new-york-le-22-avril-pour-signer-laccord-de-paris>, consulté en septembre 2016.
- DIERMEIER D., 2012 – *Institutionalism and the Normative Study of Politics: From Rational Choice to Behavioralism*. The Good Society, Vol 24 n°1, pp.15-29.
- GRIMES S., 2011 – *Profil de durabilité dans quelques destinations touristiques méditerranéennes*. La destination touristique pilote en Algérie : la zone côtière de Tipasa, Plan Bleu, Centre d'Activités Régionales PNUE/PAM.
- HASSENTEUFEL P., 2010 – *Les processus de mise sur l'agenda: sélection et construction des problèmes publics*. Informations sociales, n°157, pp. 50-58.
- IDDRI BLOG – *Les INDC, nouveaux outils de coopération internationale pour le climat*. www.blog-iddri.org/fr/2015/03/26/les-indc-nouveaux-outils-de-cooperation-internationale-pour-le-climat.
- ISRAEL MINISTRY OF FOREIGN AFFAIRS – <http://mfa.gov.il/MFA/AboutIsrael/Economy/Pages/ECONOMY-%20Sectors%20of%20the%20Economy.aspx>.
- MORIN J-F. and ORSINI A., 2015 – *Politique internationale de l'environnement*. Paris, Presses de Sciences Po (P.F.N.S.P.), « Les Manuels de Sciences Po ».
- OCÉAN ET CLIMAT, 2015 – *Plaidoyer/Policy recommendations*, 8 pages.
- PLAN BLEU, 2015 – *Recommandations pour l'analyse économique et sociale des écosystèmes méditerranéens*. Préparées pour les pays méditerranéens non membres de l'UE dans le cadre de la mise en œuvre de la feuille de route EcAp du PAM, version révisée.
- TERHALLE M. and DEPLEDGE J., 2013 – *Great-Power Politics, Order Transition, and Climate Governance: Insights from International Relations Theory*. Climate Policy.



- TRESOR DIRECTION GENERALE – www.tresor.economie.gouv.fr/13892_point-sur-le-tourisme-en-egypte-.
- UNEP – <http://www.unep.org/dewa/Africa/publications/AEO-1/148.htm>.
- UNFCCC – http://unfccc.int/focus/indc_portal/items/8766.php.
- UNFCCC – <http://www4.unfccc.int/submissions/indc/Submission%20Pages/submissions.aspx>.
- WORLD RESOURCES INSTITUTE – <http://www.wri.org/indc-definition>.
- WORLD RESOURCES INSTITUTE, 2015 – *Decoding intended nationally determined contributions (INDCs): A Guide for Understanding Country Commitments*.



Quel droit international pour l'océan et le climat ?

Bleuenn Guilloux
et Romain Schumm

La Convention des Nations unies sur le droit de la mer (CNUDM) et la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) forment respectivement l'ossature juridique du droit de la mer et du droit du climat au niveau international. En tant que conventions-cadres, elles marquent le point de départ de régimes juridiques particuliers nouveaux qui ont vocation à évoluer dans le temps. D'une part, la CNUDM ne prend en compte que de manière incidente certains aspects touchant au climat dans ses rapports avec l'océan. Les changements climatiques viennent poser de nouveaux défis au droit de la mer qui doit s'adapter afin de lutter contre ses impacts et mettre en exergue le rôle « régulateur » de l'océan. Au titre de ces nouveaux enjeux, il est possible de citer la réglementation des émissions de GES du transport maritime, la fonte de l'Arctique ou encore, l'augmentation du niveau de la mer comme thématiques faisant l'objet de discussions internationales et nécessitant des approfondissements juridiques. D'autre part, il serait imprécis d'affirmer sans nuance que l'océan est le grand oublié des négociations internationales sur le climat. À plusieurs reprises dans les débats et dans les textes internationaux, il a été fait référence indirectement à l'océan. Ces références sont partielles et les dispositions y étant relatives souffrent d'une portée juridique faible. Les effets de la mobilisation scientifique et politique autour des relations entre océan et climat permettent d'envisager aujourd'hui un renforcement de la prise en compte de l'océan par le droit du climat. L'inscription du terme « océan » dans l'Accord de Paris, le Rapport spécial du GIEC relatif au Changement climatique, océans et cryosphère ou encore, la tenue d'une session océan à la COP22 - lors de laquelle sera discutée la mise en œuvre de l'Accord de Paris - laissent présager un renforcement de la place de l'océan dans le régime climatique.

INTRODUCTION

La Convention des Nations unies sur le droit de la mer (CNUDM) et la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) forment respectivement l'ossature juridique du droit de la mer et du droit du climat au niveau international. En tant que conventions-cadres, elles marquent le point de départ de régimes juridiques particuliers nouveaux qui ont vocation à évoluer dans le temps.

La CNUDM du 10 décembre 1982 est le résultat d'un processus de codification du droit de la mer mais aussi de formation de règles juridiques nouvelles (par exemple, la zone économique exclusive (ZEE) ou le statut d'État archipel). La « *Constitution pour les océans* »¹, convention de portée quasi-universelle (167 États parties en 2016) fixe le cadre général

1 Expression utilisée par Tommy T. B. KOH (Singapour), président de la troisième conférence des Nations unies sur le droit de la mer : « *Une constitution pour les Océans* », 11 décembre 1982, 6 p. ; en ligne : http://www.un.org/depts/los/convention_agreements/texts/koh_french.pdf (dernière consultation en août 2016).

dans lequel les activités maritimes se déroulent (navigation, exploitation des ressources biologiques et minérales, conservation et préservation du milieu marin, recherche scientifique marine, etc.). Elle définit les droits et les obligations des États conduisant ces activités selon le découpage des mers et des océans entre espaces relevant de la souveraineté ou de la juridiction nationale (eaux intérieures, mer territoriale et zone contiguë, ZEE, plateau continental) et espaces situés au-delà (haute mer, zone internationale)².

Depuis son entrée en vigueur le 16 novembre 1994, plus de dix ans après sa signature à Montego Bay en Jamaïque, la communauté internationale a montré un intérêt croissant pour un grand nombre de questions relatives aux usages des mers et des océans et à la protection de l'environnement marin. Les sujets de préoccupation principaux sont la diminution des stocks de ressources halieutiques, la destruction des habitats marins et côtiers, l'utilisation durable des ressources biologiques et la conservation de la biodiversité marine, la pression incontrôlée de l'urbanisation et du tourisme, les pollutions résultant des activités maritimes et terrestres et depuis une décennie environ, les interrelations entre les changements climatiques et l'océan.

À la fin des années 1980, la menace d'un réchauffement du climat de la planète commence à préoccuper les États dans un contexte scientifique propice à une appréhension holistique de l'environnement. Cette question exigeant une coopération de tous les États, de réunions d'experts (groupe d'experts du Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE) et de l'Organisation météorologique mondiale (OMM)), en conférences internationales (Ottawa et La Haye (1989)) et en résolutions de l'Assemblée générale des Nations unies (v. notamment, résolution 43/53: *Protection du climat mondial pour les générations présentes*

et futures, 6 décembre 1988³), l'élaboration d'un projet de convention-cadre sur les changements climatiques progresse jusqu'à l'adoption du texte final le 9 mai 1992 à New York et son ouverture à la signature la même année lors du sommet de la Terre de Rio de Janeiro⁴.

De portée universelle (197 États parties en 2016), la CCNUCC, entrée en vigueur la même année que la CNUDM en 1994 (21 mars), constitue la pierre angulaire du régime climatique. Son titre est trompeur car il laisse à penser qu'elle vise tous les changements climatiques alors qu'elle n'envisage que les changements du climat attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère au niveau mondial (art 1, al. 2)⁵. Son objectif est « *de stabiliser, conformément aux dispositions pertinentes de la Convention, les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique* » (art. 2)⁶. Elle a été complétée par le Protocole de Kyoto sur les changements climatiques du 11 décembre 1997 (entré en vigueur le 16 février 2005) comptant 192 États parties et, l'Accord de Paris sur le climat signé le 22 avril 2016 par 175 États.

Au-delà de leurs objectifs, de leurs contenus et du contexte de négociation, la CNUDM et la CCNUCC diffèrent, du point de vue idéologique et politique, dans leur appréhension d'enjeux environnementaux globaux. Tandis que la CNUDM fait de la Zone internationale des fonds marins un patrimoine commun de l'humanité (art. 136), la CCNUCC marque un net recul idéologique en faisant des

2 Pour un schéma des délimitations maritimes, v. AGENCE DES AIRES MARINES PROTÉGÉES : Les délimitations de l'espace maritime français, novembre 2014, p. 2; en ligne : http://cartographie.aieres-marines.fr/sites/default/files/delimitations_espace_maritime_fr.pdf (dernière consultation en août 2016).

3 Accessible en ligne à l'adresse suivante : http://www.un.org/french/documents/view_doc.asp?symbol=A/RES/43/53&Lang=F (dernière consultation en août 2016).

4 En ce sens, BEURIER (J.-P.), KISS (A.): Droit international de l'environnement, Paris, éd. Pédone, coll. Études internationales, 2010, p. 264 et s.

5 BEURIER (J.-P.), KISS (A.): Droit international de l'environnement, Paris, éd. Pédone, coll. Études internationales, 2010, p. 265 et s.

6 Aussi, il incombe aux États parties à la CCNUCC de préserver le système climatique dans l'intérêt des générations présentes et futures, sur la base de l'équité et en fonction de leurs responsabilités communes mais différenciées. Il convient de tenir compte des besoins spécifiques et de la situation particulière des pays en développement, mais il est aussi nécessaire de prendre des mesures de précaution pour prévoir, prévenir et atténuer les causes des changements climatiques et en limiter les effets néfastes (art. 3).

changements climatiques une simple préoccupation commune de l'humanité (preamble), concept sans aucune portée juridique.

Pour l'heure et comme nous le verrons via la prise en compte respective de l'océan et du climat en droit de la mer et en droit du climat, la réponse de la communauté internationale aux défis environnementaux globaux est encore limitée tant en droit qu'en pratique ; or ces défis appellent des réponses urgentes et contraignantes à toutes les échelles.

LE CLIMAT EN DROIT INTERNATIONAL DE LA MER

La CNUDM ne fait aucune référence explicite aux changements climatiques. Au regard de son objet, elle ne prend en compte que de manière incidente certains aspects touchant au climat dans ses rapports avec l'océan. Toutefois, dans les années récentes, les changements climatiques sont apparus comme un enjeu dépassant le seul cadre du régime climatique, amenant les juristes et les décideurs politiques à s'intéresser de plus près à cette question centrale de la gouvernance océanique. Le droit de la mer se trouve dorénavant face au défi de s'adapter afin de lutter contre les changements climatiques et mettre en exergue le rôle « régulateur » de l'océan.

La prise en compte incidente de certains aspects touchant au climat dans la CNUDM⁷

Les changements climatiques n'ont pas été discutés lors de la troisième conférence des Nations unies sur le droit de la mer (1973-1982), époque à laquelle ils n'étaient pas à l'agenda environnemental international. Si la CNUDM ne traite pas directement de la question du climat, elle peut être interprétée et appliquée de manière à appréhender les changements climatiques, en particulier via ses dispositions relatives à la protection et la préservation du milieu marin (Partie XII) et à la recherche scientifique marine (Parties XIII).

La protection et la préservation du milieu marin, y compris dans sa dimension climatique

Bien que la CNUDM demeure silencieuse à propos des changements climatiques et des émissions de gaz à effet de serre (GES), les dispositions de sa partie XII intitulée « Protection et préservation du milieu marin » sont pertinentes pour traiter ces questions. L'article 192 prévoit ainsi que « Les États ont l'obligation de protéger et de préserver le milieu marin », y compris « les écosystèmes rares et délicats ainsi que l'habitat des espèces et autres organismes marins en régression, menacés ou en voie d'extinction » (art. 194.5). Cette obligation de portée générale peut fort bien s'appliquer aux écosystèmes tels que les récifs coralliens et aux espèces touchées par les changements climatiques, en particulier le réchauffement et l'acidification des mers et des océans.

L'obligation de protéger et de préserver le milieu marin est complétée par d'autres dispositions de lutte contre la pollution de l'environnement marin, ce qui inclut des mesures générales visant à prévenir, réduire et maîtriser la pollution du milieu marin quelle qu'en soit la source (art. 194) et, des mesures spécifiques de lutte, entre autres contre la pollution d'origine tellurique (art. 207), la pollution par immersion (art. 210), la pollution par les navires (art. 211) et la pollution d'origine atmosphérique ou transatmosphérique (art. 212). Si les émissions de GES ne sont pas expressément mentionnées dans la CNUDM en tant que source de pollution du milieu marin, il est tout à fait envisageable d'interpréter la Partie XII de manière à y inclure ce type de pollution.

En effet, la CNUDM propose une définition large de la pollution du milieu marin, i.e., « l'introduction directe ou indirecte, par l'homme, de substances ou d'énergie dans le milieu marin, y compris les estuaires, lorsqu'elle a ou peut avoir des effets nuisibles tels que dommages aux ressources biologiques et à la faune et la flore marines, risques pour la santé de l'homme, entrave aux activités maritimes, y compris la pêche et les autres utilisations légitimes de la mer, altération de la qualité de l'eau de mer du point de vue de son utilisation et dégradation des valeurs d'agrément » (art. 1. (1) 4.).

⁷ Texte de la CNUDM accessible en ligne à l'adresse suivante : http://www.un.org/depts/los/convention_agreements/texts/unclos/unclos_f.pdf (dernière consultation en août 2016).



Dès lors, la question se pose de savoir si la violation des obligations pesant sur les États en matière de protection et de préservation du milieu marin pourrait être invoquée à l'aune des changements climatiques en vertu du mécanisme de règlement des différends prévu à la partie XV de la CNUDM. Si le débat doctrinal est riche sur ce point, la question demeure ouverte. Seul l'avenir nous dira si la CNUDM est capable d'appréhender et de répondre aux nouveaux défis posés par les changements climatiques et surtout, d'y apporter des réponses coercitives.

L'obligation pour les États et les organisations internationales de favoriser la recherche scientifique marine, y compris à propos des interactions océan-climat

La CNUDM prévoit dans sa partie XIII sur la recherche scientifique marine un régime juridique novateur encadrant les activités de recherche menées par des États et des organisations internationales telles que l'OMM ou la Commission océanographique intergouvernementale de l'UNESCO et ce, partout en mer. Ce régime met notamment l'accent sur la nécessité de favoriser la recherche scientifique marine (art. 243 et s.) et la coopération internationale dans ce domaine (art. 242).

En vertu de ces dispositions, de nombreuses recherches ont été conduites dans les mers et les océans du globe avec pour vocation de mieux comprendre les impacts des changements climatiques sur l'océan et en particulier la biodiversité marine. Par exemple, les scientifiques des expéditions Tara se penchent sur le rôle de la biodiversité microscopique marine et ses interactions avec le climat⁸. Mais plus la recherche progresse, plus le manque de connaissances se fait flagrant, imposant un renforcement urgent des capacités scientifiques, techniques et financières.

Ces dernières années, l'Assemblée générale des Nations unies a ainsi reconnu la nécessité d'améliorer

la compréhension de l'impact des changements climatiques sur les océans. Elle a encouragé les États à renforcer leur activité scientifique pour mieux comprendre les effets des changements climatiques sur l'environnement marin et la biodiversité marine et de développer les moyens d'adaptation⁹. Elle a également souligné l'importance d'accroître les connaissances scientifiques à propos des interrelations entre l'océan et l'atmosphère, y compris à travers la participation à des programmes d'observation océanique et les systèmes d'information géographique, tels que le système d'observation de l'océan mondial¹⁰.

Les changements climatiques: un défi central pour la gouvernance des océans

L'impact des changements climatiques sur le milieu marin, contrairement aux écosystèmes forestiers, n'a eu que tardivement l'attention de la communauté internationale malgré des données scientifiques de plus en plus nombreuses et fiables. Les scientifiques ont ainsi montré que l'océan est un régulateur du climat planétaire : il est un puits naturel et un réservoir de gaz à effet de serre et il reçoit la quasi-totalité de l'eau libérée par la fonte des glaciers continentaux et des calottes polaires¹¹. Ce n'est que dans les années 2000 que cette question s'est révélée essentielle, intéressant la communauté internationale dans son ensemble et plus seulement certains États côtiers et archipels particulièrement vulnérables.

Les changements climatiques sont un défi central, à l'interface entre une pluralité d'activités (transport

⁹ En particulier, elle a encouragé les États et les organisations internationales compétentes à poursuivre de toute urgence de nouvelles recherches sur l'acidification des océans, en particulier les programmes d'observation et de mesure (v. la résolution 64/71, paragraphe 113).

¹⁰ V. résolution 64/71, § 169.

¹¹ L'impact des changements climatiques sur le milieu marin a été scientifiquement démontré relativement tôt dans les années 1980. Les données scientifiques montrent des perturbations importantes des paramètres physiques et chimiques de l'océan mondial : fonte des glaciers, des icebergs et de la banquise ; élévation du niveau de la mer ; acidification ; désoxygénation ; perturbation des courants marins ; érosion de la biodiversité ; libération de gisements de méthane dans l'eau et dans l'atmosphère. Ces bouleversements environnementaux se combinent les uns aux autres, ainsi qu'avec les autres pressions anthropiques exercées sur l'environnement marin (pollutions, surexploitation des ressources naturelles, destruction des habitats, tourisme, etc.). Ils sont susceptibles de produire des phénomènes d'emballement.

⁸ Pour plus d'informations, v. le site internet officiel de l'expédition Tara : <http://oceans.taraexpeditions.org> (dernière consultation en août 2016).



maritime, pêche, exploitation des ressources minérales, recherche scientifique marine, etc.), d'actions (lutte contre la pauvreté, les catastrophes naturelles, la pollution, l'érosion de la biodiversité, etc.) ou d'enjeux (frontières maritimes, accès aux ressources naturelles, protection de l'environnement marin, etc.), faisant déjà l'objet d'un encadrement juridique. Ils soulèvent également des questions nouvelles, telles que l'impact sur des changements climatiques sur la biodiversité marine, la réglementation des émissions de GES du transport maritime, la géo-ingénierie dans les océans, questions qui pourraient nécessiter l'établissement de règles de droit spécifiques. Nous envisagerons ci-après certains exemples d'actualité.

L'élévation du niveau de la mer: modification des frontières maritimes et disparition probable d'États

L'élévation du niveau de la mer a un impact sur les frontières maritimes dont la délimitation stable est pourtant un des desseins principaux du droit international de la mer et de la CNUDM. La délimitation des lignes de base de certains États serait ainsi remise en cause, tout comme le principe selon lequel la souveraineté sur les territoires terrestres donne des droits aux États sur leur territoire marin adjacent (la terre domine la mer). Ainsi, « les lignes de base mouvantes »¹² résultant de l'élévation du niveau de la mer introduiront une modification des espaces marins de certains États côtiers et archipels (la mer territoriale, la zone contiguë, la ZEE et le plateau continental). Cela engendrera sans nul doute des tensions entre États, en particulier entre États voisins, en matière de délimitation des frontières maritimes nationales, d'accès aux ressources naturelles et de navigation.

Dans les cas les plus extrêmes, l'élévation du niveau de la mer signifie la disparition de zones côtières et d'îles de faible altitude submergées par les eaux ou rendues inhabitables par manque d'accès aux ressources naturelles, notamment en eau, ou à cause

de catastrophes naturelles de plus en plus fréquentes (inondations, tsunamis, cyclones, etc.). L'exemple des petits États insulaires du Pacifique Sud est des plus éloquentes. Ce phénomène soulève l'épineuse question juridique, politique et humanitaire de la disparition d'États et des migrations de populations, réfugiés climatiques ou environnementaux, qu'elle entraîne.

La fonte des glaces arctiques: l'ouverture de nouvelles voies de navigation régulières et d'accès aux ressources naturelles

La fin de l'Union soviétique et le réchauffement climatique ont modifié la perception des États comme des armateurs à propos des trois routes polaires arctiques, à savoir le pont arctique entre Churchill (baie d'Hudson) et Mourmansk (mer Blanche) et les passages du Nord-Ouest et du Nord-Est. Si le pont arctique n'est pas source de problèmes juridiques particuliers, les deux passages soulèvent des problèmes économiques, géopolitiques, stratégiques et environnementaux liés à l'ouverture de nouvelles voies de navigation régulières et d'accès aux ressources naturelles par la fonte des glaces nécessitant des solutions juridiques contraignantes.

Les divergences de positions étatiques concernant le passage du Nord-Ouest en sont une illustration¹³. En effet, les États riverains et non riverains de ce passage déjà traversé par les navires brise-glace et les sous-marins demeurent partagés sur le statut juridique à lui accorder. L'État canadien considère ainsi que ce passage relève de ses eaux intérieures par volonté de préserver des zones stratégiques ainsi

12 ORELLANA (M. A.): Climate change and the international Law of the Sea, in ABATE (R. S.) (dir.): Climate Change Impacts on Ocean and Coastal Law: U.S. and International Perspectives, New York (États-Unis), éd. Oxford University Press, 2015, p. 256 et s.

13 Du point de vue commercial, cela réduirait d'environ 1 000 mn le voyage des navires de commerce transitant par le canal de Panama pour rallier les océans Pacifique et Atlantique et limiterait significativement les coûts de transport. En septembre 2013, le navire MS Nordic Orion, un vraquier battant pavillon du Panama a été le premier grand cargo à effectuer ce voyage. Du point de vue environnemental, les risques d'incidents liés à la navigation dans les écosystèmes fragiles de l'Arctique sont source de vives inquiétudes. Du point de vue géopolitique, le transit de pirates, de terroristes ou d'autres groupes illicites par ses eaux est également source de préoccupation: ORELLANA (M. A.): Climate change and the international Law of the Sea, in ABATE (R. S.) (dir.): Climate Change Impacts on Ocean and Coastal Law: U.S. and International Perspectives, New York (États-Unis), éd. Oxford University Press, 2015, p. 267.

que l'environnement marin, tandis que les États-Unis estiment que ce passage est un détroit international ouvert à la navigation soumis au principe de libre passage en transit en application de la partie III de la CNUDM¹⁴.

Le 11 janvier 1988, le Canada et les États-Unis ont signé un accord à Ottawa sur la coopération dans l'Arctique par lequel les États-Unis, tout en refusant de reconnaître les prétentions canadiennes, ont accepté que les déplacements de leurs brise-glaces dans le passage du Nord-Ouest soient effectués avec le consentement des autorités canadiennes. Le 19 juin 1992, à Ottawa, le Canada a signé avec la Fédération de Russie un nouvel accord portant sur la coopération scientifique considérant explicitement la zone arctique comme spéciale. À ces règles de droit contraignant se sont ajoutées depuis lors des règles de droit mou portant sur la navigation et la protection de l'environnement marin¹⁵.

Vu la fragilité des écosystèmes polaires, la CNUDM envisage la possibilité pour les États côtiers « d'adopter et de faire appliquer des lois et règlements non discriminatoires afin de prévenir, réduire et maîtriser la pollution du milieu marin par les navires sans les zones recouvertes par les glaces et comprises dans les limites de la zone économique exclusive, lorsque les conditions climatiques particulièrement rigoureuses et le fait que ces zones sont recouvertes pendant la majeure partie de l'année font obstacle à la navigation ou la rendent exceptionnellement dangereuse, et que la pollution du milieu marin risque de porter gravement atteinte à l'équilibre écologique ou de le perturber de façon irréversible [...] » (art. 234). Contrairement à l'Antarctique qui bénéficie d'un statut particulier en droit international, l'impact des changements climatiques en Arctique impose la mise en place urgente d'un outil de droit contraignant spécifique. Il pourrait s'inspirer du modèle des conventions des mers régionales et de l'approche globale-régionale du PNUE.

La réglementation des émissions de GES du transport maritime

Les émissions de gaz à effet de serre liées au transport maritime constituent un défi majeur pour le droit de la mer. Avec l'importance de ce mode de transport dans le commerce mondial, 80 % des échanges commerciaux se faisant aujourd'hui par voies maritimes¹⁶, le droit de la mer doit appréhender et réglementer ces émissions afin de lutter à son tour contre le dérèglement climatique. Dans ce sens, l'Organisation maritime internationale (OMI) via son comité de protection du milieu marin (MEPC) a récemment posé les premiers jalons d'une réglementation internationale de contrôle et de réduction des émissions de GES des navires. L'OMI est l'institution spécialisée des Nations unies chargée d'établir des normes pour la sécurité, la sûreté et la performance environnementale des transports maritimes internationaux. Elle veille d'une manière générale à la lutte contre la pollution des mers par les navires. Elle a pour rôle principal de créer à l'intention de ce secteur un cadre réglementaire qui soit équitable et efficace, puis adopté et mis en œuvre de manière universelle¹⁷.

Lors de sa réunion des 18 et 22 avril 2016, le MEPC a adopté une réglementation obligeant l'ensemble des navires de plus de 5000 tonnes brutes à mesurer leurs émissions de CO₂ et à les déclarer à l'OMI. Cette réglementation n'est que la première pierre d'un édifice plus large visant une réelle réduction des émissions de GES des navires marchands. Dans cette logique, l'OMI a souligné l'importance d'adopter une convention internationale relative à la réduction des émissions de CO₂ du transport maritime en lien avec l'Accord de Paris.

14 Pour plus d'informations, BEURIER (J.-P.) (dir.): Droits maritimes, Paris, éd. Dalloz, coll. Dalloz action, 2015-2016, p. 128 et s.
15 V. BEURIER (J.-P.) (dir.): Droits maritimes, Paris, éd. Dalloz, coll. Dalloz action, 2015-2016, p. 132.

16 Chiffre avancé par l'OMI; <http://www.imo.org/fr/About/Pages/default.aspx>

17 Définition issue du site de l'OMI: <http://www.imo.org/fr/About/Pages/default.aspx>

L'OCÉAN EN DROIT INTERNATIONAL DU CLIMAT

Il est imprécis d'affirmer sans nuance que l'océan est le grand oublié des négociations internationales sur le climat. À plusieurs reprises dans les débats et dans les textes internationaux, il a été fait référence à l'océan comme étant un des aspects de la lutte contre les changements climatiques. Toutefois, l'analyse du droit positif laisse apparaître une prise en compte timide, en décalage avec l'importance des mers et des océans, qui représentent 71 % de la surface du globe et absorbent plus de 25 % du CO₂ émis chaque année par l'Homme. Néanmoins, une analyse des effets de la mobilisation scientifique et politique autour des interrelations entre océan et climat permet d'envisager, à l'horizon de la COP22 et à l'avenir, un renforcement de la prise en compte de l'océan par le droit du climat.

La timide reconnaissance de l'océan par le régime climatique

La CCNUCC ne fait aucune référence au texte fondateur du droit de la mer. Elle ne souligne pas de manière explicite les relations entre les deux conventions. Une absence de reconnaissance mutuelle des deux corps juridiques s'observe. Cette non-mise en exergue des synergies, entre ces deux corps juridiques, annonce une prise en compte limitée de l'océan par le droit du climat.

Une reconnaissance partielle

Le droit du climat fait référence à l'océan à travers les « prismes restreints » des puits et réservoirs de gaz à effet de serre. Cette approche quasi exclusive s'explique par l'importance que joue l'océan dans la régulation du climat. Il absorbe la majeure partie de la chaleur et du dioxyde de carbone qui s'accumule dans l'atmosphère. Il a absorbé 93 % de l'excès de chaleur sur terre depuis les années 1970 et limite ainsi le réchauffement de l'atmosphère. Il a piégé 28 % des émissions de CO₂ d'origine anthropique depuis 1750.

La prise en compte de l'océan au sein du régime climatique s'est ainsi faite à travers ce prisme bien

identifié. Dans la majeure partie des cas, c'est à travers sa faculté de puits ou de réservoir que l'océan a été considéré. Excepté l'Accord de Paris qui représente une avancée sur ce point, ainsi qu'une rapide allusion aux écosystèmes marins dans le texte de la CCNUCC, l'océan a toujours été approché sous cet angle. On ne compte plus les dispositions relatives à la protection et au renforcement des « puits et réservoirs de gaz à effet de serre »¹⁸. De la sorte, tous les enjeux relatifs à l'océan en tant que tel ont été relayés au second plan voire, passés sous silence. Désigner directement l'océan dans ces textes, de même que lui consacrer des dispositions rendant plus compte de l'ensemble des relations océan-climat, lui permettrait d'acquérir une plus grande force juridique, à l'instar des forêts qui bénéficient d'une réelle prise en compte.

Une reconnaissance juridique faible

Les dispositions juridiques relatives à l'océan, qu'elles le soient de manière explicite ou non, ne jouissent que d'une portée relative. Le fait que l'océan soit pris en compte de manière résiduelle ou conditionnelle dans les textes relatifs au climat démontre une force juridique limitée. L'océan a par exemple été désigné explicitement dans l'Accord de Paris mais uniquement dans son préambule qui, dans l'esprit général du texte, mentionne notamment les grands objectifs poursuivis par les États parties. Un préambule, qui possède une valeur juridique moindre que le corps du traité, renferme des dispositions qui sont par essence trop générales pour être appliquées et qui ne prévoient pas d'obligation ou d'engagement. Ainsi, même lorsque l'océan est appréhendé en tant que tel, il ne bénéficie pas de disposition directement contraignante et, sa reconnaissance juridique s'en trouve amoindrie.

18 L'art 4 de la CCNUCC portant sur les engagements et le § 4 du préambule y font référence. Texte de la CCNUCC accessible à l'adresse internet suivante : <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convfr.pdf> (dernière consultation en août 2016). Le protocole de Kyoto fait référence aux « puits et réservoirs de gaz à effet de serre » aux articles 2-1. A) ii); 3-3; 3-4; 3-7; 5-1; 5-2; 5-3; 6-1; 7-1; 10-1 a); 10-1 b) ii). Texte du protocole de Kyoto accessible à l'adresse internet suivante : <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpfrench.pdf> (dernière consultation en août 2016). L'Accord de Paris y fait référence dans son préambule et dans son article 5-1. Texte de l'Accord de Paris accessible à l'adresse internet suivante : <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/fr/109r01f.pdf> (dernière consultation en août 2016).

Par ailleurs, les dispositions relatives à l'océan, qu'elles le fassent explicitement ou non, ont souvent recours à une terminologie peu contraignante. Ainsi, l'Accord de Paris explique que les parties « devraient » prendre des mesures de protection des puits ou réservoirs de gaz à effet de serre¹⁹. L'usage du conditionnel sous-entend que cette disposition n'a pas de grande force obligatoire de sorte que son non-respect n'entraînerait pas de sanction. De même, si l'Accord de Paris s'élève au rang de traité international, ce type de dispositions sera difficilement applicable. *In fine*, la protection de l'océan en tant que puits ou réservoir ne serait qu'une possibilité, qu'un exemple de levier d'action sur lequel les États peuvent s'appuyer pour mettre en œuvre les traités. Constat surprenant dès lors que, dans le même temps, la science prouve que l'océan constitue un véritable régulateur du climat. Ce hiatus entre la gouvernance internationale du climat et de l'océan d'une part et, les constats scientifiques et la réalité du monde d'une autre, fait apparaître un « schisme avec le réel »²⁰.

En somme, ce n'est pas tant l'absence de l'océan dans le régime climatique qui s'observe, mais plus le manque de traitement global et d'effectivité des dispositions juridiques particulières le concernant. Ce manque a notamment pu s'expliquer par une faible mobilisation des communautés politique et scientifique sur ces questions. Tel n'est plus le cas aujourd'hui. Les actions de la Plateforme Océan et Climat par exemple nourrissent le débat scientifique et citoyen autour des interactions entre océan et climat.

Vers une prise en compte renforcée de l'océan par le droit du climat ?

Les mobilisations de la société civile et de la communauté scientifique lors de la COP21 ont permis une avancée notable de la prise en compte de l'océan par la gouvernance internationale climatique.

19 Article 5 de l'Accord de Paris : « Les Parties devraient prendre des mesures pour conserver et, le cas échéant, renforcer les puits et réservoirs de gaz à effet de serre comme le prévoit l'alinéa d) du paragraphe 1 de l'article 4 de la Convention ».

20 AYKUT (S. C.), DAHAN (A.) : Gouverner le climat ? 20 ans de négociations internationales, Chapitre 8 : Paris (France), éd. Presses de la fondation nationale des sciences politiques (Sciences Po Les Presses), coll. Références : Développement durable, 2014, p. 399 et s.

L'Accord de Paris sur le climat

L'Accord de Paris adopté le 12 décembre 2015 pose en effet les fondements d'une prise en compte renforcée de l'océan par le régime climatique. Il permet un renouvellement, près de vingt-cinq ans après la signature de la CCNUCC, de la manière dont l'océan est pris en compte par le régime climatique dès lors qu'il y est fait explicitement référence, en tant que tel. Certes, cet accord ne prévoit pas de mécanismes de contrôle ou de sanction et comprend des dispositions souvent trop générales pour être directement applicables par les États. À rebours d'un texte purement contraignant, reposant sur des mesures claires et précises, complétées par des mécanismes de contrôle, l'Accord de Paris se fonde sur des contributions volontaires, ainsi que sur des objectifs généraux. Ceci étant, cette technique juridique présente une plus grande flexibilité, adaptabilité et malléabilité. Les partisans de cette approche défendent l'idée qu'elle a l'avantage d'être plus réaliste et par conséquent, plus efficace. Ainsi, dès lors que les États ont fait référence de manière explicite à l'océan dans un accord d'une telle force politique, il leur sera sûrement plus difficile de ne pas en tenir compte dans leurs politiques nationales.

Le futur rapport spécial du GIEC sur les interactions entre le changement climatique, les océans et la cryosphère

Le manque de consistance du droit international ne doit cependant pas laisser présager d'un avenir juridique décevant. Le futur rapport du GIEC et la nébuleuse de travaux scientifiques pertinents pourraient influencer l'évolution du droit du climat. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a ainsi décidé, lors de sa 43^e session plénière en avril 2016, de consacrer un rapport spécial aux interactions entre le changement climatique, les océans et la cryosphère²¹.

Le fonctionnement du GIEC et la portée de ses travaux laissent entrevoir une évolution prochaine

21 Présentation du rapport spécial du GIEC sur les interactions entre le changement climatique, les océans et la cryosphère et sous-thématiques abordées accessibles à l'adresse internet suivant : <https://www.ipcc.ch/report/srocc/> (dernière consultation en août 2016).

de la place de l'océan dans le régime climatique. Le GIEC qui n'a pas pour vocation première d'effectuer des travaux de recherche ou de produire du contenu scientifique, travaille essentiellement à faire une synthèse et une évaluation de l'état de la science relative aux changements climatiques. Ses travaux servent de fondement à une décision politique éclairée. Il permet ainsi de faciliter, voire d'aiguiller la formation du droit. Si le GIEC décide d'axer une partie de ses travaux sur l'océan, il faut peut-être y voir les prémices d'une meilleure prise en compte des interactions entre l'océan et le climat dans le cadre du régime climatique.

La 22^e Conférence des Parties (COP) à la CCNUCC

La communauté scientifique dans son ensemble comme la société civile et les citoyens ont également un rôle proactif et complémentaire à jouer pour interpeller la communauté internationale et les décideurs politiques sur le rôle charnière de l'océan pour la protection de l'environnement et du climat à l'échelle planétaire. De nombreuses initiatives et projets voient le jour dans le monde entier, mobilisant des acteurs multiples (ONG, instituts de recherche, populations locales, entreprises privées, etc.) et de plus en plus nombreux, par-delà les frontières nationales. Bien que multiple, cette communauté d'intérêt pour la cause environnementale porte en

elle l'espoir qu'à la prochaine Conférence des parties à la CCNUCC qui se tiendra à Marrakech (Maroc) en novembre prochain, un plan d'action sur l'océan soit discuté.

CONCLUSION

La question de savoir si tant le droit international de la mer que le droit du climat seront capables de faire face aux nouveaux défis posés par les changements climatiques sera une question d'actualité au ^{xxi}^e siècle. Dans un contexte de manque de capacités et de concentration de richesses naturelles devenues rares, les réponses apportées par le droit international public sont encore insuffisantes. Elles s'attachent pour la plupart à proposer des réponses pour limiter l'impact des changements climatiques sur l'océan plutôt qu'à envisager des solutions plus ambitieuses qui supposeraient d'appréhender l'océan de manière globale comme le régulateur du climat mondial.



LEXIQUE

Convention-cadre. La convention-cadre est une technique juridique souvent utilisée par les États pour établir des règles générales les engageant à coopérer et à poser des principes d'action à propos d'un thème particulier (ex : Antarctique, mers régionales, climat, biodiversité). Les modalités précises de mise en œuvre sont déterminées ensuite par des protocoles additionnels et des mesures d'application nationales.

Droit international public. Le droit international public se définit selon divers critères : les sujets qu'il régit, les relations qu'il régit ou, l'origine des normes dont il est composé. Selon les sujets qu'il régit, le droit international public comprend l'ensemble des règles juridiques qui président à la conduite des sujets du droit international (États, organisations internationales, particuliers, etc.). Selon les relations régies, il s'agit de l'ensemble des règles juridiques qui régissent les relations internationales. Enfin, selon l'origine des normes, le droit international public désigne l'ensemble des normes qui ont pour origine les accords entre États ou émanant d'entités auxquels les États ont accordé ou reconnu le pouvoir de créer des normes internationales.

Droit de la mer. Ensemble des règles de droit international relatives à la détermination et au statut des espaces maritimes et au régime des activités ayant pour cadre le milieu marin.

Droit du climat. Ensemble des règles de droit international visant à prévoir, prévenir ou atténuer les causes des changements climatiques et en limiter les effets néfastes (art. 3, CCNUCC); ou, réglementation des activités humaines impactant le climat.

Régime juridique. Ensemble des règles qui régissent une institution juridique déterminée.

Effectivité juridique. Caractère de ce qui existe en fait. Qualité d'une situation juridique qui correspond à la réalité, d'une compétence qui s'exerce réellement. L'effectivité produit des effets en droit, dans les conditions prévues par l'ordre juridique international lui-même. Elle joue en conséquence un rôle dans de nombreuses institutions de droit international.

Puits de gaz à effet de serre. Tout processus, toute activité ou tout mécanisme, naturel ou artificiel, qui élimine de l'atmosphère un gaz à effet de serre, un aérosol ou un précurseur de gaz à effet de serre.

Réservoir de gaz à effet de serre. Un ou plusieurs constituants du système climatique qui retiennent un gaz à effet de serre ou un précurseur de gaz à effet de serre.

Patrimoine commun de l'humanité. Espaces ou biens appartenant à l'humanité tout entière et, partant, soustraits à l'appropriation exclusive des États.

État partie. Qualité d'un État ayant exprimé son consentement à être lié par le traité et à l'égard duquel le traité est entré en vigueur.

Signature (d'un traité). La signature relève du pouvoir exécutif uniquement (chef de l'État, chef du gouvernement ou ministres, selon l'importance du traité signé). La signature d'une Convention ou d'un Protocole équivaut à une approbation préliminaire. Elle n'entraîne pas d'obligation exécutoire, mais affiche l'intention d'un État d'examiner le traité au niveau national et d'envisager de le ratifier. Bien que cette signature ne soit pas une promesse de ratification, elle engage l'État à ne pas commettre d'actes contraires aux objectifs ou à la raison d'être du traité.

Ratification (d'un traité). La ratification signifie qu'un État accepte d'être juridiquement lié par les dispositions d'une Convention. L'État signe le traité d'abord, et le ratifie ensuite. Une convention n'entrera en vigueur qu'après avoir été ratifiée par un nombre minimum d'États (c'est la convention elle-même qui définit le seuil requis pour son entrée en vigueur).

REMERCIEMENTS

Bleuenn Guilloux et Romain Schumm remercient sincèrement Jean-Pierre Beurrier (Centre de Droit Maritime et Océanique), Jean-Louis Filon (Institut Français de la Mer), Olivier Laurens (Institut Français de la Mer), Janet Lescaeve, Louise Ras (Plateforme Océan et Climat) Régis Menu (Institut Français de la Mer), Youth for Ocean (YO!) et la Plateforme Océan et Climat pour leur aide précieuse.

RÉFÉRENCES

- AYKUT S. C. and DAHAN A., 2014 – *Gouverner le climat ? 20 ans de négociations internationales*. Paris, Presses de la fondation nationale des sciences politiques (Sciences Po Les Presses), coll. Références : Développement durable, 749 p.
- BEURIER J.-P. and KISS A., 2010 – *Droit international de l'environnement*. Paris, Pédone Press, coll. Études internationales, 2010, 590 p.
- BEURIER J.-P. (dir.), 2015-2015 – *Droits maritimes*. Paris, Dalloz Press, coll. Dalloz action, 1792 p.
- BOYLE A. – *Law of the Sea Perspectives on the Climate Change*. International Journal of Marine and Coastal Law, vol. 27, Issue 4, 2012, p. 831-838.
- BUREAU DES AFFAIRES JURIDIQUES – DIVISION DES AFFAIRES MARITIMES ET DU DROIT DE LA MER (ONU), 13 septembre 2010 – *Oceans and Climate Change*. New York, 7 p., www.un.org/depts/los/oceans_climate_change/oceans_climate_change_7_september_2010.pdf.
- BUREAU DES AFFAIRES JURIDIQUES – DIVISION DES AFFAIRES MARITIMES ET DU DROIT DE LA MER (ONU), 2005 – *Le droit de la mer : obligations des États aux termes de la convention des Nations unies sur le droit de la mer et des instruments complémentaires*. New York, éd. Des Nations unies, 72 p., www.un.org/depts/los/doalos_publications/publicationtexts/E.04.V.5_f.pdf.
- CÁMARA STOUGAARD-ANDRESEN R. A. – *Climate Change and the Law of the Sea*. Master thesis, Lund, éd. University of Lund, 2011, 77 p. ; en ligne : <http://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=1973940&fileId=1973941>
- DAILLIER P., FORTEAU M., PELLET A. and NGUYEN Q. D., 2009 – *Droit international public*, Paris, éd. LGDJ, coll. Traités, 8^{ème} éd., 1722 p.
- FOYER J., 23 février 2016 – *Dans les coulisses de la COP 21, La vie des idées*. www.laviedesidees.fr/Dans-les-coulisses-de-la-COP21.html.
- HERR D. and GALLAND G. R. – *The Ocean and Climate Change: Tools and Guidelines for Action*. Gland, éd. IUCN, 72 p., https://cmsdata.iucn.org/downloads/the_ocean_and_climate_change.pdf.
- IISD, 2016 – *Climate change Policy and Practice*, <http://climate-l.iisd.org>.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2016 – www.ipcc.ch.
- MALJEAN-DUBOIS S. – *La mise en oeuvre du droit international de l'environnement*. Notes de l'IDDRI, n°4, 2003, 64 p., www.iddri.org/Publications/Collections/Analyses/an_0303_maljeandubois_DIE.pdf.
- MALJEAN-DUBOIS S., SPENCER T. and WEMAËRE M., 2015 – *La forme juridique du futur accord de Paris sur le climat : enjeux et principales options*. Cahiers Droit, Sciences et Technologies, p. 177-208, <https://cdst.revues.org/416#text>.
- MBENGUE M.M., 2010 – *Le GIEC : De l'expertise ex post à l'expertise ex ante en matière de protection internationale de l'environnement*. In *Actes du colloque de la SFDI : le droit international face aux enjeux environnementaux*, Paris, éd. Pédone, 490 p.
- ORELLANA M. A., 2015 – *Climate Change and the International Law of the Sea*. In ABATE R. S. (dir.) – *Climate Change Impacts on Ocean and Coastal Law: U.S. and International Perspectives*, New York, éd. Oxford University Press, p. 253-271.
- SALMON J. (dir.), 2001 – *Dictionnaire de droit international public*. Bruxelles, éd. Bruylant, coll. Universités francophones, 1198 p.
- SOUTENBURG J. G., 2011 – *Implementing a New Regime of Stable Maritime Zones to Ensure the (Economic) Survival of Small Islands States Threatened by Sea-Level Rise*. International Journal of Marine and Coastal Law, vol. 26, Issue 2, p. 263-311.



Auteurs

Denis Allemand

Centre Scientifique de Monaco (CSM), Monaco

Claire Bertin

Institut Océanographique Paul Ricard (IOPR), Île des Embiez

Gilles Bœuf

Museum National d'Histoire Naturelle (MNHN) et Université Pierre et Marie Curie (UPMC)

Guigone Camus

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

Xavier Capet

Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Paris

Christine Causse

Centre national de la mer, Nausicaá, Boulogne-sur-Mer

Adrien Comte

Université de Bretagne Occidentale (UBO), AMURE, Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Ifremer

Erik Cordes

Temple University, Philadelphia

Lucile Courtial

Centre Scientifique de Monaco (CSM), Monaco

Bertrand Delorme

Stanford University, Stanford

Yassir Eddebbar

SCRIPPS Institution of Oceanography, University of California, San Diego

Leïla Ezzat

Centre Scientifique de Monaco (CSM), Monaco

Françoise Gaill

Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Paris.

Clara Grillet

Plateforme Océan et Climat et Institut d'Études Politiques de Paris (Sciences Po), Paris

Bleuenn Guilloux

Université de Bretagne Occidentale (UBO), Centre de droit et d'économie, Brest

Rachel M. Jeffreys

University of Liverpool, Liverpool

Jennifer T. Le

Scripps Institution of Oceanography, University of California, San Diego

Nadine Le Bris

Laboratoire d'Ecogéochimie des Environnements Benthiques, Université Pierre et Marie Curie (UPMC), Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS)

Christophe Lefebvre

Agence des Aires Marines Protégées (AMP), Brest

Lisa A. Levin

Scripps Institution of Oceanography, University of California, San Diego

Benoît Meyssignac

Centre national d'études spatiales (CNES), Laboratoire d'Études en Géophysique et Océanographie Spatiales (LEGOS), Toulouse

Daria Mokhnacheva

Organisation Internationale pour les Migrations (OIM), Genève

Louise Ras

Plateforme Océan et Climat et Institut d'Études Politiques (Sciences Po Bordeaux), Pessac

Kirk N. Sato

Scripps Institution of Oceanography, University of California, San Diego

Romain Schumm

Plateforme Océan et Climat et AgroParisTech-ENGREF, Paris

Chih-Lin Wei

National Taiwan University, Institute of Oceanography, Taipei



Comité scientifique

Denis Allemand

Centre scientifique de Monaco

Denis Bailly

UBO AMURE Brest

Gilles Bœuf

MNHN UPMC

Laurent Bopp

CNRS IPSL CEA

Claude Boucher

CNFGG

(Comité national français de géodésie et de géophysique)

Chris Bowler

CNRS ENS

Guigone Camus

EHESS

Xavier Capet

CNRS IPSL UPMC

Nan-Chin Chu

EMB (European Marine Board)

Biliana Cicin-Sain

GOF (Global Ocean Forum)

Philippe Cury

IRD

Françoise Gaill

CNRS – Coordinatrice du comité scientifique

Paul Falkowski

Rutgers University

Didier Gascuel

AFH (Association française d'halieutique)

Jean-Pierre Gattuso

CNRS UPMC Villefranche

Kirsten Isensee

COI UNESCO

Catherine Jeandel

CNRS LEGOS Toulouse

Eric Karsenti

CNRS EMBL ENS

Thorsten Kiefer

Future Earth

Nadine Le Bris

UPMC CNRS LECOB Banyuls-sur-mer

Hélène Lecornu

SHOM Brest

Lisa Levin

Scripps institution of oceanography

Alexandre Magnan

IDDRI

Fabrice Messal

Mercator Océan Toulouse

Marc Metian

IAEA Monaco

Yves-Marie Paulet

UBO Brest

Thierry Perez

CNRS IMBE Marseille

Serge Planes

CNRS EPHE CRIOBE

Gilles Reverdin

CNRS UPMC LOCEAN

Sabrina Speich

ENS LSCE UPMC

Lisa Emelia Svensson

Ambassadeur de Suède aux Nations unies

Éric Thiebaut

UPMC Roscoff

Marjan Van Den Belt

Massey University

Colomban de Vargas

CNRS UPMC Roscoff

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 COP22.

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.



ocean-climate.org