



ocean-climate.org

OCÉAN ET CLIMAT
FICHES SCIENTIFIQUES

POUR PLUS D'INFORMATIONS, CONTACTER:

Le secrétariat de la Plateforme Océan et Climat : outreach@ocean-climate.org

Coordination: **Françoise Gaill**

Animation et réalisation: **Anaïs Deprez, Emilie Etienne, Gauthier Carle**

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

Réalisation graphique: **Elsa Godet**

CITATION

OCÉAN ET CLIMAT, 2019 – Fiches scientifiques. www.ocean-climate.org, 130 pages.

Septembre 2019

La Plateforme « Océan et Climat »

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 30 % 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 voit donc 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 (POC) est née d'une alliance entre des organisations non gouvernementales et des instituts de recherche et regroupe plus de 70 organisations, organismes scientifiques, universités, institutions de recherche, etc. dont l'objectif est de valoriser l'expertise scientifique et de porter un plaidoyer sur les enjeux océan-climat auprès des décideurs politiques et du grand public.

Forte de son expertise, la POC vient en appui des décideurs en besoin d'information scientifique et d'orientation dans la réalisation des politiques publiques. La POC répond également à une nécessité aussi bien exprimée par la communauté scientifique que par les représentants du secteur privé et de la société civile : l'existence d'un espace de rencontre, d'échange et de réflexion autour duquel les acteurs de l'océan et du climat peuvent construire une approche efficace et holistique face à l'enjeu de la protection des écosystèmes marins et la lutte contre le changement climatique.

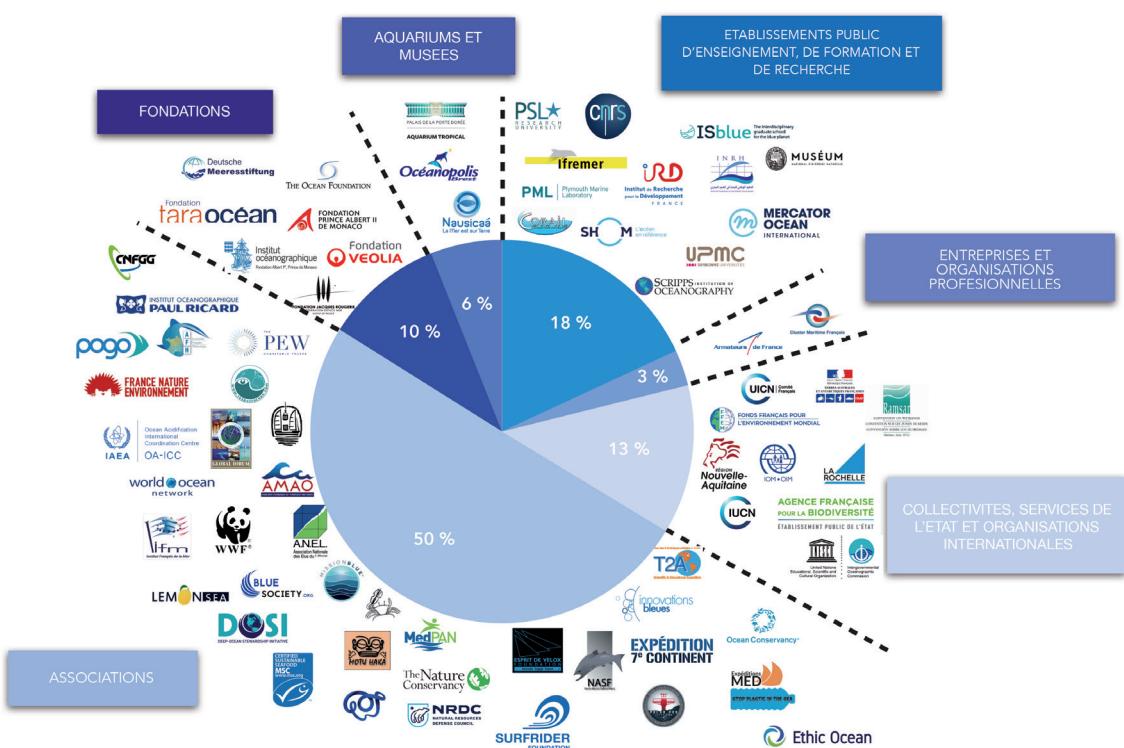


Table des matières

Avant-propos	
Françoise Gaill	06
1• L'océan, réservoir de chaleur	
Sabrina Speich	08
2• L'océan, pompe à carbone	
Laurent Bopp, Chris Bowler, Lionel Guidi, Éric Karsenti, Colomban de Vargas	23
3• L'océan profond dans le contexte du changement climatique	
Nadine Le Bris.	29
4• Les coraux et le changement climatique	
Denis Allemand	36
5• Blanchissement des coraux, un réservoir de biodiversité menacé	
Leïla Ezzat	50
6• Océan, biodiversité et climat	
Gilles Bœuf	59
7• Biodiversité marine exploitée et changement climatique	
Philippe Cury	64
8• Surexploitation et pêche durable : quels enjeux pour aujourd'hui et pour demain ?	
Didier Gascuel	68
9• Aquaculture et changements globaux	
Marc Metian	75
10• Arctique: opportunités, enjeux et défis	
Emmanuelle Quillérou, Mathilde Jacquot, Annie Cudennec, Denis Bailly, Anne Choquet, Laure Zakrewski	81
11• Les petites îles, l'océan et le climat	
Virginie Duvat, Alexandre Magnan, Jean-Pierre Gattuso	98
12• Océan, changements climatiques et migration	
Guigone Camus, Christine Causse, Daria Mokhnacheva	112
13• The international Laws for Ocean and Climate	
Bleuenn Guilloux	118



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 30 % 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 pharmaco-logiques. 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, désoxygénéation, 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 (CCNUCC). 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 intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a publié un Rapport spécial sur « *l'Océan et la Cryosphère dans le contexte du changement climatique* » en septembre 2019 : le premier rapport du GIEC consacré à l'Océan.

L'Océan est donc rentré de plain-pied dans les négociations climatiques ! Ces accomplissements sont le fruit d'un long travail de plaidoyer de la Plateforme Océan et Climat et de ses membres.

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. 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 ». 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 diversifiées, 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 plus que temps de le protéger !

Dans la continuité des articles publiés par la POC pour la COP21, cet ensemble d'articles reprend un certain nombre d'éléments clefs du rapport spécial du GIEC sur « l'Océan et la Cryosphère dans le contexte du changement climatique » (septembre 2019), et apporte de nouveaux éléments publiés suite à la parution de ce rapport. Une mise en perspective des dernières actualités océan-climat, afin de soulever les enjeux clefs de notre époque et de participer à la mise en œuvre de l'action.



L'océan, réservoir de chaleur

Sabrina Speich

La capacité de l'océan à stocker la chaleur est bien plus efficace (absorption de 94 % de l'excédent d'énergie résultant de l'augmentation de la concentration atmosphérique des gaz à effet de serre due aux activités humaines) que les continents (2 %), la glace (2 %) et l'atmosphère (2 %) (Figure 1 ; Bindoff *et al.*, 2007 ; Rhein *et al.*, 2013 ; Cheng *et al.*, 2019). Il a ainsi un effet modérateur sur le climat et ses changements. Toutefois, l'absorption par l'océan de l'excès de chaleur induit par l'augmentation du contenu atmosphérique des gaz à effet de serre provoque un réchauffement des eaux marines, ce qui a des conséquences sur les propriétés et la dynamique de l'océan, sur son volume, sur ses échanges avec l'atmosphère (notamment le cycle des précipitations et les événements extrêmes) et sur les habitats des écosystèmes marins. Pendant longtemps, les discussions sur le changement climatique n'ont pas pris les océans en compte. Ceci tout simplement parce que l'on en savait très peu à leur sujet. Cependant, notre capacité de comprendre et d'anticiper l'évolution du climat terrestre, dépend de notre connaissance fine des océans et de leurs liens avec le climat.

OCÉAN: RÉSERVOIR DE CHALEUR ET SOURCE D'EAU

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

L'océan, très mince couche d'eau salée, intègre plus de 96 % de l'eau de la Terre, couvre 7 % de sa surface et il agit comme son thermostat: il réchauffe l'atmosphère et lui cède de l'eau pour former des nuages et distribuer les précipitations (pluie, neige) dans le monde. C'est l'élément essentiel du système clima-

tique puisqu'il digère et atténue les changements en cours dus aux émissions anthropiques de gaz à effet de serre : il absorbe presque tout l'excès de chaleur (94 % : Cheng *et al.*, 2019) et un quart du CO₂ (Le Quéré *et al.*, 2018) produit par l'homme. Sans lui, le réchauffement de l'atmosphère observé depuis le début du xix^e siècle serait beaucoup plus intense.

Le climat de notre planète est régi de manière importante par l'océan qui en est le principal régulateur grâce à sa capacité à absorber intégralement tout type de rayonnement incident à sa surface et à ses échanges radiatifs, mécaniques et gazeux continuels avec l'atmosphère. Ces échanges et leurs conséquences sont au cœur du système climatique. L'océan reçoit de la chaleur du rayonnement électromagnétique solaire, donc principalement dans les régions tropicales, mais échange aussi fortement en surface avec l'atmosphère, à toutes les latitudes

où il n'est pas englacé. L'océan n'est pas statique et les courants océaniques redistribuent l'excès de chaleur reçu aux tropiques vers les plus hautes latitudes, mais aussi vers l'océan profond, en particulier par l'intermédiaire de transferts aux hautes latitudes dans des régions où les eaux de surface deviennent plus denses et plongent, principalement sous l'effet de fortes pertes de chaleur. Il réagit aussi dynamiquement à des changements des conditions climatiques (vents, ensoleillement...). Le temps de ces transferts et de ces redistributions est très variable, et va de la saison à l'année dans les régions tropicales, à la décennie dans les couches de surface, et même jusqu'à plusieurs centaines d'années, voire des milliers d'années dans les couches profondes.

Atmosphère et océan n'échangent pas uniquement de la chaleur, mais aussi de l'eau, sous forme d'évaporation et de précipitations (pluie, neige). Les océans stockent 97 %, (1 338 000 000 km³) de la quantité totale d'eau mondiale (1 386 000 000 km³) les continents en contiennent 2,4 % et l'atmosphère moins de 0,001 % (Gleick, 1996). L'eau sur Terre circule en permanence dans un cycle, appelé cycle hydrologique. D'une manière simplifiée, on peut dire que dans ce cycle l'eau pénètre dans l'atmosphère par évaporation depuis l'océan (qui fournit 90 % de cette eau) et les continents. La vapeur d'eau monte, forme des nuages et l'eau retombe sur la Terre sous forme de pluie, de grêle ou de neige. Une partie des précipitations qui tombent sur la terre reste sur la végétation et retourne dans l'atmosphère par évaporation. Une partie des précipitations qui atteignent le sol s'évapore aussi. Le reste s'infiltra dans le sol où il pénètre jusqu'à la nappe phréatique ou s'écoule en aval. Cela alimente les lacs et les rivières qui, finalement, transportent l'eau vers les océans.

L'eau s'évapore de manière continue de l'océan. La pluie et le déversement des fleuves compensent l'évaporation, mais pas forcément dans les mêmes régions. L'océan est aussi salé, ce qui transforme les propriétés physiques de l'eau de mer, en particulier sa densité. Les échanges d'eau avec l'atmosphère, les apports des rivières, de la fonte de la glace de mer ou des calottes de glace contribuent donc aux

variations de densité de l'eau de mer, et donc à la circulation océanique et aux transferts verticaux dans l'océan. Le renouvellement des eaux de surface par la circulation océanique et en particulier les échanges avec l'océan profond jouent aussi un rôle très important dans le cycle du CO₂, en entraînant les eaux enrichies en dioxyde de carbone des hautes latitudes vers l'océan profond.

L'OCÉAN SE RÉCHAUFFE

Le réchauffement récent causé par l'émission de gaz à effet de serre par les activités humaines n'affecte pas que les basses couches de l'atmosphère et la surface des continents. Les quatrième et cinquième rapports d'évaluation du Groupe de travail du GIEC (ci-après "le AR4 et AR5 du GIEC") ont souligné le rôle critique joué par l'océan à la fois dans la réponse à long terme du système terrestre au réchauffement planétaire et dans les prévisions à court terme (GIEC, 2013). Les variations de la teneur en chaleur et de la teneur en eau douce peuvent donner lieu à la prévisibilité d'informations pertinentes au niveau sociétal sur les échelles de temps de l'ordre de la décennie. 94 % du réchauffement planétaire associé au changement climatique anthropique se manifeste par le réchauffement des océans de la planète (1 ; Bindoff et al., 2007 ; Rhein et al., 2013 ; Cheng et al., 2019). Les simulations des modèles climatiques montrent que le changement global de la teneur en chaleur de l'océan devient le facteur dominant dans le bilan thermique planétaire sur une période de plusieurs mois et fournit une indication plus fiable du forçage radiatif net de la Terre que les changements de la température de surface globale (Palmer et al., 2011 ; Palmer et McNeall, 2014 ; von Schuckmann et al., 2016).

La dilatation thermique associée au réchauffement de l'océan représente environ 30 à 40 % de l'élévation observée du niveau de la mer (WCRP Global Sea Level Budget group, 2018 ; Church et al., 2011) et devrait apporter une contribution substantielle aux projections futures pour le xxi^e siècle (Church et al., 2013). La configuration spatiale du changement de la teneur en chaleur océanique exerce une forte influence sur



le changement local du niveau de la mer et demeure une incertitude clé dans les projections régionales de l'élévation du niveau de la mer (par exemple, Slanen et al., 2014; Cannaby et al., 2016; Carson et al., 2016). De plus, nous commençons à comprendre l'importance de la configuration spatiale du réchauffement des océans en fonction des rétroactions climatiques et de la sensibilité du climat (Rose et al., 2014; Rose et Rayborn, 2016), qui détermine la quantité de réchauffement en surface qui aura lieu pour une quantité d'émissions de gaz à effet de serre donnée.

Les altérations du cycle mondial de l'eau, telles que les variations de la disponibilité en eau, les sécheresses et les inondations, sont une préoccupation majeure liée au changement climatique. L'océan représente 97 % de l'eau stockée dans tous les réservoirs d'eau, et 80 % des flux d'eau douce de surface de la Terre se produisent à l'interface océan-atmosphère (Durack, 2015). Les eaux océaniques contiennent des sels simples (p. ex. Pawlowicz et al., 2016), et lors du processus d'évaporation, ces sels demeurent dans l'océan: ainsi, au fur et à mesure que l'eau passe de l'océan à l'atmosphère et vice versa, des anomalies de salinité persistent et s'accumulent, fournissant un indicateur de la variabilité ou du changement du cycle hydrologique.

Les changements observés dans les contenus de chaleur et d'eau douce de l'océan sont calculés sur la base des mesures *in situ* disponibles de température et de salinité subsurface. Bien que le premier relevé mondial de la température de subsurface de l'océan remonte à l'expédition H.M.S Challenger à la fin du xixe siècle (Roemmich et al., 2012), ce n'est qu'à la fin des années 1960 que l'on a pu obtenir des mesures généralisées de la température des océans dans les premiers 300–700 m (Abraham et al., 2013). Les observations historiques de l'océan au cours de la seconde moitié du xx^e siècle sont fortement concentrées dans l'hémisphère Nord, car ces mesures sont principalement associées aux navires de recherche et aux activités maritimes qui étaient particulièrement importantes dans ces régions. Cependant, ce n'est que depuis le milieu des années 2000, avec l'avènement du réseau de flotteurs profileurs autonomes du programme international Argo (www.argo.org.

Where is global warming going?

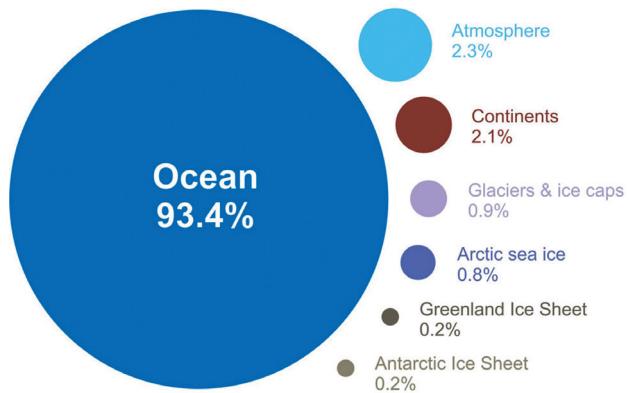


Fig. 1 — Représentation visuelle de la quantité de chaleur due au réchauffement de la planète d'origine anthropique qui entre dans les différentes composantes du système climatique pour la période de 1993 à 2003, calculée à partir du AR4 du GIEC (Bindoff et al., 2007, section 5.2.2.2.3). Cette estimation avait été confirmée par le AR5 du GIEC (Rhein et al., 2013). Aujourd'hui cette estimation est revue avec une valeur à la hausse pour l'océan: (94 %: Cheng et al., 2019), valeur qui sera probablement reprise par l'AR6 du GIEC ainsi que celle des autres composantes du système climatique. Il est à noter que le fait de se concentrer sur la température de l'air à la surface de la Terre ne tient pas compte d'au moins 90 % du réchauffement global de la planète. Ainsi, indexer le réchauffement global du climat de la Terre par sa température de surface revient à sous-estimer de 90 % celui-ci. Adapted from <https://skepticalscience.com/Infographic-on-where-global-warming-is-going.html>

net), que nous disposons d'échantillonnages réguliers et quasi globaux des océans sur les premiers 2000 m (Roemmich et al., 2012; Riser et al., 2016). Argo fournit également des observations colocalisées de la salinité, à partir desquelles on peut déduire non seulement le changement en contenu de chaleur mais aussi celui en eau douce dans l'océan. Ces observations de température et de salinité colocalisées nous permettent de calculer le champ de masse volumique et son influence sur les changements régionaux du niveau de la mer (Willis et al., 2008), les changements connexes dans l'écoulement océanique (Gray et Riser, 2014) et fournissent des aperçus mécanistes concernant les changements observés grâce à l'analyse des masses d'eau (Desbruyères et al., 2016).

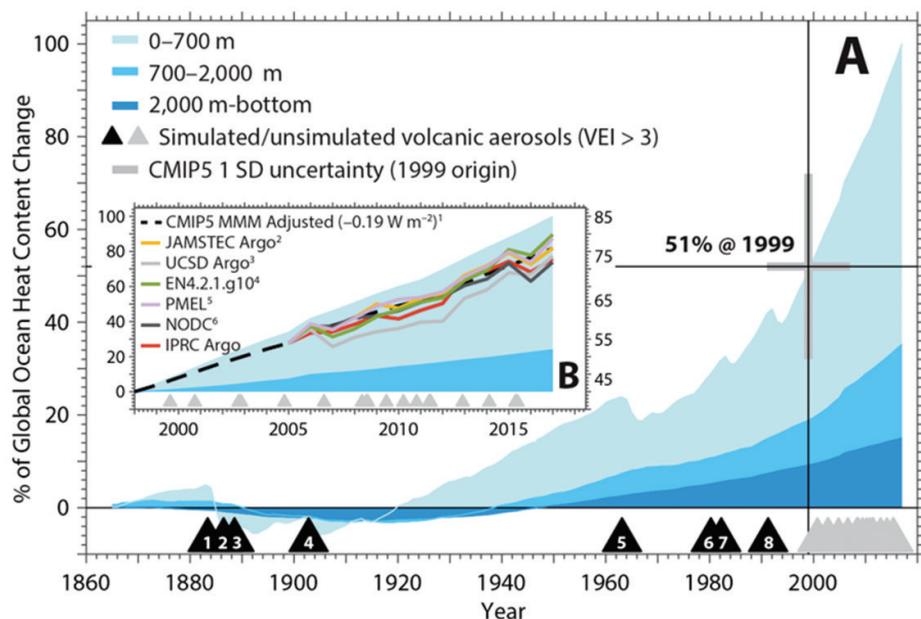
L'avènement de la télédétection en 1978 avec le satellite en orbite autour de la Terre Seasat a marqué le début d'une nouvelle ère dans les études océaniques mondiales, avec la première de ces plateformes à distance comprenant un altimètre radar pour mesurer la hauteur du satellite au-dessus de la surface de l'océan, un difusiomètre à micro-ondes pour mesurer la vitesse et la direction des vents, un radiomètre à micro-ondes pour mesurer la température de surface et des radiomètres visibles et à infrarouge pour identifier les nuages, la terre et les éléments aquatiques. L'utilité de ces plateformes spatiales éloignées a été démontrée pour la mesure de la température de surface de la mer au début des années 1980 (p. ex. McConaghay, 1980); au début des années 1990, la quantité intégrée de la hauteur de la mer a été établie (p. ex. Le Traon et al., 1998; Duce et al., 2000), et le premier satellite observant la salinité de surface de la mer a été lancé en novembre 2009 (le satellite SMOS de l'ESA sur l'humidité des sols et la salinité des océans). Plusieurs autres missions ont été lancées peu après (p. ex. Berger et al., 2002; Lagerloef et al., 2008; Fore et al., 2016). Les observations par satellite fournissent ainsi une vision exceptionnelle à haute résolution sur la manifestation de la dynamique de l'océan de surface en température, niveau de la mer et salinité de surface.

Les données satellitaires complètent de manière idéale les observations *in situ* de l'océan car elles fournissent un contexte spatio-temporel aux mesures effectuées de manière éparses par les navires océanographiques et les flotteurs Argo. Ainsi, les mesures satellitaires aident à résoudre les problèmes d'échelle ou à surveiller les régions qui ne sont pas suffisamment échantillonnées ou couvertes par les observations *in situ*, comme c'est le cas, par exemple, des variations des océans côtiers et des mers marginales associés aux panaches fluviaux qui influencent le contenu en eau douce au niveau régional (p. ex. Fournier et al., 2016). Les mesures *in situ* sont généralement beaucoup plus précises, ce qui permet d'obtenir la fiabilité au sol pour l'étalonnage et la validation des données satellitaires. L'utilisation combinée de ces données permet d'obtenir des estimations en contenu de chaleur et d'eau douce de l'océan à la fois sur l'échelle globale et sur l'échelle régionale (Reynolds et al., 2007; Guinehut et al., 2012; Xie et al.; 2014).

LES CHANGEMENTS OBSERVÉS EN CONTENU DE CHALEUR (I.E. ÉNERGIE)

Avant le programme Argo, une grande partie de l'évaluation de la variabilité océanique mondiale se limitait aux cycles climatologiques annuels et saisonniers (Levitus, 1984, 1986, 1989; Boyer et Levitus, 2002; Kara et al., 2003; de Boyer Montegut et al., 2004), ou aux époques temporelles quinquennales pour les grands fonds marins (Levitus, 1989). Grâce au programme international Argo, des études beaucoup plus complètes sur la variabilité des océans de l'ère moderne ont été rendues possibles.

La partie supérieure de l'océan (0-700 m) est celle où se trouvent la plupart des mesures historiques et, par conséquent, celle où notre connaissance du changement à long terme est la plus robuste (Figure 2; Abraham et al., 2013). Sur des échelles de temps de plusieurs décennies, une image cohérente des changements de l'océan provoqués par les activités humaines a été mise en évidence dans les observations océaniques depuis que les premières évaluations du réchauffement des océans sont devenues disponibles (p. ex., Levitus et al., 2000). Par la suite, une image claire du changement en cours s'est dégagée, avec un réchauffement sans ambiguïtés de la couche supérieure de l'océan de 1971 à 2010 à un taux moyen de 107 TW (ces estimations varient de 74 à 137 TW selon 5 études indépendantes), et un signal de réchauffement plus faible entre 1870 et 1971 (Rhein et al., 2013), globalement compatible avec notre compréhension des changements du forçage radiatif terrestre (p. ex. Myhre et al., 2013). Alors que la zone de couverture des mesures diminue dans les profondeurs intermédiaires (700 - 2000m) avant Argo, il a été possible de calculer des estimations quinquennales (5 ans) qui remontent à 1957 (Levitus et al., 2012). Celles-ci aussi montrent un réchauffement marqué au cours de la période observée, mais à un rythme plus lent que dans la partie supérieure de l'océan. Ainsi l'océan accumule de l'énergie à un rythme de 4×10^{21} Joules par an, ce qui équivaut à 127 000 centrales nucléaires (dont la production moyenne est de 1 gigawatt) qui déversent leur énergie directement dans les océans du monde.



¹Ridley et al., 2014; ²Hosoda et al., 2008; ³Roemmich & Gilson, 2009; ⁴Good et al., 2013; ⁵Johnson et al., 2018; ⁶Levitus et al., 2012

Fig. 2 — Les modèles océaniques donnent un aperçu de la façon dont l'océan en profondeur réagit aux forçages simulés imposés. Lorsqu'on le compare à la couverture de données du programme international de flotteurs profilants Argo moderne (www.argo.net) et qu'on le corrige en fonction des écarts de forçage par rapport au présent proche des années 2000, le taux de variation du contenu calorifique de l'océan se rapproche des estimations observées. Absorption de la chaleur océanique (pourcentage de la variation totale de 1865-2017) pour les couches moyennes multimodèles (MMM) du CMIP5. Les trois cases ombrées sont combinées de la même manière que la variation de l'inventaire énergétique mondial du AR5 (Rhein et al., 2013; Encadré 3.1 Fig. 1). La barre grise verticale épaisse représente un écart de 1 Déviation Standard (SD) par rapport aux simulations CMIP5 pour l'année (1999) à laquelle l'absorption de chaleur MMM atteint 51 % de l'augmentation nette (1865-2017) de l'ère industrielle, et la barre grise horizontale épaisse indique l'écart CMIP5 1 SD pour l'année à laquelle la chaleur accumulée totale est de 50 %. Les triangles noirs (forçage inclus) et gris (forçage non inclus) représentent les principales éruptions volcaniques des xx^e et xxi^e siècles dont l'ampleur est représentée par la taille des symboles. Figure reproduite de Durack et al. 2018 et adaptée de Gleckler et al. 2016.

Bien que toutes les analyses disponibles montrent un réchauffement historique marqué, les tendances et les taux de ces réchauffements divergent en raison des limites de la zone de couverture des mesures et de la divergence des méthodes utilisées pour tenter de reconstruire les changements globaux à partir d'observations éparses (p. ex., Boyer et al., 2016; Palmer et al., 2017). Cette question disparaît pratiquement pour la partie supérieure et intermédiaire de l'océan depuis l'ère Argo (Figure 2; Roemmich et al., 2015).

S'il est vrai que les mesures en eaux profondes (>2000 m) sont encore plus rares par rapport à

celles à 700 – 2000 m, elles sont récoltées lors de campagnes de recherche océanographique à l'aide de plateformes de mesure calibrées et hautement précises (programme GO-SHIP, Sloyan et al., 2019). Les régions des grands fonds marins ont également connu un réchauffement statistiquement significatif depuis les années 1990, avec une grande variabilité régionale. La surveillance des grands fonds océaniques se limite actuellement à des sections hydrographiques en profondeur, basées sur un réseau épars de trajectoires de navires qui sont généralement répétées tous les deux ou trois ans, et sur des réseaux de mouillages dans le bassin Atlantique (Figure 2; Frajka-Williams et al., 2019).

Le réchauffement de l'océan en profondeur est lié à la plongée des eaux de surface aux latitudes subtropicales à polaires. Cette plongée plus au moins profonde selon la latitude (de 200 – 400 m aux latitudes subtropicales, à 400 – 1 000 m aux latitudes subpolaires et jusqu'aux abysses aux latitudes polaires) est liée aux échanges de chaleur et d'eau douce avec l'atmosphère qui mettent en mouvement la circulation globale de l'océan.

D'après les observations disponibles, on estime que l'océan profond (moins de 2 000 m) et abyssal (moins de 4 000 m) ont accumulé de la chaleur à un taux de 22,3 +/- 23,7 TW et 10,7 +/- 3,4 TW, respectivement; principalement en raison des eaux profondes de l'océan Austral qui se sont réchauffées 10 fois plus vite que les bassins profonds de l'Atlantique Nord (Purkey et Johnson 2010; Desbruyères et al., 2016).

LE CHANGEMENT CLIMATIQUE, LE RÉCHAUFFEMENT DE L'OCÉAN ET LE DÉSÉQUILIBRE ÉNERGÉTIQUE PLANÉTAIRE

Le climat de la Terre est un système alimenté par l'énergie solaire. Au cours de l'année, environ 30 % du rayonnement solaire entrant est réfléchi et diffusé par les nuages et la surface de la Terre vers l'espace. Le reste du rayonnement solaire (environ 240 W/m²) absorbé dans le système climatique est transformé en diverses formes (chaleur interne, énergie potentielle, énergie latente, énergie cinétique et chimique), déplacé, stocké et séquestré principalement dans l'océan, mais aussi dans les composantes atmosphérique, terrestre et glaciaire du système climatique. Ensuite, il est renvoyé dans l'espace sous forme de rayonnement à ondes longues (OLR: Trenberth et Stepaniak 2003a, b; 2004). Dans un climat à l'équilibre, il existe un équilibre global entre le rayonnement absorbé par la planète et celui irradié vers l'espace. Cet équilibre détermine le bilan radiatif de la Terre (Trenberth et Stepaniak, 2003a, b). Les perturbations de ce bilan dues à des variations climatiques internes ou externes créent un déséquilibre énergétique terrestre, qui se

manifeste sous la forme d'un déséquilibre de flux radiatif au sommet de l'atmosphère et qui est façonné par plusieurs forçages climatiques.

Tout changement du système climatique de la Terre qui influe sur la quantité d'énergie entrant ou sortant du système modifie l'équilibre radiatif de la Terre et peut forcer les températures à augmenter ou à baisser. Ces influences déstabilisatrices sont appelées forçages climatiques. Les forçages climatiques naturels comprennent les changements de la luminosité du Soleil, les cycles de Milankovitch (petites variations de la forme de l'orbite de la Terre et de son axe de rotation qui se produisent sur des milliers d'années) et les grandes éruptions volcaniques qui injectent des particules réfléchissant la lumière à des altitudes aussi hautes que la stratosphère. Les forçages anthropiques comprennent la pollution par les particules (aérosols), qui absorbent et réfléchissent la lumière solaire entrante; la déforestation, qui modifie la façon dont la surface réfléchit et absorbe la lumière solaire; et la concentration croissante de dioxyde de carbone atmosphérique et autres gaz à effet de serre, qui diminue la quantité de chaleur émise de la Terre vers l'espace. Un forçage peut déclencher des rétroactions qui intensifient (rétroactions positives) ou affaiblissent (rétroactions négatives) le forçage initial. La perte de glace aux pôles, qui les rend moins réfléchissants, est un exemple de rétroaction positive. Or, les études récentes montrent que la planète est en déséquilibre énergétique – il y a plus d'énergie à l'intérieur du système climatique de celle qui est émise dans l'espace et que ce déséquilibre est de plus en plus dominé par l'influence du CO₂ et d'autres gaz à effet de serre, ce qui favorise l'accumulation de chaleur excédentaire et entraîne le réchauffement planétaire (Loeb et al., 2009; Hansen et al., 2011; Myhre et al., 2013; Abraham et al., 2013; Trenberth et al., 2014; Allan et al., 2014) (Figure 3).

Les études les plus récentes montrent que 94 % de ce déséquilibre radiatif positif se manifeste par l'augmentation (observée) du contenu en chaleur de l'océan (Abraham et al., 2013; Rhein et al., 2014; Figures 1 et 3a). Une petite proportion (quelques pour cent) de cette énergie contribue à la fonte de la glace de mer et de la glace terrestre de l'Arctique (glaciers,



Groenland) et Antarctique. Le reste contribue au réchauffement du sol et de l'atmosphère (Figure 3a); les changements dans les formes cinétiques et chimiques de l'énergie y contribuent de façon négligeable (Trenberth et Stepaniak, 2003; Trenberth et al., 2002).

Ainsi, la valeur absolue du déséquilibre radiatif terrestre représente la mesure la plus fondamentale définissant l'état du changement climatique global et elle est bien plus robuste scientifiquement en tant que telle que l'utilisation de la température de surface globale. En fait, elle est une mesure de l'énergie globale impliquée dans le changement climatique en cours, tandis que la température à la surface du globe ne mesure qu'une petite fraction de cette énergie, car c'est l'océan qui absorbe ce surplus d'énergie climatique et la retient pour la plupart en son intérieur. Par conséquence, la meilleure estimation du déséquilibre radiatif terrestre est la mesure du contenu de chaleur de l'océan, complétée par des mesures de rayonnement au sommet de l'atmosphère à partir de l'espace (Von Schuckmann et al., 2016).

LES IMPACTS D'UN OCÉAN QUI SE RÉCHAUFFE: SALINITÉ, CONTENU EN EAU DOUCE ET INTENSIFICATION DU CYCLE HYDROLOGIQUE

Parallèlement au réchauffement de l'océan, des changements cohérents de salinité ont également été observés tant pour l'océan en surface que dans les couches d'eau inférieures (Boyer et al., 2005; Hosoda et al., 2009; Durack et Wijffels, 2010; Helm et al., 2010, Mulet et al., 2018). La structure de salinité à la surface de l'océan reflète les régimes d'évaporation et de précipitation, de sorte que les régions à forte évaporation (telles que les régions de convergence atmosphérique subtropicales, où la mer Méditerranée et la mer Rouge) sont caractérisées par des valeurs de salinité plus élevées que celles des régions à forte précipitation (comme les régions tropicales et subpolaires). Les observations montrent que les différences en salinité de ces régions se creusent dues à l'intensification du cycle hydrologique terrestre

(Durack et al., 2012; Huntington et al., 2006). En fait, un climat plus chaud augmente la capacité de l'air à stocker la vapeur d'eau car celle-ci augmente avec la température selon la loi Clausius Clayperon.

La théorie admise est que lorsque la température de l'atmosphère augmente, plus d'eau s'évapore principalement au-dessus de l'océan. Il en résulte davantage de pluie qui devrait essentiellement tomber sur la terre ferme. De plus, les processus selon lesquels les nuages et les précipitations se forment dans l'atmosphère peuvent changer. Ce changement dépend largement de la quantité, de la distribution et du type d'aérosols (qui sont de petites particules dans l'atmosphère), car ceux-ci influencent directement la formation des nuages, mais ils peuvent aussi modifier les propriétés de rayonnement de l'atmosphère quand elle est libre de nuages. Les changements dans le cycle de l'eau peuvent également être causés par des changements dans les propriétés d'évaporation de la surface du sol et des plantes qui entraînent une interaction avec la capacité de stockage d'eau du sol. Si le cycle de l'eau s'intensifie, cela signifie que toutes les composantes du cycle s'amplifient, c'est-à-dire plus d'évaporation, plus de précipitations et plus de ruissellement (p. ex. Williams et al., 2007; Durack et al., 2012; Lago et al., 2016).

Malgré cette complexité, des études récentes suggèrent que le changement du cycle hydrologique est intimement lié à l'augmentation du contenu de chaleur de l'océan. Un océan plus chaud restitue à l'atmosphère plus de chaleur et de vapeur d'eau, influençant les régimes pluviométriques dans le monde entier (Held and Soden, 2006; Allan et al., 2010; Smith et al. 2010; Cubash et al., 2013; Rhein et al., 2013).

L'analyse des salinités en fonction de la profondeur révèle aussi des changements (Durack et Wijffels, 2010; Rhein et al., 2013). L'observation la plus remarquable est une augmentation systématique du contraste de salinité entre les gyres subtropicaux, plus salés, et les régions des plus hautes latitudes, en particulier de l'hémisphère sud. À l'échelle de l'océan mondial, les contrastes indiquent un transfert net d'eau douce des tropiques vers les hautes latitudes, constituant la signature d'une intensification du cycle hydrologique. Pour

l'Atlantique nord, le bilan quantitatif du stockage de la chaleur et du flux d'eau douce au cours des 50 dernières années est cohérent avec un réchauffement qui augmente la teneur en eau de l'atmosphère, conduisant à une intensification du cycle hydrologique (Durack *et al.*, 2012).

Comme pour l'augmentation du contenu de chaleur dans l'océan profond, les anomalies de salinité se propagent au sein de l'océan avec la circulation océanique globale. Le signal le plus important observé est une augmentation du contenu d'eau douce océanique dans les secteurs abyssaux et intermédiaires de l'Océan Austral (ils se sont déssalés à un rythme équivalent à un flux d'eau douce de 73 +/- 26 Gtonne/an: Purkey et Johnson, 2012; Yao *et al.*, 2017; Silvano *et al.*, 2018), tandis que le contenu en eau douce des eaux subtropicales et méditerranéennes diminue (Palmer *et al.*, 2019).

L'impact du réchauffement océanique sur le cycle hydrologique induit une rétroaction au changement climatique lui-même. La vapeur d'eau étant un gaz à effet de serre, elle contribue à accélérer le réchauffement du climat, et donc l'évaporation de l'eau.

LES IMPACTS D'UN OCÉAN QUI SE RÉCHAUFFE: NIVEAU DE LA MER

Les changements actuels du niveau de la mer résultent de différents facteurs contributifs qui découlent eux-mêmes des changements dans l'océan, l'hydrosphère terrestre, la cryosphère et la Terre solide. En effet, les changements du niveau moyen de la mer à l'échelle mondiale résultent de l'expansion thermique de l'océan (un océan plus chaud occupe plus de volume) et des changements de masse océanique dus à la perte de masse de glace des calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique, à la fonte des glaciers et aux changements du stockage des eaux terrestres (WCRP Global Sea Level Budget group, 2018). À l'échelle régionale, les tendances spatiales du niveau de la mer résultent de la superposition des "empreintes digitales" causées par différents phénomènes: changements de la densité de l'eau de mer dus aux changements de température et de salinité (effets dits "stériques"), de la charge at-

mosphérique, des déformations de la Terre solide et des changements gravitationnels dus à la redistribution des masses liées à la fonte des glaces terrestres et aux changements dans le stockage de l'eau terrestre (appelés effets "statiques"; Stammer *et al.*, 2013).

La partie du niveau de la mer liée à l'augmentation de la quantité de chaleur océanique a été estimée à 35 – 40 % de l'élévation totale du niveau de la mer qui est estimée depuis que l'on dispose de mesures par satellite à 3 mm/an (Cazenave *et al.*, 2014; 2018).

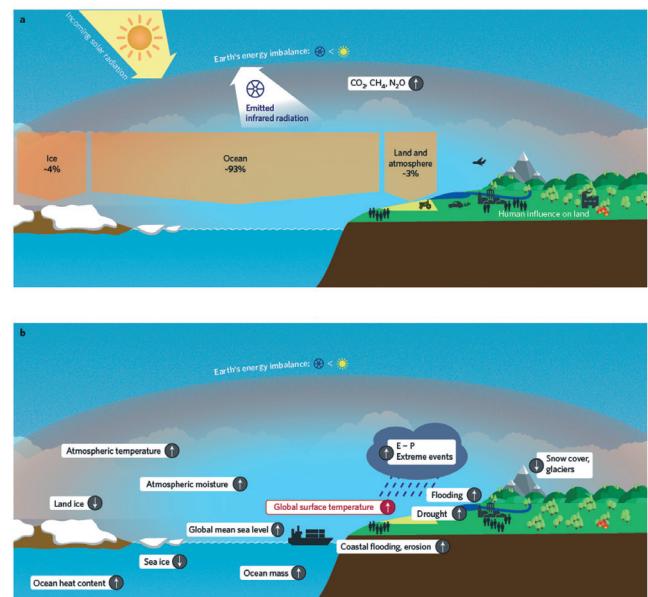


Fig.3 — Représentations schématiques du flux et du stockage de l'énergie dans le système climatique de la Terre et de ses conséquences. a) Le déséquilibre énergétique planétaire (EEI de l'Anglais Earth Energy Imbalance) comme résultat des activités humaines. L'océan mondial est le principal réservoir de chaleur, avec environ 90 % de l'EEI qui y est stocké. Le reste sert à réchauffer la terre et l'atmosphère, ainsi qu'à faire fondre la glace (comme indiqué). b) "Symptômes" reliés à un EEI positif. Ceux-ci comprennent: l'élévation de la température à la surface de la Terre, l'augmentation de la teneur en chaleur des océans, de la masse océanique, du niveau moyen global de la mer, de la température atmosphérique et de l'humidité, de la sécheresse, des inondations et de l'érosion, des phénomènes extrêmes, ainsi que de l'Évaporation – Précipitation (E – P), et une diminution des glaciers, de la banquise et de la couche de neigeuse. Adapté de von Schuckmann *et al.*, 2016.



LES IMPACTS D'UN OCÉAN QUI SE RÉCHAUFFE: DYNAMIQUE OCÉANIQUE ET TRANSPORT

Le réchauffement de l'océan modifie aussi sa dynamique et les transports de chaleur et de sel en son sein perturbant ainsi localement les échanges énergétiques avec l'atmosphère à sa surface. La circulation globale peut être aussi perturbée et affecter le climat à une échelle planétaire en diminuant significativement les transports de chaleur vers les hautes latitudes et vers l'océan profond. Le GIEC estime très probable un ralentissement de cette circulation au cours du XXI^e siècle, insuffisant néanmoins pour induire un refroidissement dans les régions de l'Atlantique nord. Cependant les observations acquises lors de la dernière décennie ne montrent pas une tendance nette mais de fortes variations à des échelles temporelles

très variées (de la semaine à la décennie: Meinen *et al.*, 2018; Frajka-Williams *et al.*, 2019). Il faudra des séries temporelles bien plus longues pour étayer tout changement de la circulation océanique. Ces changements sont importants car ils affectent aussi les variations de transport de propriétés chimiques (CO_2 , oxygène, nutriments) et biologiques (espèces planctoniques, larves de poissons).

LES IMPACTS D'UN OCÉAN QUI SE RÉCHAUFFE: IMPACT SUR LA FONTE DES CALOTTES GLACIÈRES

Le réchauffement des eaux océaniques a aussi un impact direct sur la fonte de la base des plateformes des glaciers continentaux entourant le Groenland et l'Antarctique, les deux principaux réservoirs d'eau stockée sur les continents (Jackson *et al.*, 2014; Schmidko *et al.*, 2014; Rignot *et al.*, 2014; Silvano *et al.*, 2018). Ainsi, si on savait déjà que le réchauffement climatique augmentait la fonte des glaciers, il est aujourd'hui prouvé que c'est le réchauffement des océans qui contribue de manière importante à la fonte des plateformes glaciaires qui prolongent la calotte antarctique sur l'océan. Par exemple, si on considère que l'Antarctique représente environ 60 % des réserves d'eau douce de la planète, les études révèlent que la fonte de la base de ses calottes glaciaires a représenté 55 % de la perte totale de leur masse de 2003 à 2008, soit un volume très important (Rignot *et al.*, 2014).

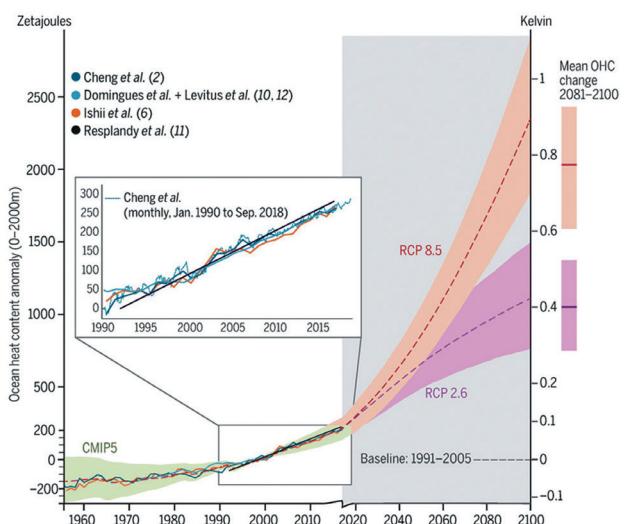


Fig.4 — Changements passés et futurs du contenu de chaleur de l'océan. Les changements annuels observés de ce contenu sont compatibles entre les différentes estimations (Cheng *et al.*, 2019; Domingues *et al.*, 2008; Levitus *et al.*, 2012; Ishii *et al.*, 2017; Resplandy *et al.*, 2018) et avec les moyennes d'ensemble des modèles simulant le système climatique terrestre utilisées dans le AR5 du GIEC (définis en tant que modèles CMIP5: GIEC, 2013). Cela pour les simulations historiques antérieures à 2005 ainsi que pour les projections de 2005 à 2017 (et qui sont désormais étayées par les observations récentes), ce qui donne confiance dans les projections futures jusqu'à 2100 (RCP2.6 et RCP8.5: GIEC, AR5, 2013).

AUTRES IMPACTS D'UN OCÉAN QUI SE RÉCHAUFFE

Le réchauffement des océans affecte également les bilans biogéochimiques de l'océan et de sa biosphère. Si la majeure partie de ces points est rappelée dans les fiches scientifiques qui accompagnent celle-ci, on peut mentionner que le réchauffement aurait également une incidence sur l'oxygénation des océans: la solubilité de l'oxygène diminue avec l'augmentation de la température de l'eau: plus l'eau est

chaude, moins il y a d'oxygène. Les conséquences sont l'asphyxie de la biodiversité marine et la limitation de son habitat (Keeling *et al.* 2010).

CONCLUSIONS

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

1. Sa capacité thermique qui est plus de 1 000 fois celle de l'atmosphère et qui lui permet de stocker l'essentiel du flux radiatif solaire et du surplus d'énergie générée par les activités humaines.
2. Il est affecté d'une dynamique beaucoup plus lente que l'atmosphère et d'une inertie thermique très grande; il est donc susceptible de mémoriser plus longtemps, à des échelles de temps compatibles avec la variabilité climatique, les perturbations (ou anomalies) qui l'affectent.
3. Malgré sa dynamique lente, son réchauffement affecte d'ores et déjà le cycle hydrologique terrestre, le niveau de la mer, la fonte des glaciers polaires, les propriétés chimiques et les écosystèmes marins (Figure 3b).
4. Des résultats récents semblent suggérer que le réchauffement océanique a un impact non négligeable sur certains événements extrêmes tels que les cyclones tropicaux (Trenberth *et al.*, 2018, Emmanuel, 2017 ; 2018) et peut être sur l'intensité des tempêtes à plus hautes latitudes.
5. Les estimations les plus récentes à partir des observations de la quantité de chaleur accumulée dans l'océan pendant ces dernières décennies (*i.e.*, 94 % du surplus d'énergie généré par les activités humaines) sont en étroit accord avec les résultats des simulations numériques des modèles du système Terre (celles utilisées dans le rapport du GIEC AR5) pendant la même période de temps (Cheng *et al.*, 2019). Ceci nous donne confiance dans les résultats des simulations numériques du climat. Or, ces modèles nous prédisent que si nous ne quittons pas la trajectoire actuelle

des émissions anthropogéniques de gaz à effet de serre (scénario 8.5 du AR5 du GIEC, le plus "pessimiste"), la quantité de chaleur capturée par l'océan croîtra de façon exponentielle (Cheng *et al.*, 2019; Figure 4) en induisant des conséquences en terme de réchauffement de la planète, événements extrêmes, fonte de la glace continentale et de mer, augmentation du niveau de la mer et un impact sur les écosystèmes marins et la disponibilité en nourriture dramatiques.

Appréhender de manière plus précise les changements de l'océan permettra d'améliorer non seulement nos connaissances, mais aussi les prévisions météorologiques, des événements extrêmes, les prévisions saisonnières et les scénarios climatiques et d'accompagner de manière efficace la société dans l'adaptation au changement climatique, accompagnement qui devient urgent et qui est désormais inévitable.

Mais cet océan est encore mal connu du fait de sa vaste étendue et de la difficulté technique intrinsèque à l'observation océanique (mesures de très grande précision à des pressions dépassant les 500 atmosphères, nécessité de se rendre *in situ* avec des navires dont le coût d'opération est très important, durées des mesures qui exigent un certain temps de réalisation avec un océan si vaste...). De plus, les mouvements de l'eau océanique sont loin d'être des fleuves tranquilles: la dynamique de l'océan est très turbulente et ses interactions avec l'atmosphère et le climat sont très complexes. Réduire ces inconnues et ces incertitudes est indispensable pour prévoir avec plus fiabilité cette évolution future du climat. Observations et mesures sont les sources irremplaçables de nos connaissances. Il faut donc améliorer la nature et la quantité des observations océaniques et mettre en place un système pérenne d'observation de grande ampleur, coordonné internationalement. Ceci est l'un des principaux objectifs que s'est donnée la communauté scientifique internationale pour la prochaine décennie en préparant la conférence décennale sur les observations océaniques OceanObs'19 (<http://www.oceanobs19.net>; Speich *et al.*, 2019).



RÉFÉRENCES

- ABLAIN M. et al., 2015 – *Improved Sea Level Record over the Satellite Altimetry Era (1993–2010). From the Climate Change Initiative Project.* Ocean Sci. 11, 67–82.
- 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. <https://doi.org/10.1002/rog.20022>.
- ALLAN R. P. et al., 2014 – *Changes in Global Net Radiative Imbalance 1985–2012.* Geophys. Res. Lett. 41, 5588–5597.
- ALLAN R.P., SODEN B.J., JOHN V.O., INGRAM W. and GOOD, P., 2010 – *Current Changes in Tropical Precipitation.* Environ. Res. Lett. 5. 025205.
- BERGER M., CAMPS A., FONT J., KERR Y., MILLER J., JOHANNESSEN J. A., BOUTIN J., DRINKWATER M. R., SKOU N., FLOURY N., RAST M., REBHAN H. and ATTEMA E., 2002 – *Measuring Ocean Salinity with Esa's Smos Mission - Advancing the Science.* ESA Bulletin, 111, 113-121. <https://hdl.handle.net/1956/867>.
- BINDOFF N.L., WILLEBRAND J., ARTALE V., CAZENAVE A., GREGORY J., GULEV S., HANAWA K., LE QUÉRE C., LEVITUS S., NOJIRI Y., SHUM C.K., TALLEY L.D. and UNNIKRISHNAN A., 2007 – *Observations: Oceanic Climate Change and Sea Level.* In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis.* Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [SOLOMON S., QIN D., MANNING M., CHEN Z., MARQUIS M., AVERYT K.B., TIGNOR M. and MILLER H.L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- BOYER T. P. and LEVITUS S. 2002 – *Harmonic Analysis of Climatological Sea Surface Salinity.* Journal of Geophysical Research, 107 (C2), 14pp. <https://doi.org/10.1029/2001JC000829>.
- BOYER T. P., DOMINGUES C. M., GOOD S. A., JOHNSON G. C., LYMAN J. M., ISHII M., GOURETSKI V., WILLIS J. K., ANTONOV J., WIJFFELS S., CHURCH J. A., COWLEY R. and BINDOF N. L., 2016 – *Sensitivity of Global Upper-Ocean Heat Content Estimates to Mapping Methods, Xbt Bias Corrections, and Baseline Climatologies.* Journal of Climate, 29 (13), 4817-4842. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0801.1>.
- CANNABY H., PALMER M. D., HOWARD T., BRICHENO L., CALVERT D., KRIJNEN J., WOOD R., TINKER J., BUNNEY C., HARLE J., SAULTER A., O'NEILL C., BELLINGHAM C. and LOWE J., 2016 – *Projected Sea Level Rise and Changes in Extreme Storm Surge and Wave Events during the 21st Century in the Region of Singapore.* Ocean Sci., 12, 613-632, <https://doi.org/10.5194/os-12-613-2016>.
- CARSON M., KÖHL A., STAMMER D. et al., 2016 – *Coastal Sea Level Changes, Observed and Projected during the 20th and 21st Century.* Climatic Change 134: 269–281.
- CAZENAVE A., DIENG H., MEYSSIGNAC B., VON SCHUCKMANN K., DECHARME B. and BERTHIER E., 2014 – *The Rate of Sea Level Rise.* Nature Climate Change, vol 4, doi:10.1038/NCLIMATE2159.
- CAZENAVE A., PALANISAMY H. and ABLAIN M., 2018 – *Contemporary Sea Level Changes from Satellite Altimetry: what Have we Learned? What Are the New Challenges?.* Advances in Space Research, 62:1639–1653, doi:10.1016/j.asr.2018.07.017.
- CHENG L., ABRAHAM J., HAUSFATHER Z. and TRENBERTH K. E., 2019 – *How Fast Are the Oceans Warming?* Science, 363, 128-129. <https://doi.org/10.1126/science.aav7619>.
- CHENG L., TRENBERTH K. E., PALMER M. D., ZHU J. and ABRAHAM J. P., 2016 – *Observed and Simulated Full-Depth Ocean Heat-Content Changes for 1970-2005.* Ocean Science, 12(4), 925–935. <https://doi.org/10.5194/os-12-925-2016>.
- CHENG L., TRENBERTH K. E., FASULLO J., BOYER T., ABRAHAM J. and ZHU J., 2017 – *Improved Estimates of Ocean Heat Content from 1960 To 2015.* Science Advances, 3 (3), 10 pp. <https://doi.org/10.1126/sciadv.e1601545>.
- CHURCH J.A. and WHITE N.J., 2011. Surv Geophys, 32: 585. <https://doi.org/10.1007/s10712-011-9119-1>.
- CHURCH, J. A., CLARK P. U., CAZENAVE A., GREGORY J. M., JEVREJAVA S., LEVERMANN A., MERRIFIELD M. A., MILNE G. A., NEREM R. S., NUNN P. D., PAYNE, A. J., PFEFFER W. T., STAMMER D. and UNNIKRISHNAN A. S., 2013 – *Sea Level Change.* In: STOCKER T. F., QIN D. and PLATTNER G.-K. et al. (eds), *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; New York, pp. 1137–1216.

- CUBASH U. et al., 2013 – *Observations : Atmosphere and Surface*. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [STOCKER T. F., QIN D., PLATTNER G.-K., TIGNOR M., ALLEN S. K., BOSCHUNG J., NAUELS A., XIA Y., BEX V. and MIDGLEY P. M. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- DE BOYER MONTEGUT C., MADEC G., FISCHER A. S., LAZAR A. and LUDICONE D., 2004 – *Mixed Layer Depth over the Global Ocean: an Examination of Profile Data and a Profile-Based Climatology*. Journal of Geophysical Research, 109 (C12), 20pp. <https://doi.org/10.1029/2004JC002378>.
- DESBRUYÈRES D. G., PURKEY S. G., MCDONAGH E. L., JOHNSON G. C. and KING B. A., 2016 – *Deep and Abyssal Ocean Warming from 35 Years of Repeat Hydrography*. Geophysical Research Letters, 43 (19), 10356-10365. <https://doi.org/10.1002/2016GL070413>.
- DOMINGUES C. M., CHURCH J. A., WHITE N. J., GLECKLER P. J., WIJFFELS S. E., BARKER P. M. and DUNN J. R., 2008 – *Improved Estimates of Upper-Ocean Warming and Multidecadal Sea-Level Rise*. Nature, 453, 1090–1093.
- DUCET N., LE TRAON P. Y. and REVERDIN G., 2000 – *Global High-Resolution Mapping of Ocean Circulation from Topex/Poseidon and Ers-1 and -2*. Journal of Geophysical Research, 105 (C8), 19477-19498. <https://doi.org/10.1029/2000JC900063>.
- DURACK P. J., 2015 – *Ocean Salinity and the Global Water Cycle*. Oceanography, 28 (1), pp 20-31. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2015.03>.
- DURACK P. J. and WIJFFELS S. E., 2010 – *Fifty-Year Trends in Global Ocean Salinities and their Relationship to Broad-Scale Warming*. J. Clim., 23, 4342–4362.
- DURACK P. J., WIJFFELS S. E. and MATEARR. J., 2012 – *Ocean Salinities Reveal Strong Global Water Cycle Intensification during 1950 to 2000*. Science, 336, 455–458.
- DURACK P. J., GLECKLER P. J., LANDERER F. W. and TAYLOR. K. E., 2014 – *Quantifying Underestimates of Long-Term Upper-Ocean Warming*. Nature Climate Change; DOI: 10.1038/nclimate2389.
- DURACK P. J., GLECKLER P. J., PURKEY S. G., JOHNSON G. C., LYMAN J. M. and BOYER T. P., 2018 – *Ocean Warming: from the Surface to the Deep in Observations and Models*. Oceanography 31 (2), pp 41–51. doi: <https://doi.org/10.5670/oceanog.2018.227>.
- EMANUEL K., 2018 – *100 Years of Progress in Tropical Cyclone Research*. Meteorological Monographs, 59, 15.11-15.68, doi:10.1175/amsmonographs-d-18-0016.1.
- EMANUEL K., 2017 – *Will Global Warming Make Hurricane Forecasting More Difficult?* Bull. Amer. Meteor. Soc., 98, 495-501.
- FORE A. G., YUEH S. H., TANG W., STILES B. W. and HAYASHI A. K.; 2016 – *Combined Active/Passive Retrievals of Ocean Vector Wind and Sea Surface Salinity with Smap*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 54 (12), 7396-7404. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2601486>.
- FOURNIER S., LEE T. and GIERACH M. M., 2016 – *Seasonal and Interannual Variations of Sea Surface Salinity Associated with the Mississippi River Plume Observed by Smos and Aquarius*. Remote Sensing of Environment, 180, 431-439. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.050>.
- FRAJKA-WILLIAMS et al., 2019 – *Atlantic Meridional Overturning Circulation: Observed Transport and Variability*. Frontiers in Marine Sciences. Frontiers of Marine Sciences, in press.
- GIEC/IPCC 5th Assessment Report (AR5), 2013 – *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [STOCKER T.F., QIN D., PLATTNER G.-K., TIGNOR M., ALLEN S.K., BOSCHUNG J., NAUELS A., XIA Y., BEX V. and MIDGLEY P.M. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, doi:10.1017/CBO9781107415324.
- GIEC/IPCC, 4th Assessment Report (AR4), 2007 – *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [SOLOMON S., QIN D., MANNING M., CHEN Z., MARQUIS M., AVERYT K.B., TIGNOR M. and MILLER H.L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- GLECKLER P. J., DURACK P. J., STOUFFER R. J., JOHNSON G. C. and FOREST C. E., 2016 – *Industrial-Era Global Ocean Heat Uptake Doubles in Recent Decades*. Nature Climate Change, 6 (4), 394-398. <https://doi.org/10.1038/nclimate2915>



- GLEICK P. H., 1996 – *Water Resources*. In: Encyclopedia of Climate and Weather. Ed. by S. H. Schneider, Oxford University Press, New York, vol. 2, pp.817-823.
- GRAY A. R. and RISER S. C., 2014 – *A Global Analysis of Sverdrup Balance Using Absolute Geostrophic Velocities from Argo*. Journal of Physical Oceanography, 44(4), 1213–1229. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-12-0206.1>.
- GUINEHUT S., DHOMPS A.-L., LARNICOL G. and LE TRAON P.-Y., 2012 – *High Resolution 3D Temperature and Salinity Fields Derived from in situ and Satellite Observations*. Ocean Sci. 8, 845–857. <http://dx.doi.org/10.5194/os-8-845-2012>.
- HANSEN J., SATO M., KHARECHA P. and VON SCHUCKMANN K., 2011 – *Earth's Energy Imbalance and Implications*. Atmos. Chem. Phys. 11, 13421–13449.
- HELD I.M. and SODEN B.J., 2000 – *Water Vapor Feedback and Global Warming*. Annu. Rev. Energy Environ. 25, 441–475.
- HUNTINGTON T.G., 2006 – *Evidence for Intensification of the Global Water Cycle: Review and Synthesis*. Journal of Hydrology, 319, 83-95. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.07.003>.
- ISHII M. and KIMOTO M., 2009 – *Reevaluation of Historical Ocean Heat Content Variations with Time-Varying Xbt and Mbt Depth Bias Corrections*. Journal of Oceanography, 65 (3), 287–299. <https://doi.org/10.1007/s10872-009-0027-7>.
- JACKSON R., STRANEO F. and SUTHERLAND D., 2014 – *Externally Forced Fluctuations in Ocean Temperature at Greenland Glaciers in Non-Summer Months*. Nature Geoscience, 7, 503-508.
- KEELING R. F., KORTZINGER A. and GRUBER N., 2010 – *Ocean Deoxygenation in a Warming World*. Annu. Rev. Mar. Sci., 2, 199–229.
- LAGERLOEF G., COLOMB F. R., LE VINE D., WENTZ F., YUEH S., RUF C., LILLY J., GUNN J., CHAO Y., DECHARON A., FELDMAN G. and SWIFT C., 2008 – *The Aquarius/SAC-D Mission: Designed to Meet the Salinity Remote-Sensing Challenge*. Oceanography, 21 (1), 68-81. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2008.68>.
- LE QUÉRÉ et al., 2018 – *Global Carbon Budget 2018*. Earth Syst. Sci. Data, 10, 2141-2194, doi:10.5194/essd-10-2141-2018.
- LE TRAON P. Y., NADAL F. and DUCET N., 1998 – *An Improved Mapping Method of Multisatellite Altimeter Data*. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 15 (2), 522-534. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1998\)015<0522:AIMMOM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1998)015<0522:AIMMOM>2.0.CO;2).
- LAGO V., WIJFFELS S. E., DURACK P. J., CHURCH J. A., BINDOFF N. L. and MARSLAND S. J., 2016 – *Simulating the Role of Surface Forcing on Observed Multidecadal Upper-Ocean Salinity Changes*. Journal of Climate, 29 (15), 5575-5588. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0519.1>
- LEVITUS S., 1986 – *Annual Cycle of Salinity and Salt Storage in the World Ocean*. Journal of Physical Oceanography, 16 (2), 322-343. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1986\)016<0322:ACOSAS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1986)016<0322:ACOSAS>2.0.CO;2)
- LEVITUS S., 1989 – *Interpentadal Variability of Temperature and Salinity at Intermediate Depths of the North Atlantic Ocean, 1970-74 Versus 1955-1959*. Journal of Geophysical Research, 94 (C5), 6091-6131. <https://doi.org/10.1029/JC094iC05p06091>.
- LEVITUS S., ANTONOV J. I., BOYER T. P. and STEPHENS C., 2000 – *Warming of the World Ocean*. Science, 287 (5461), 2225-2229. <https://doi.org/10.1126/science.287.5461.2225>.
- LEVITUS S., ANTONOV J. I., WANG J., DELWORTH T. L., DIXON K. W. and BROCCOLI A. J., 2001 – *Anthropogenic Warming of the Earth's Climate System*. Science, 292 (5515), 267-270. <https://doi.org/10.1126/science.1058154>.
- LEVITUS S., ANTONOV J. I., BOYER T. P., LOCARNINI R. A., GARCIA H. E. and MISHONOV A. V., 2009 – *Global Ocean Heat Content 1955–2008 in Light of Recently Revealed Instrumentation Problems*. Geophys. Res. Lett., 36, 5.
- LEVITUS S., et al., 2012 – *World Ocean Heat Content and Thermosteric Sea Level Change (0–2000 M), 1955–2010*. Geophys. Res. Lett., 39, L10603, doi:10.1029/2012GL051106.
- LOEB N. G. et al., 2009 – *Towards Optimal Closure of the Earth's Top-Of-Atmosphere Radiation Budget*. J. Clim. 22, 748–766.
- MCCONAGHY D. C., 1980 – *Measuring Sea Surface Temperature from Satellites: a Ground Truth Approach*. Remote Sensing of Environment, 10 (4), 307-310. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(80\)90090-5](https://doi.org/10.1016/0034-4257(80)90090-5).
- MEINEN C. S., SPEICH S., PIOLA A. R., ANSORGE I., CAMPOS E., KERSALÉ M., TERRE T., CHIDICHIMO M. P., LAMONT T., SATO O., PEREZ R., VALLA D., VAN DEN BERG M., LE HÉNAFF M., DONG S. and GARZOLI S., 2018 – *Baroclinic and Barotropic Flows and the Dueling Influence of the Boundaries*. Geophys. Res. Lett., DOI: 10.1029/2018GL077408.
- MYHRE G. et al., 2013 – *Radiative Forcing of the Direct Aerosol Effect from Aerocom Phase II Simulations*. Atmos. Chem.

Phys.13, 1853–1877.

- NEREM R. S., CHAMBERS D. P., CHOE C. and MITCHUM G. T. – *Estimating Mean Sea Level Change Topex*.
- PALMER M. D., HAINES K., TETT S. F. B. and ANSELL T. J., 2007 – *Isolating the Signal of Ocean Global Warming*. Geophys. Res. Lett., 34, 6.
- PALMER M. D., MCNEALL D. J. and DUNSTONE N. J., 2011 – *Importance of the Deep Ocean for Estimating Decadal Changes in Earth's Radiation Balance*. Geophysical Research Letters, 38(13). <https://doi.org/10.1029/2011GL047835>.
- PALMER M. D. and MCNEALL D. J., 2014 – *Internal Variability of Earth's Energy Budget Simulated by Cmip5 Climate Models*. Environmental Research Letters, 9(3), 34016. Retrieved from <http://stacks.iop.org/1748-9326/9/i=3/a=034016>.
- PALMER M.D., ROBERTS C.D., BALMASEDA M. et al., 2017 – *Ocean Heat Content Variability and Change in an Ensemble of Ocean Reanalyses*. Clim Dyn , 49: 909. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2801-0>.
- PALMER M.D., DURACK P. J., CHIDICHIMO M.P., CHURCH J., CRAVATTE S., HILL K., JOHANNESSEN J., KARSTENSEN J., LEET T., LEGLER D., MAZLOFF M., OKA E., PURKEY S., RABE B., SALLÉE J.-B., SLOYAN B., SPEICH S., VON SCHUCKMANN K., WILLIS J. and WIJFFELS S., 2019 – *Adequacy of the Ocean Observation System for Quantifying Regional Heat and Freshwater Storage and Change*. Frontiers in Marine Sciences.
- PAWLOWICZ R., FEISTEL R., MCDOUGALL T. J., RIDOUT P., SEITZ S. and WOLF H., 2016 – *Metrological Challenges for Measurements of Key Climatological Observables. Part 2: Oceanic Salinity*. Metrologia, 53 (1), R12-R25. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/53/1/R12>.
- PURKEY S. G. and JOHNSON G. C., 2010 – *Warming of Global Abyssal and Deep Southern Ocean Waters between the 1990s and 2000s: Contributions to Global Heat and Sea Level Rise Budgets*. J. Clim., 23, 6336–6351.
- PURKEY S.G. and JOHNSON G.C., 2012 – *Global Contraction of Antarctic Bottom Water between the 1980s and 2000s*. J. Climate, 25, 5830–5844, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00612.1>.
- RESPLANDY L., KEELING R.F., EDDEBBAR Y., BROOKS M.K., WANG R., BOPP L., LONG M.C., DUNNE J.P., KOEVE W. and OSCHLIES A., 2018 – *Quantification of Ocean Heat Uptake from Changes in Atmospheric O₂ and CO₂ Composition*. Nature 563, 105–108. doi.org/10.1038/s41586-018-.
- REYNOLDS R. W., SMITH T.M., LIU C., CHELTON D.B., CASEY K. and SCHLAX M.G., 2007 – *Daily High-Resolution-Blended Analyses for Sea Surface Temperature*. J. Clim., 20, 5473–5496.
- 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., QIN D., PLATTNER G.-K., TIGNOR M., ALLEN S.K., BOSCHUNG J., NAUELS A., XIA Y., BEX V. and MIDGLEY P.M. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- RIGNOT E., MOUGINOT J., MORLIGHEM M., SEROUSSI H. and SCHEUCHL B., 2014 – *Widespread, Rapid Grounding Line Retreat of Pine Island, Thwaites, Smith, and Kohler Glaciers, West Antarctica, from 1992 To 2011*. Geophys. Res. Lett., 41, 3502–3509, doi:10.1002/2014GL060140.
- RISER S. C., FREELAND H. J., ROEMMICH D., WIJFFELS S., TROISI A., BELBÉOCH M. and JAYNE S. R., 2016 – *Fifteen Years of Ocean Observations with the Global Argo Array*. Nature Climate Change, 6(2), 145–153. <https://doi.org/10.1038/nclimate2872>.
- ROEMMICH D., GOULD J. W. and GILSON J., 2012 – *135 Years of Global Ocean Warming between the Challenger Expedition and the Argo Programme*. Nature Climate Change, 2, 425. Retrieved from <http://doi.org/10.1038/nclimate1461>.
- ROEMMICH D., CHURCH J., GILSON J., MONSELESAN D., SUTTON P. and WIJFFELS S., 2015 – *Unabated Planetary Warming and its Ocean Structure since 2006*. Nat. Clim. Change, 5(3), 240–245, doi:10.1038/nclimate2513.
- ROSE B.E.J. and RAYBORN L., 2016 – *The Effects of Ocean Heat Uptake on Transient Climate Sensitivity*. Curr Clim Change Rep., 2: 190. <https://doi.org/10.1007/s40641-016-0048-4>.
- ROSE B. E., ARMOUR K. C., BATTISTI D. S., FELDL N. and KOLL D. D., 2014 – *The Dependence of Transient Climate Sensitivity and Radiative Feedbacks on the Spatial Pattern of Ocean Heat Uptake*. Geophysical Research Letters, 41 (3), 1071–1078.
- SCHMIDTKO S., HEYWOOD K. J., THOMPSON A. F. and AOKI S., 2017 – *Multidecadal Warming of Antarctic Waters*. Science 5, December 2014: 1227-1231. [DOI:10.1126/science.1256117].



- SILVANO A., RINTOUL S. R., PEÑA-MOLINO B., HOBBS W. R., VAN WIJK E., AOKI S., TAMURA T. and WILLIAMS G. D., 2018 – *Freshening by Glacial Meltwater Enhances Melting of Ice Shelves and Reduces Formation of Antarctic Bottom Water*. Science Advances, 4, 4, eaap9467, DOI: 10.1126/sciadv.aap9467.
- SLANGEN A. B. A., CHURCH J. A., ZHANG X. and MONSELESAN D., 2014 – *Detection and Attribution of Global Mean Thermoeric Sea Level Change*. Geophys. Res. Lett., 41, 5951–5959, doi:<https://doi.org/10.1002/2014GL061356>.
- SLOYAN et al., 2019 – *The Global Ocean Ship-Based Hydrographic Investigations Program (Go-Ship): a Platform for Integrated Multidisciplinary Ocean Science*. Frontiers in Marine Sciences, in press.
- SMITH N.V., SAATCHI S.S. and RANDERSON J.T., 2004 – *Trends in High Northern Latitude Soil Freeze and Thaw Cycles from 1988 to 2002*. J. Geophys. Res. 109, D12101. doi:[10.1029/2003D004472](https://doi.org/10.1029/2003D004472).
- SMITH T. M., ARKIN P. A., REN L. and SHEN S. S. P., 2012 – *Improved Reconstruction of Global Precipitation since 1900*. J. Atmos. Ocean. Technol., 29, 1505–1517.
- STAMMER D., CAZENAVE A., PONTE R. M. and TAMISIEA M. E., 2013 – *Causes for Contemporary Regional Sea Level Changes*. Annual Review of Marine Science 5. S. 21-46.doi: 10.1146/annurev-marine-121211-172406.
- SYED T.H., FAMIGLIETTI J.S., et al., in press – *Satellite-Based Global-Ocean Mass Balance Estimates of Interannual Variability and Emerging Trends in Continental Freshwater Discharge*. Proceedings of the National Academy of Sciences. doi: 10.1073/pnas.1003292107.
- TRENBERTH K. E. and STEPANIAK D. P., 2003 – *Co-Variability of Components of Poleward Atmospheric Energy Transports on Seasonal and Interannual Timescales*. J. Clim. 16, 3691–3705 (2003a).
- TRENBERTH K. E. and STEPANIAK D. P., 2003 – *Seamless Poleward Atmospheric Energy Transport and Implications for the Hadley Circulation*. J. Clim. 16, 3706–3722 (2003b).
- TRENBERTH K. E., STEPANIAK D. P., 2004 – *The Flow of Energy Through the Earth's Climate System*. Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 130, 2677–2701.
- TRENBERTH K. E., STEPANIAK D. P. and CARON J. M., 2002 – *Accuracy of Atmospheric Energy Budgets from Analyses*. J. Clim. 15, 3343–3360.
- TRENBERTH K. E., FASULLO J. T. and BALMASEDA M. A., 2014 – *Earth's Energy Imbalance*. J. Clim. 27, 3129–3144.
- TRENBERTH K. E., CHENG L., FASULLO J. T. and ZHANG Y., 2018 – *Hurricane Harvey links to Ocean Heat Content and Climate Change Adaptation*. Earth's Future, EFT2427, <https://doi.org/10.1029/2018EF000825>.
- VON SCHUCKMANN K. et al., 2014 – *Monitoring Ocean Heat Content From The Current Generation Of Global Ocean Observing Systems*. Ocean Sci. 10, 547–557.
- VON SCHUCKMANN K., PALMER M. D., TRENBERTH K. E., CAZENAVE A., CHAMBERS D., CHAMPOLLION N. and WILD M., 2016 – *An Imperative to Monitor Earth's Energy Imbalance*. Nature Climate Change, 6(2), 138–144. <https://doi.org/10.1038/nclimate2876>.
- WCRP Global Sea Level Budget Group, 2018 – *Global Sea-Level Budget 1993–Present*. Earth Syst. Sci. Data, 10, 1551–1590, <https://doi.org/10.5194/essd-10-1551-2018>.
- WILLIAMS P. D., GUILYARDI E., SUTTON R., GREGORY J. and MADEC G., 2007 – *A New Feedback on Climate Change from the Hydrological Cycle*. Geophysical Research Letters, 34 (8), 5pp. <https://doi.org/10.1029/2007GL029275>.
- WILLIS J. K., CHAMBERS D. P. and NEREM R. S., 2008 – *Assessing the Globally Averaged Sea Level Budget on Seasonal to Interannual Timescales*. Journal of Geophysical Research: Oceans, 113(6). <https://doi.org/10.1029/2007JC004517>
- XIE P., BOYER T., BAYLER E., XUE Y., BYRNE D., REAGAN J., LOCARNINI R., SUN F., JOYCE R. and KUMAR A., 2014 – *An in situ-satellite Blended Analysis of Global Sea Surface Salinity*. J. Geophys. Res.-Oceans, 119 (9), 6140–6160, doi: 10.1002/2014JC010046.
- YAO W., SHI J. and ZHAO X., 2017 – *Freshening of Antarctic Intermediate Water in The South Atlantic Ocean in 2005–2014*. Ocean Sci., 13, 521–530, <https://doi.org/10.5194/os-13-521-2017>.

L'océan, pompe à carbone

Laurent Bopp*
Chris Bowler*
Lionel Guidi
Éric Karsenti
Colomban de Vargas

*auteurs principaux

L'océan contient 50 fois plus de carbone que l'atmosphère et il échange chaque année des quantités importantes de carbone avec cette dernière. Au cours des dernières décennies, l'océan a ralenti le rythme du changement climatique anthropique en absorbant près de 30 % des émissions anthropiques de dioxyde de carbone. Alors que cette absorption de carbone anthropique est le résultat de processus physico-chimiques, la biologie marine joue un rôle clé dans le cycle du carbone naturel en séquestrant de grandes quantités de carbone dans les eaux de l'océan profond. Des modifications de ces processus physiques, chimiques ou biologiques, pourraient conduire à des rétroactions dans le système climatique et ainsi accélérer ou ralentir le changement climatique en cours. Ces rétroactions entre le climat, l'océan et ses écosystèmes ont besoin d'être mieux comprises afin de pouvoir prédire de façon plus solide l'évolution des caractéristiques de l'océan du futur, et l'évolution combinée du CO₂ atmosphérique et de notre climat.

UN RÔLE MAJEUR POUR L'OCÉAN DANS L'ÉVOLUTION DU CO₂ ATMOSPHÉRIQUE

Le cycle du carbone implique toute une série de processus physiques, chimiques et biologiques, qui contribuent aux échanges de carbone entre plusieurs réservoirs du système Terre. Alors que le cycle global du carbone était à peu près équilibré avant les débuts de l'ère industrielle, le CO₂ atmosphérique a augmenté de près de 40 % au cours des 200 dernières années, passant de moins de 0,03 % à plus de 0,04 % du réservoir atmosphérique. Cette augmentation s'explique par les émissions induites par la combustion des combustibles fossiles, par la production de ciment, par la déforestation et autres changements dans l'utilisation des terres. On considère aujourd'hui qu'un changement de cette rapidité est au moins dix fois plus rapide que les chan-

gements reconstruits pour les 65 derniers millions d'années au moins (Portner *et al.*, 2014; Rhein *et al.*, 2014.).

Depuis les débuts de la période industrielle, l'océan joue un rôle primordial dans l'évolution du CO₂ atmosphérique en absorbant une part significative du CO₂ émis dans l'atmosphère par les activités anthropiques. Au cours de la dernière décennie (2008-2017), l'océan mondial a absorbé 2,4 milliards de tonnes de carbone par an, ce qui représente près de 30 % des émissions anthropiques sur cette période (LeQuéré *et al.*, 2018). Depuis 1870, la quantité de carbone absorbée par l'océan s'élève à 155 milliards de tonnes – également 30 % des émissions anthropiques sur cette période. En absorbant ce CO₂, l'océan contribue ainsi à ralentir le changement climatique anthropique induit par l'augmentation de ce gaz à effet de serre.



UN CYCLE DU CARBONE OCÉANIQUE NATUREL IMPLIQUANT PHYSIQUE ET BIOLOGIE MARINE

Mais ce carbone anthropique absorbé par l'océan s'ajoute à un réservoir naturel de carbone considérable. L'océan contient près de 40 000 milliards de tonnes de carbone, principalement sous forme de carbone inorganique dissous dans l'eau de mer. Cette quantité représente 50 fois le réservoir atmosphérique. Chaque année, l'océan échange de façon naturelle près d'une centaine de milliards de tonnes de carbone, sous forme de CO₂, avec l'atmosphère.

Ce carbone dans l'océan, en grande majorité sous forme d'ions bicarbonates (HCO₃⁻), n'est pas réparti de façon homogène. Les concentrations sont plus élevées en profondeur qu'en surface et cette inégale répartition du carbone entre surface et fond exerce un contrôle sur le CO₂ de l'atmosphère parce que seul le carbone inorganique de la couche de surface est au contact avec l'atmosphère et contribue aux échanges de CO₂ avec l'atmosphère.

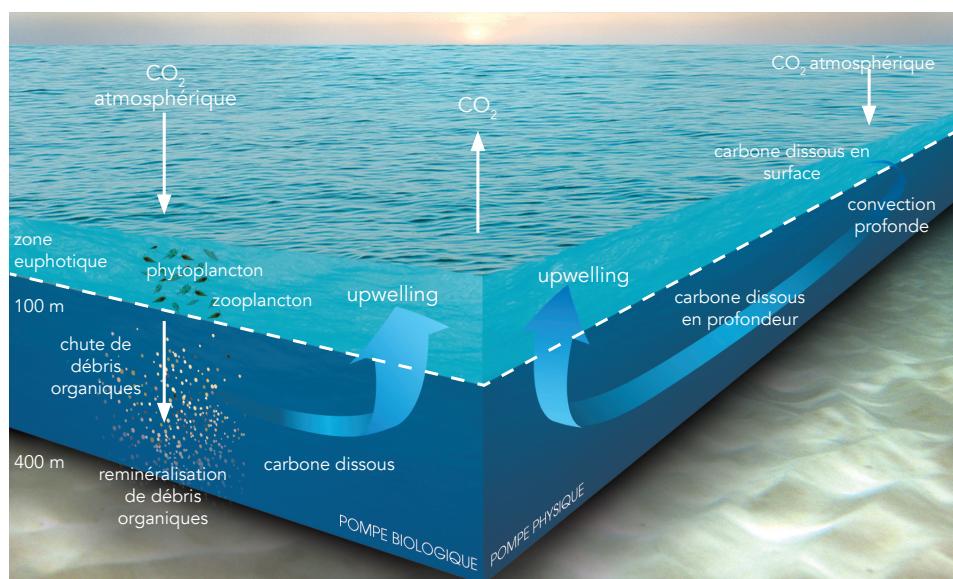
Ce gradient vertical de carbone dans l'océan s'explique à la fois par des processus physico-chimiques et des processus biologiques.

Processus biologiques

Le phytoplancton océanique vit dans la couche éclairée de l'océan et utilise l'énergie du soleil pour effectuer la photosynthèse. Ces organismes utilisent les nutriments disponibles dans l'eau de mer, ainsi que le carbone inorganique dissous, pour produire de la matière organique. La production de cette matière organique est appelée production primaire.

Elle représente la base des chaînes trophiques dans l'océan, socle à partir duquel d'autres organismes non photosynthétiques peuvent se nourrir. Cette activité photosynthétique est donc un mécanisme efficace pour extraire le CO₂ de l'atmosphère et le transférer vers les organismes vivants. Étonnamment, les organismes marins qui contribuent à la production primaire ne représentent qu'une petite fraction du carbone (~3 milliards de tonnes de carbone) dans l'océan, mais ils sont capables de générer de grandes quantités de carbone organique chaque année (près de 50 milliards de tonnes par an ou 50 PgC) pour soutenir les chaînes alimentaires, car leur taux de renouvellement est très rapide, de quelques jours à quelques semaines.

Avant d'être séquestré en profondeur, le carbone atmosphérique fixé par les organismes photosynthétiques subit une série de transformations: le phytoplancton peut être directement consommé par le zooplancton, ou indirectement par des bactéries hétérotrophes, qui seront à leur tour mangées par les plus grands organismes. Au total, seule une fraction de la matière organique ainsi produite quitte la couche de surface sous forme de particules (cellules mortes, détritus, pelotes fécales...), transférant ainsi le carbone de surface vers les couches profondes de l'océan. Chaque année, près de 10 milliards de



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

tonnes de carbone sont ainsi exportées à partir de la couche de surface et sont responsables de la plus grande partie du gradient vertical de carbone (de l'ordre de 90 %). Tous ces processus qui contribuent au rôle de la biologie marine sur le cycle du carbone dans l'Océan constituent ce que l'on appelle la pompe biologique de carbone (Figure).

Seule une toute petite fraction (~ 0,2 PgCyr/an) du carbone exporté par des processus biologiques atteint le fond des océans et peut être stockée dans du matériel sédimentaire pour des millénaires ou même bien plus (Denman *et al.*, 2007; Ciais *et al.*, 2014); ce mécanisme biologique permet de soustraire du carbone du système océan-atmosphère pour de très longues périodes de temps.

Au cours des échelles de temps géologiques, la pompe biologique de carbone a conduit à la formation de dépôts pétrolifères qui alimentent aujourd'hui notre économie. Considérant que, chaque jour, de grandes quantités de CO₂ piégées pendant des millions d'années, sont rejetées dans l'atmosphère (l'ordre de grandeur est maintenant probablement d'environ un million d'années de carbone piégé brûlé par l'humanité chaque année), il est plus aisément de comprendre la rapidité du changement climatique en cours.

Processus physico-chimiques

Une deuxième série de processus, physico-chimiques cette fois, contribue aussi à cette inégale répartition du carbone sur la verticale. Le refroidissement des eaux de surface aux hautes latitudes augmente leur capacité à dissoudre du CO₂ atmosphérique (principalement en augmentant la solubilité du gaz) tout en augmentant leur densité. Ces eaux plongent alors en profondeur, emportant avec elles le CO₂ qui sera soustrait à tout contact avec l'atmosphère, contribuant ainsi au gradient vertical de carbone océanique. On parle dans ce cas de pompe physique ou de pompe de solubilité. Mais même si les processus biologiques sont responsables de la majorité du gradient vertical du carbone naturel dans l'océan, ce sont des processus physico-chimiques qui expliquent

le puits de carbone anthropique aujourd'hui. En effet, l'excès de CO₂ dans l'atmosphère va conduire à un flux net de carbone vers l'océan à cause du déséquilibre induit entre concentration atmosphérique et concentration océanique. Puis ce CO₂ anthropique, une fois dans les eaux de surface, va être transporté par les courants marins et mélange avec les eaux de sub-surface.

UNE SATURATION DU PUITS DE CARBONE OCÉANIQUE?

Jusqu'à ce jour, et ce depuis les débuts de la période industrielle, l'océan a continué à absorber chaque année une part à peu près constante du CO₂ anthropique émis par l'Homme. Mais de nombreuses études, basées sur des considérations théoriques, conduites à partir d'observations *in situ*, d'expériences contrôlées en laboratoire, ou à partir de l'utilisation de modèles, suggèrent que plusieurs processus pourraient amoindrir ou ralentir ce puits de carbone naturel.

La première série de processus est liée à la chimie des carbonates (les échanges entre CO₂, HCO₃⁻ et CO₃²⁻) et conduit à terme à une saturation du puits océanique de carbone. En effet, la dissolution du gaz carbonique anthropique diminue le contenu océanique en ions carbonates et donc le pouvoir tampon de l'océan, ce qui augmente la proportion de CO₂ vis-à-vis des autres espèces de carbone inorganique dissous et diminue l'efficacité du puits. Ce même phénomène conduit en parallèle à ce que l'on appelle l'acidification de l'océan et pourrait avoir des conséquences potentielles sur les écosystèmes océaniques.

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



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

Là encore, plusieurs processus sont en jeu. Le réchauffement des eaux par exemple réduit le puits de carbone océanique : une augmentation de 2 ou 3 °C de la température des eaux de surface diminue la solubilité du CO₂ de quelques pour cents, et donc la capacité de l'océan à absorber le gaz carbonique. Un autre effet pourrait encore accentuer la saturation du puits. En réponse à l'augmentation des températures, les modèles climatiques prédisent un accroissement de la stratification verticale de l'océan : autrement dit, le mélange vertical qui tend à homogénéiser les eaux profondes et superficielles diminuerait. Cette stratification limitera la pénétration du CO₂ anthropique vers les profondeurs...

Quant à la pompe biologique, son devenir est difficile à prédire. Une estimation de l'effet des modifications des écosystèmes marins sur le puits océanique de carbone, même qualitative, reste encore hautement spéculative. Parce que l'activité de la pompe biologique est fortement liée à la production primaire, il est important de tenir compte des effets du changement climatique sur l'activité photosynthétique. Sur les continents, comme la concentration en CO₂ est généralement un facteur limitant de la photosynthèse, l'augmentation du CO₂ anthropique tend à stimuler la croissance des plantes (effet connu comme un effet de fertilisation du dioxyde de carbone). Cela ne semble pas être le cas dans les systèmes marins en raison des concentrations élevées de carbone inorganique dissous (CID). La photosynthèse est cependant fortement affectée par des modifications de la température de l'eau qui a considérablement augmenté au cours des 150 dernières années. En plus de la température, la lumière et la limitation par les nutriments (González-Taboada et Anadón, 2012 ; Portner et al., 2014) sont susceptibles d'affecter l'ac-

tivité photosynthétique, comme le sont l'oxygène, le pH et la salinité.

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

Enfin, il faut aussi estimer quels types d'espèces planctoniques vont dominer l'écosystème en réponse à ces modifications. Car la composition du plancton peut influer considérablement sur l'absorption du CO₂. Le cas de certaines algues phytoplanctoniques, les diatomées, est particulièrement significatif. Du fait de leur taille relativement importante par rapport aux cellules du phytoplancton (de quelques dizaines à quelques centaines de micromètres), ces cellules peuvent couler assez facilement et sont donc responsables d'une part importante du carbone exporté vers l'océan profond dans les régions productives. Or, les diatomées sont particulièrement sensibles à une diminution des concentrations en sels minéraux. D'autres cellules phytoplanctoniques, abondantes dans l'océan, mais de très petit diamètre (< 10 µm)¹, sont moins gourmandes et pourraient les remplacer. Leur taille fait qu'elles sont majoritairement recyclées dans la couche de surface, et ne participent donc que peu au stockage du carbone dans les profondeurs. Un déséquilibre du rapport diatomées/petites cellules pourrait singulièrement perturber l'intensité de la pompe biologique.

Malgré ces multiples niveaux d'incertitude, dont le plus important est la réponse du vivant au changement climatique, les différentes projections réalisées

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

avec des modèles numériques couplant système climatique et cycle du carbone, mettent tous en évidence un amoindrissement du puits océanique sous l'effet du réchauffement actuellement en cours. Sans aller jusqu'à transformer ce puits océanique en source, cette diminution affectera l'évolution du CO₂ dans l'atmosphère et, à terme, le changement climatique lui-même. Les rétroactions climat/cycle du carbone (incluant également la réponse de la biosphère terrestre au changement climatique) pourraient être responsables d'une augmentation « supplémentaire » du CO₂ atmosphérique de plusieurs dizaines de ppm² à l'horizon 2100!

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

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

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

Comme d'autres événements qui ont marqué l'histoire de notre planète dans le passé, ces change-

ments provoqués par les activités humaines affectent de manière significative le système terrestre. Notre devoir en tant qu'habitants de la planète Terre est maintenant de formuler des prévisions les plus fiables possibles des changements à venir, et de réagir de la meilleure façon possible pour limiter ces modifications et s'adapter aux modifications inévitables.

Des études ont suggéré que l'augmentation artificielle de la pompe à carbone océanique pourrait améliorer la séquestration du carbone dans l'océan, contrebalançant ainsi le changement climatique induit par le CO₂. Par exemple, la productivité primaire du phytoplancton pourrait être stimulée par l'ajout de nutriments tels que le fer dans les eaux où ce nutriment limite la productivité du phytoplancton. Il n'existe actuellement pas de consensus sur l'efficacité de ces méthodes, qui se sont limitées pour l'instant à quelques expériences de terrain. D'autres approches de géo-ingénierie, qui visent à modifier artificiellement le rayonnement solaire reçu par la Terre, en envoyant des particules dans la haute atmosphère par exemple, sont tout autant controversées, et ne sont pas capables en outre de résoudre le problème de l'acidification des océans.

Pour conclure, de la même façon que nous devrions protéger les zones forestières sur nos continents, il est essentiel de protéger le puits de carbone océanique. Cela ne peut se faire qu'en préservant les océans, la vie marine et les écosystèmes planctoniques. Pour mieux appréhender les interactions entre le climat et l'océan, il convient également de mieux comprendre le bilan du carbone de chacune des composantes du cycle du carbone, en menant de nouvelles recherches fondamentales sur le fonctionnement des pompes à carbone physiques et biologiques.

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



RÉFÉRENCES

- BOPP L., LEGENDRE L. and MONFRAY P., 2002 – *La pompe à carbone va-t-elle se gripper ?* La Recherche, 355, 48-50.
- CHARLSON R.J., LOVELOCK J.E., ANDREAE M.O. and WARREN S.G., 1987 – *Oceanic Phytoplankton, Atmospheric Sulphur, Cloud Albedo and Climate.* Nature, 326, 655-661.
- CIAIS P., SABINE C., BALA G., BOPP L., BROVKIN V., CANADELL J., CHHABRA A., DEFRIES R., GALLOWAY J., HEIMANN M., JONES C., LE QUÉRÉ C., MYNENI R. B., PIAO S. and THORNTON P., 2013 – *Carbon and Other Biogeochemical Cycles.* In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis.* Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- DENMAN K. L., BRASSEUR G., CHIDTHAISONG A., CIAIS P., COX P. M., DICKINSON R. E., HAUGLUSTAINE D., HEINZE C., HOLLAND E., JACOB D., LOHMANN U., RAMACHANDRAN S. and DA SILVA DIAS P. L., WOFSY S. C., ZHANG X., 2007 – *Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry.* In *Climate Change 2007: The Physical Science Basis.* Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- GONZÁLEZ-TABOADA F. and ANADÓN R., 2012 – *Patterns of Change in Sea Surface Temperature in the North Atlantic During the Last Three Decades : Beyond Mean Trends.* Climatic Change, 115, 419-431.
- LE QUÉRÉ C. et al., 2014 – *Global Carbon Budget.* Earth Syst. Sci. Data Discuss., 7, 521-610.
- PÖRTNER H.-O., D. KARL M., BOYD P. W., CHEUNG W. W. L., LLUCH-COTA S. E., NOJIRI Y., SCHMIDT D. N. and ZAVIALOV P.O., 2014 – *Ocean Systems.* In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects.* Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- RHEIN M., RINTOUL S. R., AOKI S., CAMPOS E., CHAMBERS D., FEELY R. A., GULEV S., JOHNSON G. C., JOSEY S. A., KOSTIANOY A., MAURITZEN C., ROEMMICH D., TALLEY L. D. and WANG F., 2013 – *Observations : Ocean.* In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis.* Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.

L'océan profond dans le contexte du changement climatique

Nadine Le Bris

Le plus large espace de la planète occupé par la vie se situe à plus de 200 m sous la surface des mers et océans, où l'obscurité est quasi totale. Ces profondeurs océaniques jouent un rôle majeur dans l'atténuation du changement climatique par la séquestration de la chaleur et du CO₂ d'origine anthropique. Au réchauffement et à l'acidification progressifs des eaux profondes qui en résultent, s'ajoute l'affaiblissement de leur ventilation qui réduit la disponibilité de l'oxygène. Enfin, les modifications de la production phytoplanctonique en surface altèrent la quantité et la qualité des ressources nutritives disponibles en profondeur. Quelles seront les conséquences engendrées par ces perturbations sur ce vaste territoire encore largement inexploré ? Les modèles posent le cadre et définissent les tendances à 50-80 ans mais peinent à donner des réponses sur le futur proche. Alors que les observations révèlent des changements plus rapides que les prédictions des modèles, l'adaptation des activités humaines est nécessaire au regard des risques potentiels. De multiples services écosystémiques sont liés aux échanges entre les écosystèmes des fonds marins et de la surface de l'océan. Ces écosystèmes jouent un rôle dans la séquestration à long terme du CO₂ et du CH₄, en piégeant ce carbone sous forme de carbonates ou de matière organique (organismes vivants, débris ou particules, composés dissous dans l'eau). L'augmentation de la température, la diminution de l'oxygène et du pH affectent la distribution des espèces et plus généralement l'ensemble du cycle des nutriments sur lequel reposent les activités économiques durables comme les pêcheries artisanales. Sans une meilleure compréhension de ces phénomènes dans l'espace et dans le temps, anticiper les effets des perturbations climatiques sur la biodiversité et les écosystèmes profonds reste très difficile, autant qu'évaluer les impacts d'activités industrielles nouvelles dont les pressions se combinent aux perturbations climatiques. Mettre en place les mesures clés de l'adaptation au changement climatique doit s'appuyer sur un effort sans précédent portant sur l'acquisition de nouvelles connaissances indispensables à l'établissement d'un cadre législatif et d'outils de gestion efficaces.



UN TAMPON THERMIQUE POUR LE CLIMAT

Couvrant près des deux tiers de la planète et représentant 98 % du volume de l'océan, les profondeurs marines apparaissent toujours comme un espace inaccessible, "à la marge". L'empreinte des activités humaines y croît pourtant très rapidement et l'océan profond se retrouve aujourd'hui au cœur d'enjeux majeurs du développement durable. On connaît les problèmes posés par les activités extractives, dont la pêche dite "profonde", l'évolution de l'exploration et de l'exploitation du pétrole et du gaz de plus en plus profond ou encore les projets d'exploitation minière dans les grands fonds, par définition "non durables". On sait moins que les canyons, monts sous-marins et autres "forêts animales" de gorgones, éponges et coraux profonds, sont essentiels au maintien de certaines d'espèces de poissons, soutiennent certaines pêcheries locales et font partie intégrante des conditions de leur durabilité. Ce que certains appellent "services écosystémiques" et cherchent à quantifier sur le plan économique, impliquent beaucoup d'autres fonctions de ces écosystèmes. À l'échelle planétaire, les eaux profondes et les fonds océaniques jouent un rôle prédominant dans l'atténuation du changement climatique, le volume des eaux profondes jouant un rôle de tampon thermique pour le climat. Près de 30 % des émissions anthropiques de CO₂ sont stockés dans les océans, dont la moitié est séquestrée à plus de 400 m de profondeur et le quart en dessous de 1000 m (Gruber *et al.* 2019). 90 % de la chaleur accumulée par effet de serre a été absorbée par l'océan. Près de la moitié de cette chaleur est stockée à plus de 700 m de profondeur (42 % du total, Abraham *et al.* 2013).

CE QUE DISENT OU NE DISENT PAS LES MODÈLES CLIMATIQUES SUR LES CHANGEMENTS EN PROFONDEUR

Les modèles climatiques décrivent, avec de plus en plus de finesse, le réchauffement et l'acidification des eaux profondes qui résultent de l'accumulation du CO₂ et de la chaleur. Ils simulent aussi le transport vers

les profondeurs de la matière organique produite en surface, dont les modèles prédisent un déclin général, ainsi que sa consommation progressive par la faune marine et par les micro-organismes au cours de la sédimentation (Bopp *et al.* 2013). Selon les scénarios d'émission de CO₂ dans l'atmosphère, les prochaines décennies devraient voir une diminution du pH, de l'oxygène et de la quantité de particules organiques exportées en profondeur pour la plupart des couches profondes de l'océan. La vitesse et l'amplitude de ces changements sont très variables selon les régions océaniques, et surtout ils se combinent aux variations naturelles des eaux marines dont le pH, la teneur en oxygène et en particules diminue plus ou moins fortement avec la profondeur. En cumulant les modifications prédictes par ces modèles, les pressions exercées sur les écosystèmes des fonds marins ont pu être comparées et leur vulnérabilité mieux évaluée (Mora *et al.* 2013, Sweetman *et al.* 2017). Ces modèles commencent même à être utilisés pour prédire et intégrer ces risques dans l'établissement des zones de protections, comme les Écosystèmes Marins Vulnérables dans lesquels la FAO limite les activités de pêche (FAO, 2019).

Les facteurs susceptibles d'avoir un impact significatif sur la biodiversité et les fonctions qu'elle assure dépendent en fait du type d'écosystème. Les scientifiques ont très tôt donné l'alerte sur la vulnérabilité des écosystèmes abritant des colonies abondantes de coraux profonds (Guinotte 2006). En l'absence de photosynthèse, les eaux profondes sont naturellement plus riches en CO₂ et plus acides que les eaux de surface. Dans de nombreuses régions, l'augmentation du CO₂ en profondeur, confirmée par les séries de mesures, place les différentes espèces de coraux profonds dont le squelette calcaire est formé d'aragonite dans des conditions corrosives. Gehlen *et al.* 2015 prédit que dans l'Atlantique nord la plupart des sommets de monts sous-marins seront touchés par ce phénomène. Les plaines abyssales, pauvres en ressources nutritives, pourraient quant à elles perdre une large part de leur macrofaune en conséquence d'une ressource nutritive plus rare liée au changement de production de phytoplancton en surface. Enfin, la diminution de l'oxygène reste sans aucun doute l'une

des menaces les plus importantes sur la biodiversité de l'océan profond et les fonctions qu'elle assure. La situation est particulièrement critique aux profondeurs intermédiaires (200-700 m), où la teneur en oxygène est déjà réduite à cause de la consommation de l'oxygène par les micro-organismes qui dégradent la matière organique. La concentration en oxygène atteint parfois des seuils au-delà desquels toute vie animale est exclue. Ces "dead zones" ou "zones mortes" où ne prolifèrent que des micro-organismes s'étendent horizontalement et s'épaissent, réduisant d'autant l'habitat de nombreuses espèces de poissons ou invertébrés (Gilly et al. 2013).

Ces estimations sont encore très incertaines pour de nombreuses régions profondes où les mesures sont trop rares pour caler les modèles. Pour autant, les observations confirment que la quantité d'oxygène dans l'océan a diminué de près de 2 % par décennie depuis 1960, et que la plus faible ventilation des eaux profondes, explique en grande partie la diminution continue de la concentration moyenne en oxygène observée au-delà de 1 000 m (Schmidtko et al. 2017). Plus important encore, l'extension des zones de minimum d'oxygène dépasse les prédictions des modèles, et la diminution de l'oxygène peut atteindre jusqu'à -4 % par décennie en périphérie de certaines zones de

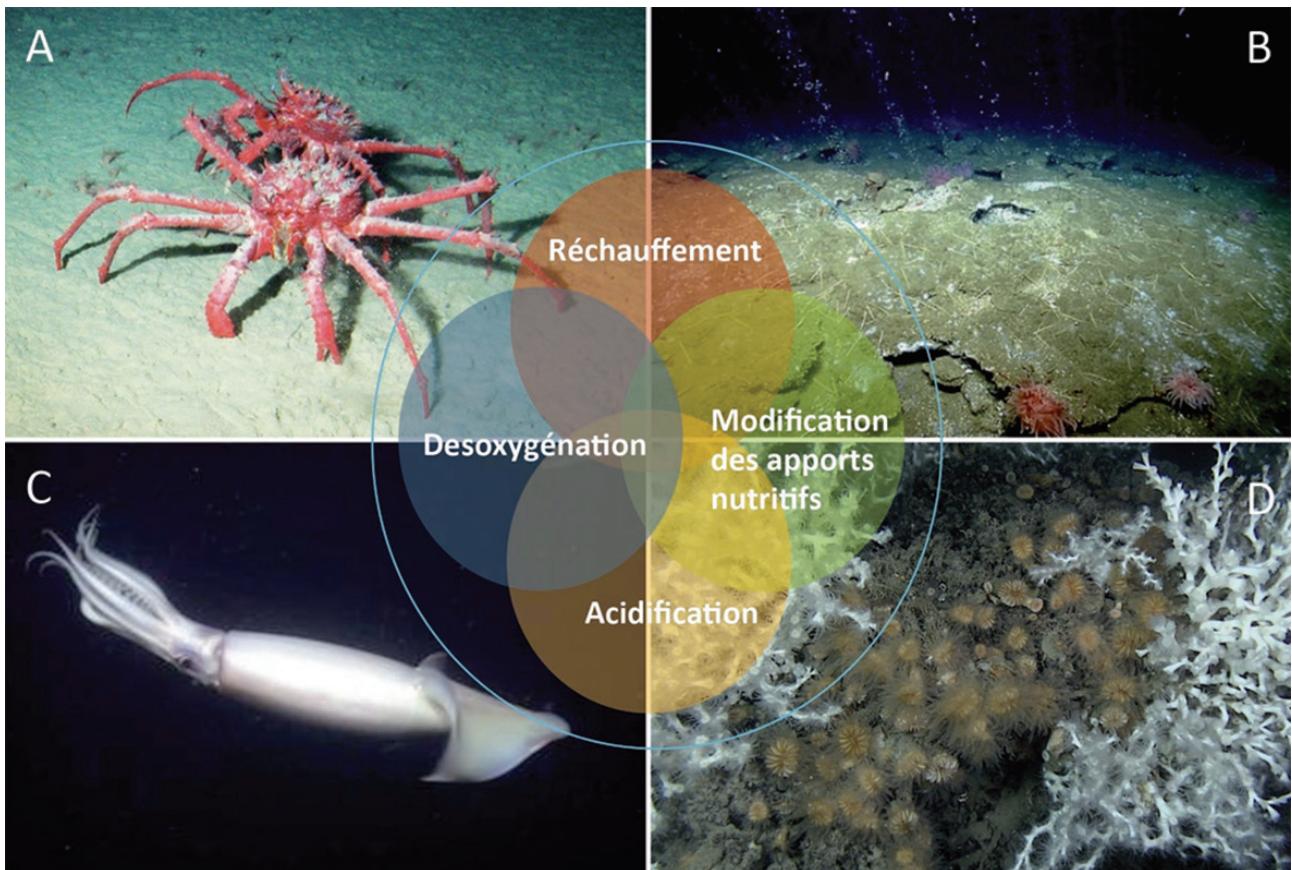


Fig. 1 — Espèces profondes exposées à différents facteurs de stress climatique, susceptibles d'induire des changements écologiques majeurs. (A) Crabe royal envahissant la marge de la péninsule Antarctique grâce au réchauffement des eaux de l'Atlantique. (B) Faune des sources de méthane dont les émissions sont accélérées par le réchauffement sur la marge de l'est Atlantique. (C) Calmar 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. Figure adaptée de Levin and Le Bris 2015.



minimum d'oxygène où des seuils critiques sont alors dépassés (Schmidtko *et al.* 2017). En conséquence, de nombreuses espèces voient leur habitat se réduire, comme certaines espèces du zooplancton qui migrent de la surface au profondeur au cours de la journée ou les grands poissons pélagiques qui peuvent plonger à plusieurs centaines de mètres pour se nourrir mais ont de forts besoins en oxygène pour se déplacer (Stramma *et al.* 2010, Gilly *et al.* 2013). D'autres, comme le calmar de Humboldt qui chasse ses proies à la frange des eaux hypoxiques y a largement gagné.

En fait, les changements qui se produisent en surface, physiques, chimiques ou biologiques, peuvent se propager vers les profondeurs plus rapidement que ne le laisse supposer la circulation des grandes masses d'eau océanique sur laquelle se basent les modèles climatiques. Les écosystèmes des profondeurs océaniques sont étroitement liés à ce qui se passe en surface. La sédimentation de particules (la neige marine), les dépôts massifs d'organismes de grande taille (salpes), les migrations journalières ou saisonnières du necton (poissons, crustacés et invertébrés capables de nager), les tourbillons ou encore les plongées d'eaux de surface vers les abysses sous l'influence des vents sont autant de phénomènes épisodiques qui répercutent directement en profondeur les perturbations des écosystèmes de surface.

Le relief du fond joue aussi un rôle dans cette propagation mais souvent à l'échelle du kilomètre, une résolution trop fine pour être prise en compte dans les modèles climatiques. En favorisant localement le mélange vertical des masses d'eau, les remontées d'eau profondes riches en nutriments, l'accélération des courants, le transport des sédiments vers les abysses, les monts sous-marins, canyons, vallées et failles des dorsales océaniques créent une mosaïque d'habitats rocheux et sédimentaires dont les communautés biologiques sont dépendantes entre elles et avec celles de la colonne d'eau. Au relief des fonds, il faut ajouter les multiples structures hydrologiques qui favorisent les échanges sur différentes gammes de profondeur tels les fronts, tourbillons, upwelling, convections profondes et cascades d'eaux denses. Toutes ces interactions dynamiques sont influencées

par de multiples facteurs liés au climat et qui rendent la démarche scientifique particulièrement complexe quand il s'agit de comprendre ce qui se passera localement. Et ce d'autant plus que moins de 10 % du plancher océanique a fait l'objet d'une cartographie bathymétrique détaillée, c'est-à-dire impliquant une description fine de son relief avec une résolution inférieure à 100 m représentative des habitats profonds.

POURQUOI S'EN PRÉOCCUPER DANS UN CONTEXTE DE DÉVELOPPEMENT DURABLE ?

Les fonds océaniques et les eaux profondes sont déjà affectés à des degrés divers par les activités humaines, du talus continental aux fosses les plus profondes, notamment par l'accumulation de polluants persistants et de déchets, la modification du paysage et la destruction massive d'habitats par le chalutage, les rejets miniers en mer et l'immersion de déchets toxiques. Pour autant, ces environnements sont souvent absents des discussions sur les impacts du changement climatique, de la protection de la biodiversité, ou des enjeux du développement durable. Au delà des régulations imposées à l'exploitation des ressources, cet "océan profond" mérite-t-il une attention spécifique ou son altération doit-elle être considérée comme mineure du fait qu'elle ne prive pas directement les humains d'habitat ou de nourriture ?

En 1840, des chercheurs avaient décreté que la vie elle-même disparaissait au-delà de 550 m, l'absence de nourriture fraîchement produite par les micro-algues planctoniques ne permettant pas aux espèces marines d'y survivre. L'exploration des profondeurs marines depuis les grandes explorations de la fin du XIX^e a révélé au contraire la grande diversité de ces habitats 'obscur's dont le nombre ne cesse d'augmenter avec la robotisation des méthodes d'exploration et de cartographie. Les fonds marins et les eaux profondes abritent une biodiversité exceptionnelle aussi diversifiée que la nourriture disponible en profondeur, de la neige marine pauvre en énergie, aux bactéries chimiosynthétiques capables d'exploiter les composés chimiques issus du plancher océanique, en passant par les carcasses de cétacés

et bois coulés retrouvés jusqu'aux plaines abyssales. L'inventaire des services associés à ces écosystèmes commence juste mais la richesse des innovations métaboliques des lignées profondes confrontées à des conditions environnementales extrêmes (température, acidité, stress toxiques, corrosifs ou hyperoxydants) constitue un patrimoine exceptionnel (Armstrong *et al.* 2012; Thurber *et al.* 2014).

Parmi ces services écosystémiques, la séquestration du CO₂ et du méthane (CH₄), le recyclage des nutriments, et la disponibilité d'abris et de nourriture pour les juvéniles de nombreuses espèces sont les plus cités. L'océan profond est le plus grand réservoir de carbone sur Terre. Les écosystèmes des fonds océaniques contribuent à la séquestration de ce carbone de plusieurs manières, par la transformation du méthane et du CO₂ en roches carbonatées ou par la biomasse profonde (Marlow *et al.* 2014; Trueman *et al.* 2014; James *et al.* 2016). Ce "carbone bleu" profond longtemps ignoré apparaît aujourd'hui comme une composante importante dans la séquestration du CO₂ anthropique (Boyd *et al.* 2019).

QUELLES CONNAISSANCES POUR ÉVALUER LES MENACES ET DÉFINIR DES MESURES DE PROTECTION EFFICACES ?

Sur la vulnérabilité du vivant et des écosystèmes terrestres ou marins aux facteurs de stress climatique, la recherche a déjà apporté de nombreuses réponses et mis en évidence la complexité des réponses physiologiques et capacités d'acclimatation et d'adaptation, en fonction des cycles de vie des espèces, de la possibilité de migration des populations, des aires géographiques concernées. Pour les espèces marines, la combinaison du réchauffement et d'autres facteurs de stress est un élément essentiel. Les seuils de tolérance physiologique des espèces à l'hypoxie dépendent, notamment de la température et du CO₂ (Pörtner 2010). L'adaptation à l'acidification, mise en évidence pour plusieurs espèces de coraux profonds, est cependant mise à mal par l'augmentation de la température (Lunden *et al.*, 2014; Gori *et al.*, 2016).

La combinaison des facteurs climatiques, température, acidité, oxygène et ressources nutritives, doit donc être établie à l'échelle des habitats qu'occupent actuellement ces espèces et ceux qui pourraient les abriter à l'avenir, et prendre en compte leur variabilité naturelle. La distribution spatiale des espèces profondes est fortement influencée par les transitions abruptes entre eaux pauvres en oxygène et les eaux de surface ou abyssales mieux oxygénées, le long du talus continental, sur les flancs de monts sous marins et canyons. Des changements, même mineurs des gradients de température et d'oxygène en profondeur peuvent provoquer une succession d'espèces dominantes et modifier toute la structure de l'écosystème. C'est que qui a été suggéré pour la péninsule Antarctique où le réchauffement de deux dixièmes de degré en 30 ans a permis l'invasion de l'écosystème par une espèce de crabe royal, un prédateur dont l'aire de répartition sur la marge continentale s'est ainsi étendue au détriment de nombreuses espèces (Smith *et al.* 2014).

Établir des mesures de gestion environnementale des activités industrielles, soutenir le développement d'activités économiques durables ou mettre en place des politiques de conservation d'habitats profonds dans les eaux nationales et internationales comporte de nombreuses inconnues. L'état des connaissances est aujourd'hui trop fragmentaire pour anticiper précisément les impacts du changement climatique et nécessite l'élargissement des programmes d'observation en eaux profondes sur des échelles pertinentes, tant spatiales que temporelles. Aujourd'hui compte tenu des outils utilisés, de leur coût très élevé et de la nécessité d'expertises techniques pointues partagées par trop peu de pays, cette cartographie des risques est hors de portée. Les « hotspots » de biodiversité et de productivité sur les fonds océaniques sont formés pour la plupart d'assemblages de quelques dizaines de mètres à quelques kilomètres de maille. La plupart des écosystèmes profonds sont soumis à des phénomènes saisonniers et des phénomènes épisodiques qui déterminent leur bon fonctionnement comme les apports de nourriture ou la ventilation des eaux profondes (Danovaro *et al.*, 2004; Smith *et al.*, 2012; Soltwedel *et al.*, 2016). À l'heure actuelle,



les connaissances manquent pour mieux comprendre comment ces événements intermittents influent sur les interactions des espèces entre elles et avec leur milieu. On manque notamment d'études écologiques suffisamment longues (plusieurs décennies) pour les écosystèmes les plus vulnérables qui font face aux pressions cumulées de l'exploitation et des changements liés au climat (Smith *et al.*, 2013). Construire des scénarios de vulnérabilité réalistes et les intégrer à la définition de politiques publiques marines est un défi à relever pour répondre aux enjeux

du développement durable et évaluer efficacement les impacts des activités humaines à grande échelle sur les espaces marins profonds. Les nouvelles régulations internationales (par exemple pour l'extraction minière) et les traités (par exemple sur la biodiversité en dehors des eaux sous juridictions nationales), ainsi que la gestion environnementale et la planification spatiale devront intégrer le rôle de l'océan profond dans le climat et ses processus.

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.
- BOPPL.,RESPLANDYL.,ORRJ.C.,DONEYS.C.,DUNNEJ.P.,GEHLENM.,HALLORANP.,HEINZEC.,ILYINA T., SEFERIAN R. and TJIPUTRA J., 2013 – *Multiple Stressors of Ocean Ecosystems in the 21st Century : Projections with Cmip5 Models*. Biogeosciences, 10, 6225 – 6245. doi :10.5194/bg1062252013.
- BOYD, P.W., CLAUSTRE, H., LEVY, M., SIEGEL, D.A. and WEBER T., 2019 – *Multi-Faceted Particle Pumps Drive Carbon Sequestration in the Ocean*. Nature 568, 327–335.
- 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.
- 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*. Annual Review of Marine Science 5, 393–420. doi:10.1146/annurev-marine-120710-100849.
- GORI A., FERRIERPAGÈS 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 Science1.
- LEVIN L A., LE BRIS N., 2015 – *Deep Oceans under Climate Change*. Science 350:766768.
- 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.
- MENGERINK K.J., VANDOVER C.L., ARDRON J.,BAKER M., ESCOBAR-BRIONES E., GJERDE K., KOSLOWJ .A., RAMIREZLLODRA E., LARA-LOPEZ A., SQUIRES D., SUTTON T., SWEETMAN A.K. and LEVIN L.A., 2014 – *A Call for Deep-Ocean Stewardship*. Science 344 :696698.
- 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.

- PÖRTNER H., 2012 – *Integrating Climate-Related Stressor Effects on Marine Organisms: Unifying Principles Linking Molecule to Ecosystem-Level Changes.* Marine Ecology Progress Series 470, 273–290. <https://doi.org/10.3354/meps10123>
- 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.
- SCHMITKO S., STRAMMA L. and VISBECK M., 2017 – *Decline in Global Oceanic Oxygen Content during the Past Five Decades.* Nature 542, 335–339.
- SMITH K.L., RUHL H.A., KAHRU M., HUFFARD C.L. and SHERMAN A., 2013 – *Deep Ocean Communities Impacted by Changing Climate over 24 Y in the Abyssal Northeast.* PNAS 110 :1983841.
- 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 : 39413963.
- 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.



Les coraux et le changement climatique

Denis Allemand

QU'EST-CE QU'UN RÉCIF CORALLIEN ?

Les récifs coralliens constituent un écosystème typique de fonds marins peu profonds de la zone intertropicale (de 33° Nord et jusqu'à 30° Sud environ). L'architecture tridimensionnelle de cet écosystème est formée par l'amoncellement des squelettes calcaires d'organismes marins, les coraux constructeurs de récifs (Cnidaires, Scléractiniaires), solidifiés entre eux grâce à l'activité biologique d'organismes calcaires (macro-algues, 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 pas 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 barrière (« *barrier reefs* »): le récif frangeant devient avec le temps récif barrière suite à l'enfoncement de l'île. De ce fait, le lagon s'élargit et le récif s'éloigne de la côte jusqu'à 1 km.
- Atolls (« *atolls* »): évolution ultime du récif, lorsque l'île a complètement disparu sous la mer. Les atolls gardent la forme circulaire initiale de l'île. Il y a environ 400 atolls dans le monde.

La croissance récifale est actuellement de l'ordre de 4 kg de carbonate de calcium (CaCO₃) par m² et par an (Smith & Kinsey 1976, Mallela & Perry 2007) avec des valeurs hautes de l'ordre de 10 kg CaCO₃ par m² et par an (archipel de Chagos, Perry *et al.*, 2015), mais les valeurs varient beaucoup d'un récif à un autre et peuvent atteindre dans certains cas 35 kg CaCO₃ par m² et par an (Barnes & Chalker 1990), soit des taux de croissance verticale annuels de 1 mm à 20 cm variable selon les espèces (Tunnicliffe 1983, Dullo 2005). De nombreux facteurs influencent ces taux de croissance : lumière, température (optimale entre 22° et 29 °C),

nutriments, niveau de la mer, courants, turbidité, pH et état de saturation en carbonate de calcium de l'eau de mer (cf. pour revue Tambutté et al., 2011).

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 CO₂ et non un puits (environ 1,5 mmol CO₂/m² et par jour; Gattuso et al., 1993, cf pour revue Tambutté et al., 2011). 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 stockées par an sous la forme de CaCO₃ (Frankignoulle & Gattuso 1993).

À L'ORIGINE DU RÉCIF, LE CORAIL

Les récifs coralliens Le principal bâtisseur du récif est le corail. Autrefois appelés Zoophytes en raison de leur ressemblance avec les 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 Anthozoaires, embranchements des Cnidaires). Actuellement, 1610 espèces valides ont été dénombrées parmi les Scléractiniaires (« Word List of Scleractinia », Hoeksema & Cairns 2019, Cairns 1999), dont la moitié environ participe à la construction récifale, on les appelle alors hermatypiques. Ces coraux sont constitués de polypes de taille variable selon les espèces, constituant des unités fonctionnelles appelées colonies, qui fonctionnent comme un organisme unique, c'est pour cela que les coraux sont quelquefois appelés animaux modulaires. Chaque polype comporte une bouche entourée de tentacules. Les polypes sont reliés les uns aux autres par un ensemble de cavités, appelées cœlenteron ou cavité gastrovasculaire, parcourant le tissu corallien. L'eau de mer et les nutriments circulent dans ces cavités. Le cœlenteron remplit de nombreuses fonctions, incluant la digestion et la circulation des fluides pour la respiration et la nutrition. Les tissus sont formés de deux couches cellulaires, l'épiderme (ou ectoderme) vers l'eau de mer et le

gastroderme (ou endoderme) vers le cœlenteron séparés par une couche de matrice acellulaire, la mésogée, l'ensemble ayant une forme de sac. Les coraux possèdent un système nerveux constitué de fibres nerveuses sans formation de ganglion.

Les coraux adoptent des formes variées selon les espèces, branchues, lamellaires, encroûtantes, massives... Leur taille, chez certains coraux massifs, peut dépasser 10 m de diamètre (12 m pour le « Big Momma », un Porites géant découvert dans le National Marine Sanctuary de l'archipel des Samoa dans le Pacifique, cf. Brown et al., 2009).

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 microalgues photosynthétiques Dinoflagellées, appelées communément zooxanthelles (*Symbiodinium* sp.). Les zooxanthelles peuvent en effet transférer entre 75 et 95 % des produits de leur photosynthèse à leur hôte animal pour son métabolisme (Muscatine & Porter 1977). Les zooxanthelles sont localisées à l'intérieur des cellules du gastroderme du corail, isolées du cytoplasme animal par une membrane, appelée périsymbiotique, qui contrôle les transferts entre les deux partenaires (Furla et al., 2011). Alors que les premiers travaux n'identifiaient qu'une seule espèce panmixtique¹ de zooxanthelles, *Symbiodinium microadriaticum* (Freudenthal 1962), il est apparu grâce à l'utilisation des nouveaux outils moléculaires qu'il existerait 9 clades de zooxanthelles nommés clades A - I (Pochon & Gates 2010). Chacune d'elles présente des caractéristiques propres, suggérant qu'elles pourraient conditionner l'adaptation des coraux à un environnement donné. De nouvelles études de phylogénie moléculaire montrent aujourd'hui que ces clades correspondent en fait à des genres différents (LaJeunesse et al., 2018). Il existerait ainsi: *Symbiodinium* (clade A), *Breviolum* (clade B), *Cladocopium* (clade C), *Durusdinium*

¹ La panmixie, en génétique des populations, est le principe qui considère que les individus sont répartis de manière homogène au sein de la population et se reproduisent tous aléatoirement.



(clade D), *Effrenium* (clade E), *Fugacium* (clade F), *Gerakladium* (clade G). Tous ces genres appartiennent à la famille des Symbiodiniaceae. La diversification de ces espèces daterait de la période Jurassique (env. 160 millions d'années), correspondant à la radiation adaptative des coraux modernes. Cette radiation suit une première période d'expansion puis régression des récifs coralliens durant le Trias, il y a environ 240 millions d'années (Muscatine et al., 2005, Frankowiak et al., 2016). Cette diversification était déjà liée à une symbiose photosynthétique (Muscatine et al., 2005), peut-être avec des algues Suessiaceae, considérées comme les ancêtres des Dinoflagellés modernes, aujourd'hui exclusivement fossiles (Frankowiak et al., 2016, Janouškovec et al., 2017).

La coévolution entre l'hôte Cnidaire et ses symbiotes Dinoflagellés a façonné la biologie, la physiologie et la morphologie des deux partenaires qui ont ainsi acquis des spécificités uniques comme la capacité de l'hôte animal à absorber activement le CO₂ pour alimenter la photosynthèse de ses symbiotes, à résister à l'hyperoxyie et au stress oxydant produit par la production d'oxygène au sein de ses tissus, à absorber des composés azotés minéraux, à se protéger des rayons ultra-violets... (cf. pour revue 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. Certaines espèces de coraux symbiotiques peuvent cependant vivre avec de très faibles luminosités jusqu'à 150 mètres de profondeur constituant un écosystème corallien mésophotique. L'exploration de ces milieux commence à peine, alors qu'ils pourraient constituer 80 % de l'habitat récifal total (Weiss 2017). Ces coraux pourraient constituer une source de larves pour réensemencer les récifs de surface dégradés (Bongaerts et al., 2010).

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 (cf. pour revue Thompson et al., 2014). L'ensemble de ces

associations forme une unité fonctionnelle appelée holobionte, souvent qualifiée de super-organisme (Rohwer et al., 2002).

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

Les coraux se reproduisent classiquement de façon sexuée et possèdent un stade larvaire appelé planula qui assure la dispersion de l'espèce. Ils possèdent également de fortes capacités de reproduction asexuée par fragmentation 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, les Scléractiniaires. 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 profonds jouent donc un

rôle remarquable de refuges et aires de nurserie pour de nombreuses espèces de poissons d'intérêt commercial (Roberts *et al.*, 2009).

- Les coraux mésophotiques, appartiennent également à l'ordre des Scléractiniaires. Ils vivent entre 30 et 150 mètres et sont symbiotiques. Ils forment un continuum avec les coraux de surface (voir supra).
- 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 HOTSPOT 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 pauvres en éléments nutritifs. Les récifs coralliens existent sous des formes diverses depuis le Trias, il y a environ 240 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 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 trouvés 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 des récifs (Wilkinson 2008). 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 :

- Les services de prélèvements :
 - Alimentation : les récifs de coraux fournissent 9 à 12 % du poisson pêché dans le monde et 20 à 25 % du poisson pêché par des pays en voie de développement (Moberg & Folke 1999). Ce chiffre grimpe à



70 à 90 % dans les pays de l'Asie du Sud-Est (Garcia & de Leiva Moreno 2003). Le revenu total estimé des pêcheries récifales serait d'environ 5 milliards d'euros (Conservation International 2008). Une grande partie de ces pêches reste traditionnelle, réalisée à pieds par la population locale, principalement les femmes et les enfants qui collectent poissons, mollusques (bénitiers), crustacés (crabes et langoustes), holothuries (aussi appelée trépang ou concombre de mer)... On estime qu'un récif en bonne santé fournit annuellement entre 10 à 15 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 fertiliseurs pour les terres de culture... Les récifs des Maldives fournissent ainsi annuellement environ 20000 m³ de matériaux (Moberg & Folke 1999).

– Ressources vivantes: au-delà de la pêche pour l'alimentation, les récifs permettent également la pêche de poissons coralliens pour l'aquariologie (15 millions de poissons/an pour 2 millions d'aquariologues dans le monde), la perliculture...

- 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 (<http://www.coralgardian.org>). Un récif corallien typique pourrait ainsi absorber jusqu'à 97 % de la force d'impact d'une vague (Ferrario et al., 2014). 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 (IFRECOR 2010). 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).

- 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, la 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 64 000 emplois (Deloitte Access Economics 2017). Un hectare de corail rapporte chaque année entre 64 000 à 80 000 euros en opportunités pour le tourisme et les loisirs, selon les estimations compilées par le rapport TEEB (TEEB 2010). Le seul écotourisme rapporte 800 000 euros par an pour les Caraïbes. Environ 2,5 millions de visiteurs par an bénéficient de la zone côtière tropicale de l'Égypte, dont 23 % viennent spécifiquement pour les récifs coralliens et 33 % participent à des activités de plongée (Cesar et al., 2003, Hilmi et al., 2018a). Le tourisme récifal est particulièrement important pour l'économie des petits États insulaires en développement (PEID). Au total, plus de 100 pays et territoires bénéficient du tourisme des récifs coralliens et pour 23 d'entre eux, le tourisme lié aux récifs représente plus de 15 % de leur produit intérieur brut (PIB) (Burke et al., 2011). Le revenu total annuel issu des récifs mondiaux est estimé à environ 8 milliards d'euros (Conservation International 2008) et constitue environ 30 % des revenus issus des récifs et 9 % du tourisme côtier mondial (Spalding et al., 2017). Le tourisme récifal connaît une croissance régulière et constante d'environ 20 % par an, soit quatre fois plus rapide que le tourisme mondial (Cesar et al., 2003). Il est cependant très sensible à la santé du récif avec une diminution des revenus d'environ 20 à 30 % lorsque les récifs subissent des épisodes de blanchissement (UN Environment et al., 2018, Woodhead et al., 2019).

- 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) constituent une réserve de chimiodiversité pour les médicaments de demain (Bruckner 2002), 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, enrichissement nutritif, surpêche et 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. 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 % à 13,8 % et une perte de 50,7 % de la couverture corallienne initiale.

Parmi les événements globaux qui affectent les récifs, le premier, et le plus important à l'heure actuelle (de nature physique), est l'augmentation de la température des eaux de surface qui provoque un phénomène à grande échelle appelé blanchissement (voir

Ezzat, ce volume) 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. Réversibles 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, généralement autour de 28 °C, mais fortement dépendant des zones géographiques (Coles & Riegl 2013) et des espèces (Loya *et al.*, 2001). Au-delà des impacts directs du blanchissement sur la physiologie et la survie des coraux, une étude récente a montré que les organismes impactés par le blanchissement présentaient une reproduction réduite, rendant la résilience des récifs coralliens encore plus problématique (Hughes *et al.*, 2019).

Second événement affectant gravement la biologie corallienne, l'acidification des océans, également appelée l'autre effet du CO₂ (Doney *et al.*, 2009). Il s'agit cette fois d'une altération de nature chimique. 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 : $H_2O + CO_2 \leftrightarrow HCO_3^- + H^+$

À ce jour, le pH a diminué d'environ 0,1 unité depuis le début du siècle dernier (8,2 à 8,1) ce qui correspond à une augmentation de l'acidité des eaux d'environ 30 % (Gattuso & Hansson 2011). L'acidification affecte principalement la vitesse de calcification des coraux, et donc la croissance récifale. Cependant, il apparaît que les effets varient énormément d'une espèce à une autre d'aucun effet à plus de 50 % d'inhibition pour une même valeur d'ajout de CO₂ (Erez *et al.*, 2011). Les différences de sensibilité pourraient être dues à une capacité différentielle de l'animal à contrôler le pH de son site de calcification (Holcomb *et al.*, 2014 ; Venn *et al.*, 2013). Mais l'augmentation de CO₂ dissous provoque de nombreux autres effets



sur la physiologie corallienne, y compris une altération de l'expression des gènes (Moya *et al.*, 2012; Vidal-Dupiol *et al.*, 2013).

Malheureusement notre connaissance de la physiologie de ces organismes est trop lacunaire pour prévoir si les coraux seront capables de s'adapter aux variations rapides de l'environnement, d'autant que les effets conjoints de la diminution du pH des eaux combinés à l'augmentation de leur température semblent, d'après les premiers travaux, additifs (Reynaud *et al.*, 2003). Pour certains chercheurs, la vitesse des changements climatiques est trop rapide pour permettre une adaptation génétique à long terme des populations qui présentent des temps de demi-génération très élevés (Veron *et al.*, 2009). Cependant, des processus d'acclimatation physiologique semblent apparaître (Kenkel & Matz 2016). 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 au Palau (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). Des études récentes en laboratoire ont montré que des coraux soumis à des pH de l'ordre de 7,2 étaient capables de maintenir une croissance axiale similaire à des coraux témoins maintenus à pH 8,1. Pour ce faire, le squelette est beaucoup plus poreux (Tambutté *et al.*, 2015). Des observations sur le terrain confirment ces résultats expérimentaux (Rippe *et al.*, 2018). Une modification épigénétique de l'expression de certains gènes serait à l'origine de cette adaptation (Liew *et al.*, 2018a). Comme chez d'autres organismes, ce type de modification est transmissible

(Liew *et al.*, 2018b). Un tel mécanisme permet d'optimiser l'expression des gènes en réponse à l'évolution des conditions environnementales. Cependant, une telle adaptation peut avoir des aspects négatifs en rendant les branches de coraux plus fragiles.

La question de l'avenir des récifs coralliens reste donc suspendue à l'amélioration des connaissances scientifiques sur ces organismes qui, sous une anatomie simple, recèlent une complexité physiologique importante. N'ont-ils pas d'ailleurs un nombre de gènes similaires à celui de l'homme ? Sans être aussi pessimiste que le récent rapport du GIEC (IPCC 2018) qui prévoit que pour un réchauffement de +2°C, la quasi-totalité des récifs coralliens (99 %) serait anéantie, on peut, sans risquer de se tromper, affirmer que les récifs de 2 100 seront différents de nos récifs actuels.

LES SOLUTIONS POUR QUE LES RÉCIFS SURVIVENT AU XXI^E SIÈCLE

La communauté scientifique et le monde politique sont aujourd'hui inquiets pour l'avenir des récifs, motivant des actions internationales telles la récente déclaration sur les récifs (Coral Reef Life Declaration) lancée en 2017 à l'occasion de la conférence Our Oceans par SAS le Prince Albert II, SAR le Prince de Galles et SAR la Reine Noor de Jordanie (https://www.fpa2.org/details_actualite.php?idactu=6761&lang=en). Les deux récents ateliers organisés en Principauté de Monaco sur les solutions pour sauver les récifs (Hilmi *et al.*, 2018b, Allemand & Osborn 2019) ont conclu que la sauvegarde des récifs passera obligatoirement par la mise en place simultanée de solutions globales (réduction drastique des émissions de gaz à effet de serre) et locales. Parmi les solutions locales, ces ateliers ont permis de citer :

- Atténuation : les procédures d'atténuation visent à stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre en s'attaquant aux causes des changements climatiques, comme la réduction des émissions de dioxyde de carbone. Ces solutions, dont la plupart ne sont pas spécifiques aux récifs coralliens, incluent la restauration ou la culture de prai-

ries marines de phanérogames (herbiers marins) ou la replantation de mangroves. En effet, ces écosystèmes constituent des "puits de CO₂" particulièrement efficaces qui atténuent localement la baisse du pH due à l'acidification des océans (Fourqurean et al., 2012; Howard et al., 2017). La géo-ingénierie marine a également été proposée comme l'ajout de matériaux alcalins dans l'eau de mer (voir pour une revue Hilmi et al., 2015) ou la dispersion à la surface des eaux de biopolymères biodégradables capables de limiter la pénétration de la lumière dans l'eau.

- Protection : la création d'aires marines protégées (AMPs) a été suggérée à maintes reprises comme un moyen efficace de réduire le stress local et d'accroître la résilience au changement global (Hilmi et al., 2015). Le rôle des AMP dans l'atténuation, l'adaptation et la protection des récifs coralliens est étayé par de nombreuses études scientifiques (Ban et al., 2011; Roberts et al., 2017), mais moins de 6 % des espèces coraliennes sont effectivement protégées aujourd'hui par des AMP (c'est-à-dire moins de 10 % de leur aire de répartition, Mouillot et al., 2016). D'autre part, les AMP n'offrent pas une protection pleinement efficace contre le changement global, puisque le nord-ouest de la Grande Barrière de Corail, protégé et loin de tout impact anthropique direct, a subi un phénomène de blanchissement significatif (90 %) en 2015-2016 (Hughes et al., 2017). Une solution serait cependant de favoriser la protection des zones "refuges" où les coraux sont plus résistants que dans les zones normales, comme le golfe Persique (Coles & Riegl 2013, Howells et al., 2016) ou la mer Rouge (Fine et al., 2013, 2019, Osman et al., 2017) ou la zone mésophotique entre 30 et 150 m (Bongaerts et al., 2010). La création d'un conservatoire mondial du corail afin de préserver les espèces de coraux pour une éventuelle opération de restauration de récifs ou à des fins scientifiques a également été proposée (Zoccola D., comm. pers.), ainsi que le développement de la recherche scientifique sur la résistance des coraux (Conservation Physiology, voir Wikelski et Cooke 2006). Le conservatoire des coraux pourrait également aider à la sélec-

tion de souches résistantes par la méthode de l'évolution assistée (van Oppen et al., 2015) et la reproduction artificielle (West & Salm 2003).

- Adaptation : parmi les solutions d'adaptation disponibles pour les zones récifales, la promotion d'économies "bleues" (tourisme, pêche, agriculture) qui incarnent les principes de durabilité est essentielle. Dans de nombreuses régions, la réduction de la pression touristique sur les récifs, soit en réglementant les plongées (Hasler & Ott 2008), soit en créant des récifs artificiels qui pourraient être visités en premier par les plongeurs amateurs (Kotb 2016) peut également être bénéfique. La création du Musée d'art sous-marin (MUSA) à Cancún (Mexique), inauguré en 2010 avec 450 sculptures sous-marines, va dans le bon sens, de même que l'utilisation de bouées de mouillage écologiques (ICRI 2017).
- Réparation : la dernière catégorie concerne la « réparation » et la restauration des écosystèmes récifaux dégradés. Cela peut se faire en utilisant des colonies prélevées dans des zones "refuges" comme le golfe Persique (voir ci-dessus, Coles & Riegl, 2013) ou à partir: i) d'un dépôt de coraux vivants ex situ utilisant des fragments de coraux produits asexuellement (Conservatoire Mondial du Corail) (Rinkevich 2005, Leal et al., 2014; Allemand 2014), ii) en utilisant des juvéniles obtenus par reproduction sexuée (Nakamura et al., 2011), iii) par culture *in situ* (Kotb 2016; Rinkevich 2005, 2014).

Au cours de leur culture, les souches de corail résistantes pourraient être "sélectionnées" par un processus d'"évolution assistée" (van Oppen et al., 2015). Ces auteurs proposent de "faire évoluer" les coraux vers une plus grande résilience. Pour cela, ils proposent quatre options: la première visait à favoriser la résistance en l'induisant artificiellement par le stress de laboratoire et en ne conservant que les colonies qui survivent (acclimatation de pré-conditionnement). Un tel processus est médié par des mécanismes épigénétiques (cf. supra). La deuxième option suggère de modifier activement le microbiote associé au corail pour sélectionner la communauté la plus avantageuse (Peixoto et al., 2017). La troisième



méthode suggère de procéder à une sélection sélective pour générer des phénotypes résistants. Enfin, la dernière option consiste à faire évoluer artificiellement la composante algale de l'holobionte corallien par mutation et sélection génétique des zooxanthelles et inoculer des souches résistantes de zooxanthelles au corail (Hume et al., 2015). Les coraux peuvent ensuite être transplantés sur le terrain ou au sein de récifs artificiels. La « Reef Ball Foundation », un organisme à but non lucratif, a élaboré des protocoles spécifiques pour le déploiement, l'ancrage et la transplantation des coraux. Biorock est une méthode brevetée qui utilise des dépôts électrolytiques de carbonate de calcium pour construire des structures artificielles (Goreau & Hilbertz 2005). L'ONG française Coral Guardian développe des programmes de restauration des récifs en impliquant étroitement les populations locales : tout en réduisant les coûts, ces programmes contribuent à améliorer l'implication des communautés locales dans l'accélération des mécanismes de développement durable afin d'améliorer leurs moyens d'existence.

Les récifs coralliens jouent un rôle écologique et socio-économique majeur. C'est pourtant aujourd'hui l'un des écosystèmes les plus menacés au monde. Le développement de méthodologies originales, économiques, techniques ou politiques, est donc non seulement nécessaire pour sauver cet écosystème iconique, mais constituera aussi un modèle d'action applicable à d'autres écosystèmes. Il est vital que ces méthodologies s'appuient sur la recherche scientifique qui doit être développée, à la fois dans les laboratoires ou sur le terrain. L'expédition Tara Pacific (<https://oceans.taraexpeditions.org/m/qui-est-tara/les-expeditions/tara-pacific/>) est en cela exemplaire et devrait permettre non seulement de mieux connaître les récifs du Pacifique, mais aussi de proposer des solutions pratiques pour augmenter leur résilience pour assurer leur survie.

RÉFÉRENCES

- ALLEMAND D., 2014 – Centre Scientifique de Monaco Moves to the Harbour - 20 Tonnes of Seawater on a Roof! *Reef Encounter* 29(2) : 12-13.
- ALLEMAND D. and OSBORN D., 2019 – *Ocean Acidification Impacts in Coral Reefs: From Sciences to Solutions*. *Regional Studies in Marine Science*. 28 : 100558.
- ALLEMAND D., TAMBUTTÉ É., ZOCCOLA D. and TAMBUTTÉ S., 2011 – *Coral Calcification, Cells to Reefs*. In: DUBINSKY Z. and STAMBLER N. (eds.) – *Coral Reefs: an Ecosystem in Transition*. Springer Netherlands. pp. 119-150.
- BAN N.C., ADAMS V.M., ALMANY G.R., BAN S., CINNER J.E., MCCOOK L.J., MILLS M., PRESSEY R.L. and WHITE A., 2011 – *Designing, Implementing and Managing Marine Protected Areas: Emerging Trends and Opportunities for Coral Reef Nations*. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 408 (1-2): 21-31.
- BARNES D.J. and CHALKER B.E., 1990 – *Calcification and Photosynthesis in Reef-Building Corals and Algae*. In: DUBINSKY Z. (ed) – *Coral Reefs*. Amsterdam: Elsevier. pp. 109-131.
- BONGAERTS P., RIDGWAY T., SAMPAYO E. M. and HOEGH-GULDBERG O., 2010 – Assessing the "Deep Reef Refugia" Hypothesis: Focus on Caribbean Reefs. *Coral Reefs* 29(2) : 309-327.
- BROWN D.P., BASCH L., BARSHIS D., FORSMAN Z., FENNER D. and GOLDBERG J., 2009 – *American Samoa's Island of Giants: Massive Porites Colonies at Ta'u Island*. *Coral Reefs* 28 : 735.
- BRUCKNER A.W., 2002 – *Life-Saving Products from Coral Reefs*. *Issues in Science and Technology* 18: 3.
- BURKE L., REYTAR K., SPALDING M. and PERRY A., 2011 – *Reefs at Risk Revisited*. World Resources Institute. Washington DC, 115 p.
- 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).

- CESAR H., BURKE L. and PET-SOEDDE L., 2003 – *The Economics of Worldwide Coral Reef Degradation*. Cesar Environmental Economics Consulting. 24 p.
- 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.
- COLES S.L., RIEGL B.M., 2013 – *Thermal Tolerances of Reef Corals in the Gulf: a Review of the Potential for Increasing Coral Survival and Adaptation to Climate Change Through Assisted Translocation*. Mar Poll Bull 72 : 323-332.
- Conservation International 2008 – *Economic Values of Coral Reefs, Mangroves, and Seagrasses: a Global Compilation*. Center for Applied Biodiversity Science, Conservation International, 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*. Proc Natl Acad Sciences USA 109(44) : 17995-17999.
- Deloitte Access Economics, 2017 – *At What Price? The Economic, Social and Icon Value of the Great Barrier Reef*. 90 p.
- DONEY S.C., FABRY V.J., FEELY R.A. and KLEYPAS J.A., 2009 – *Ocean Acidification: the Other CO₂ Problem*. Ann Rev Marine Sci 1 : 169-192.
- 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., DE'ATH G., OKAZAKI R., MUEHLLEHNER N., GLAS M.S. and LOUGH J.M., 2011 – *Losers and Winners in Coral Reefs Acclimatized to Elevated Carbon Dioxide Concentrations*. Nature Clim Change 1: 165-169.
- FERRARIO F., BECK M.W., STORLAZZI C.D., MICHELI F., SHEPARD C.C. and AIROLDI L., 2014 – *The Effectiveness of Coral Reefs for Coastal Hazard Risk Reduction And Adaptation*. Nat. Commun. 5 :3794.
- FINE M., GILDOR H. and GENIN A., 2013 – *A Coral Reef Refuge in the Red Sea*. Global Change Biol 19(12) : 3640-3647.
- FINE M., CINAR M., VOOLSTRA C.R., SAFA A., RINKEVICH B., LAFFOLEY D., HILMI N. and ALLEMAND D., 2019 – *Coral Reefs of the Red Sea — Challenges and Potential Solutions*. Regional Studies in Marine Science 25 : 100498.
- FOURQUREAN J.W., DUARTE C.M., KENNEDY H., MARBA N., HOLMER M., MATEO M.A., APOSTOLAKI E.T., KENDRICK G.A., KRAUSE-JENSEN D., MCGLATHERY K.J. and SERRANO O., 2012 – *Seagrass Ecosystems as a Globally Significant Carbon Stock*. Nature Geosci. 25(7) : 505-509.
- FRANKIGNOULLE M. and GATTUSO J.-P., 1993 – *Air-Sea CO₂ Exchange in Coastal Ecosystems*. NATO ASI Series 14: 233-248.
- FRANKOWIAK K., WANG X.T., SIGMAN D.M., GOTTMANN A.M., KITAHARA M.V., MAZUR M., MEIBOM A. and STOLARSKI J., 2016 – *Photosymbiosis and the Expansion of Shallow-Water Corals*. Sci. Adv. 2 : e1601122.
- FREUDENTHAL H.D., 1962 – *Symbiodinium Gen. Nov. Symbiodinium Microadriaticum Sp. Nov., a Zooxanthella: Taxonomy, Life Cycle, and Morphology*. J. Protozool. 9 : 45-52.
- FURLA P., ALLEMAND D., SHICK M., FERRIER-PAGÈS C., RICHIER S., PLANTIVAX A., MERLE P.-L. and TAMBUTTÉ S., 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, p. 1-24.
- GATTUSO J.-P and HANSSON L., 2011 – *Ocean Acidification*. Oxford University Press. 326 p.
- 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., PICHON M., DELESALLE B. and FRANKIGNOULLE M., 1993 – Community Metabolism and Air-Sea CO₂ Fluxes in a Coral Reef Ecosystem (Moorea, French Polynesia). Mar Ecol Prog Ser 96: 259-267.
- GOREAU T.J. and HILBERTZ W., 2005 – Marine Ecosystem Restoration: Costs and Benefits for Coral Reefs. World Resource Rev. 17(3) : 375-409.
- HASLER H. and OTT J., 2008 – Diving Down the Reefs? Intensive Diving Tourism Threatens the Reefs of the Northern Red Sea. Mar. Pollut. Bull. 56(10) : 1788-1794.
- HILMI N., ALLEMAND D., METIAN M., OSBORN D. and REYNAUD S., 2015 – Bridging the Gap Between Ocean Acidification Impacts and Economic Valuation: Impacts of Ocean Acidification on Coastal Communities. Monaco 3rd International Workshop on the Economics of Ocean Acidification. 30 p. (www.centrescientifique.mc/documents/OA2015/communique-de-presse-no-1-workshop-2012-version-finale.pdf)
- HILMI N., SAFA A., REYNAUD S. and ALLEMAND D., 2018 – Coral-Based Tourism in Egypt's Red Sea. In: PRIDEAUX B., PABEL A. (eds.) – Coral Reefs: Tourism, Conservation and Management. Routledge-Taylor & Francis Group, London and New York, pp. 29-43.
- HILMI N., ALLEMAND D., CLAUDEL-RUSIN A., GAZEAU F., GAZIELLO M., HANSSON L., METIAN M., MONDIELLI P., OSBORN D., REYNAUD S., SWARZENSKI P., TAMBUTTÉ S. and VENN A. 2018 – Fourth International Workshop on the Economics of Ocean acidification: Bridging the Gap between Ocean Acidification Impacts and Economic Valuation "From Sciences to Solutions: Ocean acidification impacts on ecosystem services- Case studies on coral reefs". Oceanographic Museum of Monaco, Principality of Monaco, 15-17 October 2017. Accessed at https://www.centrescientifique.mc/uploads/documents/fr_ebookFINALNPRINTIMPRIMEURCM3%7B1%7D.pdf on 2019-04-30
- 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., TROTTER J. and MCCULLOCH M., 2014 – Coral Calcifying Fluid Ph Dictates Response to Ocean Acidification. Sci Rep 4: 5207.
- HOSKEMA B.W. and CAIRNS S., 2019 – World List of Scleractinia. Accessed at <http://www.marinespecies.org/scleractinia/> on 2019-04-26
- HOWARD J., SUTTON-GRIER A., HERR D., KLEYPAS J., LANDIS E., MCLEOD E., PIDGEON E. and SIMPSON S., 2017 – Clarifying the Role of Coastal and Marine Systems in Climate Mitigation. Front. Ecol. Environ. 15(1) : 42–50.
- HOWELLS E.J., ABREGO D., MEYER E., KIRK N.L. and BURT J.A., 2016 – Host Adaptation and Unexpected Symbiont Partners Enable Reef-Building Corals to Tolerate Extreme Temperatures. Global Change Biol 22(8) : 2702-2714.
- HUGHES T.P., KERRY .J.T, ÁLVAREZ-NORIEGA M., ÁLVAREZ-ROMERO J.G., ANDERSON K.D., BAIRD A.H., BABCOCK R.C., BEGER M., BELLWOOD D.R., BERKELMANS R., BRIDGE T.C., BUTLER I.R., BYRNE M., CANTIN N.E., COMEAU S., CONNOLLY S.R., CUMMING G.S., DALTON S.J., DIAZ-PULIDO G., EAKIN C.M., FIGUEIRA W.F., GILMOUR J.P., HARRISON H.B., HERON S.F., HOEY A.S., HOBBS J.A., HOOGENBOOM M.O., KENNEDY E.V., KUO C.Y., LOUGH J.M., LOWE R.J., LIU G., MCCULLOCH M.T., MALCOLM H.A., MCWILLIAM M.J., PANDOLFI J.M., PEARS R.J., PRATCHETT M.S., SCHOEPP V., SIMPSON T., SKIRVING W.J., SOMMER B., TORD G., WACHENFELD D.R., WILLIS B.L. and WILSON K., 2017 – Global Warming and Recurrent Mass Bleaching of Corals. Nature 543 : 373–377.
- HUGHES T.P., KERRY J.T., BAIRD A.H., CONNOLLY S.R., CHASE T.J., DIETZEL A., HILL T., HOEY A.S., HOOGENBOOM M.O., JACOBSON M., KERSWELL A., MADIN J.S., MIEOG A., PALEY A.S., PRATCHETT M.S., TORDA G. and WOODS R.M., 2019 – Global Warming Impairs Stock–Recruitment Dynamics of Corals. Nature 568 : 387–390.
- HUME B.C., D'ANGELO C., SMITH E.G., STEVENS J.R., BURT J. and WIEDENMANN J., 2015 – Symbiodinium Thermophilum Sp. Nov., a Thermotolerant Symbiotic Alga Prevalent in Corals of the World's Hottest Sea, the Persian/Arabian Gulf. Scientific Reports 5, 8562.
- ICRI, 2017 – Eco-Designed Mooring for Coral Reef Restoration. International Coral Reef Initiative. www.icriforum.org/sites/default/files/ECO-DESIGN%20MOORING-4_0.pdf
- IFRECOR, 2010 – Récifs coralliens, mangroves et herbiers de Martinique : Valeur économique des services écosystémiques. Chapitre I et II : Valeurs d'usages directs et indirects. Rapport final. 154 p.

- IPCC, 2018 – *Global Warming Of 1.5°C. An Ipcc Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty.* MASSON-DELMOTTE V., ZHAI P., PÖRTNER H.-O., ROBERTS D., SKEA J., SHUKLA P.R., PIRANI A., MOUFOUMA-OKIA W., PÉAN C., PIDCOCK R., CONNORS S., MATTHEWS J.B.R., CHEN Y., ZHOU X., GOMIS M.I., LONNOY E., TIGNOR M.M. and WATERFIELD T. (eds.). World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
- JANOUŠKOVEC J., GAELIS G.S., BURKI F., DINH D., BACHVAROFF T.R., GORNICK S.G., BRIGHT K.J., IMANIAN B., STROM S.L., DELWICHE C.F., WALLER R.F., FENSOME R.A., LEANDER B.S., ROHWER F.L. and SALDARIAGA J.F., 2017 – *Major Transitions in Dinoflagellate Evolution Unveiled by Phylogeneticomics.* Proc Natl Acad Sci USA 114: E171-E180.
- KENKEL C.D. and MATZ M.V., 2016 – *Gene Expression Plasticity As a Mechanism of Coral Adaptation to a Variable Environment.* Nat Ecol Evol 1 : 1-6.
- KOTB M.M.A., 2016 – *Coral Translocation and Farming As Mitigation and Conservation Measures for Coastal Development in the Red Sea: Aqaba Case Study, Jordan.* Environmental Earth Sciences 75(5) : 1-8.
- LAJEUNESSE T., PARKINSON J.E., GABRIELSON P.W., JEONG H.J., REIMER J.D., VOOLSTRA C.R. and SANTOS S.R., 2018 – *Systematic Revision of Symbiodiniaceae Highlights the Antiquity and Diversity of Coral Endosymbionts.* Current Biology 28: 2570-2580.
- LEAL M.C., FERRIER-PAGÈS C., PETERSEN D. and OSINGA R., 2014 – *Coral Aquaculture: Applying Scientific Knowledge to Ex Situ Production.* Reviews in Aquaculture. 6 : 1-18.
- LIEWY J., HOWELLS E.J., WANG X., MICHELL C.T., BURT J.A., IDAGHDOURY. and ARANDA M. 2018 – *Intergenerational Epigenetic Inheritance in Reef-Building Corals.* BioRxiv. <https://doi.org/10.1101/269076>
- LIEW Y.J., ZOCCOLA D., LI Y., TAMBUTTÉ E., VENN A.A., MICHELL C.T., CUI G., DEUTEKOM E.S., KAANDORP J.A., VOOLSTRA C.R., FORêt S., ALLEMAND D., TAMBUTTÉ S. and ARANDA M. 2018 – *Epigenome-Associated Phenotypic Acclimatization to Ocean Acidification in aReef-Building Coral.* Science Advances 4.
- LOYA Y., SAKAI K., YAMAZATO K., NAKANO Y., SAMBALI H. and VAN WOESIK R., 2001 – *Coral Bleaching: the Winners and the Losers.* Ecol Lett 4 : 122-131.
- MALLELA J. and PERRY C., 2007 – *Calcium Carbonate Budgets for Two Coral Reefs Affected by Different Terrestrial Runoff Regimes, Rio Bueno, Jamaica.* Coral Reefs 26: 129–145.
- MOBERG F. and FOLKE C., 1999 – *Ecological Goods and Services of Coral Reef Ecosystems.* Ecol Econ 29 : 215-233.
- MOUILLOT D., PARRAVICINI V., BELLWOOD D.R., LEPRIEUR F., HUANG D., COWMAN P.F., ALBOUY C., HUGHES T.P., THUILLER W. and GUILHAUMON F., 2016 – *Global Marine Protected Areas Do Not Secure the Evolutionary History of Tropical Corals and Fishes.* Nature Comm. 7 : 10359.
- MOYA A., HUISMAN L., BALL E.E., HAYWARD D.C., GRASSO L.C., CHUA C.M., WOO H. N., GATTUSO J. P., FORêt S. and MILLER D.J., 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. and ALLEMAND D., 2005 – *Stable Isotopes ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$) of Organic Matrix from Coral Skeleton.* Proc Natl Acad Sci USA 102: 1525-1530.
- MUSCATINE L. and PORTER J.W., 1977 – *Reef Corals: Mutualistic Symbioses Adapted to Nutrient-Poor Environments.* BioScience 27 : 454 – 460.
- NAKAMURA R., ANDO W., YAMAMOTO H., KITANO M., SATO A., NAKAMURA M., KAYANNE H. and OMORI M., 2011 – *Corals Mass-Cultured from Eggs and Transplanted As Juveniles to their Native, Remote Coral Reef.* Mar. Ecol. Prog. Ser. 436 : 161-168.
- OSMAN E.O., SMITH D.J., ZIEGLER M., KÜRTEN B., CONRAD C., EL-HADDAD K.M., VOOLSTRA C.R. and SUGGETT D.J., 2017 – *Thermal Refugia against Coral Bleaching Throughout the Northern Red Sea.* Global Change Biology 24(2): e474-e484.
- PEIXOTO R.S., ROSADO P.M., LEITE D.C.A., ROSADO A.S. and BOURNE D.G., 2017 – *Beneficial Microorganisms for*



- Corals (BMC): Proposed Mechanisms for Coral Health and Resilience. *Front.Microbiol* 8 : 341.
- PERRY C.T., MURPHY G.N., GRAHAM N.A.J., WILSON S.K., JANUCHOWSKI-HARTLEY F.A. and EAST H.K., 2015 – *Remote Coral Reefs Can Sustain High Growth Potential and May Match Future Sea-Level Trends*. *Sci. Rep.* 5: 18289 .
 - 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: LEVIN S.A. (ed.) – *Encyclopedia of Biodiversity*. San Diego: Academic Press. pp. 73-95.
 - REYNAUD S., LECLERCQ N., ROMAINE-LIOUD S., FERRIER-PAGÈS C., JAUBERT J. and GATTUSO J.-P., 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.
 - RINKEVICH B., 2014 – *Rebuilding Coral Reefs: Does Active Reef Restoration Lead to Sustainable Reefs?* *Current Opinion in Environmental Sustainability* 7 : 28-36.
 - RINKEVICH B., 2005 – *Conservation of Coral Reefs through Active Restoration Measures: Recent Approaches and Last Decade Progress*. *Environ Sci Technol*. 39 : 4333-4342.
 - RIPPE J.P., BAUMANN J.H., DE LEENER D.N., AICHELMAN H.E., FRIEDLANDER E.B., DAVIES S.W. and CASTILLO K.D., 2018 – *Corals Sustain Growth but Not Skeletal Density Across the Florida Keys Reef Tract despite Ongoing Warming*. *Global Change Biology* 24(11) : 5205 - 5217.
 - ROBERTS C.M., O'LEARYA B.C., MCCUALEY D.J., CURY P.M., DUARTE C.M., LUBCHENCO J., PAULY D., SAENZ-ARROYO D., SUMAILA U.R., WILSON R.W., WORM B. and CASTILLA J.C., 2017 – *Marine Reserves Can Mitigate and Promote Adaptation to Climate Change*. *Proc. Natl. Acad. Sc. USA* 114(24) :6167-6175.
 - 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 pp.
 - ROHWER F., SEGURITAN V., AZAM F. and KNOWLTON N., 2002 – *Diversity and Distribution of Coral-Associated Bacteria*. *Mar Ecol Prog Ser* 243 : 1-10.
 - 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. and PILING G.M., 2009 – *The Biology of Coral Reefs*. Oxford University Press. 339 p.
 - SMITH L., 1978 – *Coral Reef Area and the Contributions of Reefs to Processes and Resources of the World's Oceans*. *Nature* 273, 225-226.
 - SMITH S.V. and KINSEY D.W., 1976 – *Calcium Carbonate Production, Coral Reef Growth, and Sea Level Change*. *Science* 194 : 937-939.
 - SPALDING M., BURKE L., WOOD S.A., ASHPOLE J., HUTCHISONE J. and ZU ERMGASSEN P., 2017 – *Mapping the Global Value and Distribution of Coral Reef Tourism*. *Marine Policy* 82 : 104–113.
 - 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: BÄUERLEIN E. (ed.) – *Handbook of Biomineralization*. Wiley-VCH Verlag GmbH. pp. 243-259.
 - TAMBUTTÉ S., HOLCOMB M., FERRIER-PAGÈS C., REYNAUD S., TAMBUTTÉ É., ZOCCOLA D. and ALLEMAND D., 2011 – *Coral Biomineralization: from the Gene to the Environment*. *J Exp Mar Biol Ecol* 408(1-2) : 58-78.
 - TAMBUTTÉ É., VENN A.A., HOLCOMB M., SEGONDS N., TECHER N., ZOCCOLA D., ALLEMAND D. and TAMBUTTÉ S., 2015 – *Morphological Plasticity of the Coral Skeleton under CO₂-Driven Seawater Acidification*. *Nat. Commun.* 6 : 7368.
 - TEEB, 2010 – *The Economics of Ecosystems and Biodiversity Ecological and Economic Foundations*. Edited by Pushpam Kumar. Earthscan, London and Washington.

- THOMPSON J.R., RIVERA H.E., CLOSEK C.J. and MEDINA M., 2014 – *Microbes in the Coral Holobiont: Partners through Evolution, Development, and Ecological Interactions*. Frontiers in cellular and infection microbiology 4 : 176-176.
- TUNNICLIFFE V., 1983 – *Caribbean Staghorn Coral Populations : Pre-Hurricane Allen Conditions in Discovery Bay, Jamaica*. Bull Mar Sc 33 : 132-151.
- UN Environment, ISU, ICRI, Trucost, 2018 – *The Coral Reef Economy: the Business Case for Investment in the Protection, Preservation and Enhancement of Coral Health*. 36 pp.
- VAN OPPEN M.J.H., OLIVER J.K., PUTNAM H.M. and GATES R.D., 2015 – *Building Coral Reef Resilience through Assisted Evolution*. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 112(8) : 2307-2313.
- VENN A.A., TAMBUTTÉ É., HOLCOMB M., LAURENT J., ALLEMAND D. and TAMBUTTÉ S., 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., HOEGH-GULDBERG O., LENTON T.M., LOUGH J.M., OBURA D.O., PEARCE-KELLY P., SHEPPARD C.R., SPALDING M., STAFFORD-SMITH M.G. and ROGERS A.D., 2009 – *The Coral Reef Crisis: the Critical Importance of <350 ppm CO₂*. Mar Pollut Bull 58 : 1428-1436.
- VIDAL-DUPIOL J., ZOCCOLA D., TAMBUTTÉ É. GRUNAU C., COSSEAU C., SMITH K.M., FREITAG M., DHEILLY N. M., ALLEMAND D. and TAMBUTTE S., 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.
- WEISS K.R., 2017 – *Naturalist Richard Pyle Explores the Mysterious, Dimly Lit Realm of Deep Coral Reefs*. Science Mag, 2 mars 2017 (Accessed at www.sciencemag.org/news/2017/03/naturalist-richard-pyle-explores-mysterious-dimly-lit-realm-deep-coral-reefs on 2019-04-27).
- WEST J.M. and SALM R.V., 2003 – *Resistance and Resilience to Coral Bleaching: Implications for Coral Reef Conservation and Management*. Conserv Biol 17 : 956–967.
- WIKELSKI M. and COOKE S.J., 2006 – *Conservation Physiology*. Trends Ecol Evol 21(1) : 38-46.
- 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.
- WOODHEAD A.J., HICKS C.C., NORSTRÖM A.V., WILLIAMS G.J. and GRAHAM N.A.J., 2019 – *Coral Reef Ecosystem Services in the Anthropocene*. Functional Ecology. Doi: 10.1111/1365-2435.13331



Blanchissement des coraux, un réservoir de biodiversité menacé

Leïla Ezzat

Depuis les années 1980, la température moyenne à la surface des océans ne cesse d'augmenter, renforçant l'intensité, la durée et l'étendue du phénomène de blanchissement du corail. La période 2014-2017 fut marquée par des mortalités massives de coraux dans les différents bassins océaniques, avec le déclin exceptionnel de plus de 50 % des récifs sur la Grande Barrière de corail – la plus grande structure corallienne existante. Le degré de résilience des coraux se voit compromis avec un taux de recrutement de larves coralliennes faible et le stress subi est accentué par d'autres facteurs d'origine anthropique (pollution, surpêche, urbanisation, tourisme, acidification des océans, prédation par des organismes corallivores, etc.). Alors que l'année 2018 fut la plus chaude pour les océans, et cela depuis le début des enregistrements, le phénomène de blanchissement pourrait devenir un phénomène récurrent dans les années à venir. Afin de protéger ce patrimoine naturel, abritant plus d'un tiers de la biodiversité marine mondiale et dont dépendent directement pour leur subsistance plus de 500 millions de personnes à travers le monde, il apparaît nécessaire et urgent, au-delà des actions locales, de prendre des décisions à l'échelle des gouvernements afin de diminuer l'impact de l'homme sur le climat.

Malgré leur importance écologique et économique, les récifs coralliens sont affectés par de nombreux facteurs de stress aussi bien à une échelle locale (surexploitation des ressources marines, techniques de pêche destructrices, pression touristique, pollutions marines, développement côtier, prédation par des organismes corallivores) que par des facteurs de stress globaux (housse de la température de surface des océans, phénomènes météorologiques extrêmes, acidification du milieu marin) [1 – 4]. Ces perturbations d'origines naturelles et anthropiques menacent actuellement la plupart des écosystèmes récifaux à travers 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 du corail (perte des symbiotes et/ou des pigments photosynthétiques associés) s'échelonnant sur une période de temps plus ou moins longue [5]. 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 les années 1980, la température moyenne des océans augmente à une allure anormale, renforçant la durée, l'intensité et l'étendue du blanchissement corallien [6]. Suite à la perte de leurs symbiotes photosynthétiques, qui constituent leur principale source de nourriture, les coraux se retrouvent « physiologiquement » affaiblis. Dans le cas d'un épisode de blanchissement prolongé, le corail succombe au stress nutritionnel, engendrant des événements de mortalités massives dans les écosystèmes récifaux du monde entier, du Pacifique à l'océan Indien, en passant par les Caraïbes et la mer Rouge.

HISTOIRE DU BLANCHISSEMENT CORALLIEN

Le premier épisode de blanchissement corallien fut reporté par Yonge et Nicholls sur la Grande Barrière de corail dans les années 1930 alors que la température des eaux de surface atteignait 35 °C [7]. Or, depuis les années 1980, les scientifiques constatent une augmentation de la fréquence, de l'intensité et de l'étendue des épisodes de blanchissement à travers le monde [5]. En cause, une hausse « record » de la température de surface des océans due au réchauffement climatique, combinée au renforcement du phénomène El Niño. Trois événements majeurs de blanchissement ont été reportés en 1998-1999, 2010-2011 et 2014- 2017. L'épisode de 1998 avait concerné 60 pays et nations insulaires à travers les océans Pacifique, Indien, Atlantique (Caraïbes), le golfe Persique ainsi que la mer Rouge [8,9]. 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 [9]. 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 [5]. L'année 1998 fut ainsi le premier « épisode de blanchissement global » déclaré par la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

En 2010, un intense phénomène climatique El Niño a entraîné un épisode de 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 termes de superficie et de mortalité. L'événement de blanchissement de la période 2014-2017 fut

d'une ampleur, d'une durée et d'une étendue exceptionnelles, encore jamais observées à ce jour. Ce troisième épisode de blanchissement a débuté en juin 2014 dans la zone ouest du Pacifique (îles Guam, archipel des Mariannes et Hawaï), puis s'est propagé dans les îles Marshall, et la Floride (Florida Keys). En 2015, le phénomène s'étend dans le Pacifique sud, l'Océan Indien, les régions centrales et est du Pacifique tropical et enfin aux Caraïbes. À l'issu de l'année 2015, alors que le phénomène El Niño atteignait son pic d'intensité maximum, 32 % des récifs à travers le monde avaient été exposés à une anomalie de température équivalente à +4 °C, entraînant des mortalités de coraux sur plus de 12 000 km². Durant le mois de mars 2016, la température moyenne de l'eau de mer dans la zone nord de la Grande Barrière de corail en Australie était supérieure d'1,5 à 2 °C aux valeurs enregistrées entre 1971 et 2000, pour la même période de l'année. Cet épisode global de blanchissement a concerné un nombre plus important de récifs comparé aux événements précédents et fut particulièrement sévère dans certaines régions comme la Grande Barrière de corail, les îles Kiribati et Jarvis situées dans l'océan Pacifique.

Plus de 70 % des récifs coralliens à travers le monde ont été confrontés à la vague de chaleur pouvant induire un blanchissement et des épisodes de mortalité durant la période 2014-2017. Historiquement, le blanchissement corallien se voyait associé au cycle naturel El Niño, un phénomène climatique caractérisé par une température élevée de l'eau de mer dans les régions Est du Pacifique Sud (Amérique du Sud) et lié à un cycle de variation de la pression atmosphérique dans le Pacifique sud (oscillation australe). Le dernier événement de blanchissement (2014-2017)

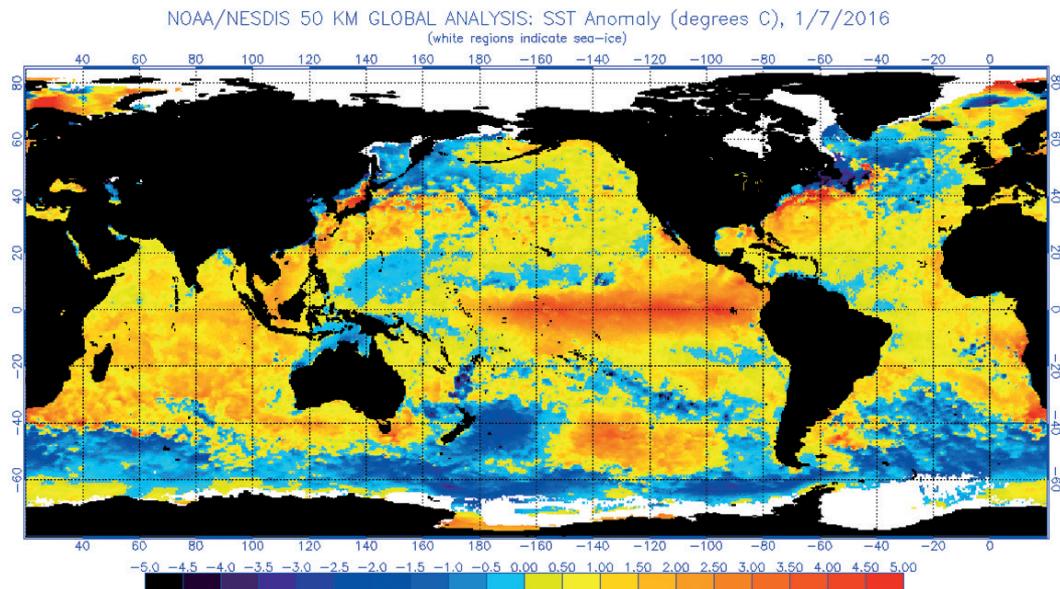


Fig. 1 — Anomalies de températures de surface de la mer (°C). L'échelle varie de +5 °C à -5 °C. Les nombres positifs signifient que la température calculée au 1/7/2016 était supérieure à la moyenne.

fut d'autant plus spectaculaire puisqu'il n'était pas continuellement lié à des périodes dominées par El Niño (par exemple : 2017 fut une année dominée par La Niña), suggérant que contrairement aux épisodes précédents, l'oscillation australe n'eut que très peu d'effets sur le blanchissement.

LES CONSÉQUENCES ALARMANTES DU BLANCHISSEMENT DE 2014-2017

Mortalités massives de coraux reportées à travers les océans du globe

En 2016, 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 1 000 km de côtes longeant la zone nord de Port Douglas, pourtant considérés jusqu'ici comme parfaitement préservés, car à l'écart des activités humaines [10]. En revanche, dans la région centrale, entre Cairns et Mackay, le blanchissement fut modéré. La zone sud quant à elle fut épargnée due à une baisse de la température de l'eau de mer résultant du cyclone Winston. En 2017, et pour une deuxième année consécutive, le blanchissement impactait sévèrement la Grande Barrière, et cette fois la zone centrale aux

abords de Cairns, Townsville et Lizard Island. Plus de 50 % des récifs formant la Grande Barrière ont péri entre 2016 et 2017 [11], dont des espèces centenaires telles que les coraux du genre *Porites* [10]. Guam, la plus grande île de Micronésie située dans l'est-sud-est de la mer des Philippines, a subi durant quatre années consécutives des épisodes de blanchissement extrêmes. Le phénomène fut sévère dans la région du triangle de corail (Malaisie, Indonésie, Philippines et les îles Salomon) en Nouvelle Calédonie, aux îles Fidji ainsi que dans la république des Kiribati, où une température anormalement élevée de l'eau de mer durant les années 2015-2016 a induit plus de 80 % de mortalité aux abords de l'île « Christmas ». Des anomalies de températures importantes furent également enregistrées en Chine, au Vietnam à Taiwan et tout particulièrement au Japon, dans la zone récifale de Sekiseishoko où 97 % de mortalité corallienne a été reportée fin 2016. Durant les trois dernières années, ce sont plus de 20 % des récifs à travers le monde qui ont disparu.

Impacts du blanchissement sur l'abondance et la diversité des poissons récifaux

Les récifs coralliens, souvent décrits comme berceaux de la biodiversité marine mondiale, abritent plus d'un tiers des organismes marins dont 4 000 espèces de poissons. Or, lorsque les coraux constructeurs de ré-

cifs blanchissent et meurent, c'est tout un réservoir de biodiversité qui est menacé. Suite à la vague de chaleur de 2016, les scientifiques reportèrent une diminution de l'abondance et de la diversité au sein des espèces de poissons herbivores [12,13], tels que les poissons demoiselles dans certaines régions de la Grande Barrière de corail [12]. Le déclin des communautés d'herbivores est d'autant plus inquiétant puisque ces poissons jouent un rôle fonctionnel clé dans le développement, la survie et la résilience des récifs en « broutant » les algues filamentueuses qui colonisent les coraux [14]. Il faut tout de même noter que le déclin de certaines espèces d'herbivores n'était pas toujours corrélé à une diminution de la couverture corallienne [12]. Dans certains sites, les experts ont observé une augmentation de l'abondance de poissons herbivores, suggérant des mouvements spatiaux importants et des potentiels « refuges climatiques » à courts termes.

Le recrutement des larves coraliennes compromis

Les conséquences des récents événements de blanchissement pourraient compromettre la capacité des coraux à se reproduire. Durant les épisodes de blanchissement 2016-2017, le déclin marqué des individus adultes de coraux constructeurs de récifs dans les régions nord et centrale de la Grande Barrière a occasionné une chute de 89 % de la production de nouvelles larves par rapport aux périodes pré-blanchissement 2016-2017 [15]. Les coraux du genre *Acropora*, un des taxa les plus abondants dans les tropiques et responsables de la structure tridimensionnelle d'un récif, furent les plus affectés avec une baisse de 93 % de la production de larves. Ces observations sont alarmantes puisque le nombre de larves coraliennes produites chaque année et leur dispersion précédant la colonisation du milieu/substrat sont des éléments essentiels prenant part à la résilience des récifs. La diversité des larves coraliennes va donc grandement influencer la diversité des futures colonies « adultes ». « Nous nous attendons à ce que le recrutement corallien se rétablisse progressivement au cours des cinq à dix prochaines années, à mesure que les coraux survivants se développent et que davantage d'entre eux atteignent la maturité sexuelle, en supposant

bien sûr que nous n'assisterons pas à un autre événement de blanchissement durant la prochaine décennie », a déclaré le Professeur Terry Hughes, Directeur du Australian Research Council (ARC) – Centre d'excellence sur l'étude des récifs coralliens.

LE DEVENIR DES RÉCIFS CORALLIENS: VERS UN ÉPISODE DE BLANCHISSEMENT ANNUEL?

En février 2019, la température moyenne globale de la surface des océans était supérieure de +0,70 °C aux moyennes du xx^e siècle. Les modèles climatiques prévoient à court terme une prolongation du phénomène El Niño jusqu'à la fin du printemps 2019 (hémisphère nord), augmentant significativement la susceptibilité des coraux à un nouvel épisode de blanchissement et à des mortalités massives. Dans le cas où aucune action n'est entreprise par les gouvernements afin de maintenir les températures de l'atmosphère au-dessous du seuil des +1,5 °C suivant l'Accord de Paris sur le climat, les experts prévoient que le réchauffement de la surface des océans pourrait être six fois plus intense entre 2081 et 2100 que le réchauffement total observé au cours des 60 dernières années [6]. 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 biannuel et de menacer la survie des récifs du monde entier d'ici 2050. Ces prédictions sont alarmantes puisque l'augmentation de l'intensité, de l'étendue et de la fréquence du blanchissement, comme celles observées dans les Caraïbes (1995, 1998, 2005 puis 2010) et sur la Grande Barrière de corail (1998, 2010, 2014-2016, 2017) limitent le temps de résilience des écosystèmes récifaux et peuvent entraîner, sur le long terme, de plus forts taux de mortalité.

Des études récentes ont toutefois souligné certains mécanismes et potentiels d'acclimatation des coraux aux fortes anomalies de température. Une équipe de scientifiques américains a récemment synthétisé les données des quatre événements majeurs de blanchissement (1998-2017), englobant 3 351 sites à



travers 81 pays. Ils observèrent que le phénomène était significativement moins marqué au sein des récifs caractérisés par une variation importante de la température des eaux de surface [16]. Aussi, certains récifs résistèrent particulièrement bien aux dernières vagues de chaleur, comme ceux situés aux abords de l'atoll Palmyra (90 % de survie) compris dans les îles de la Ligne [17], l'archipel indonésien des Rajat Ampat ou encore le Golfe d'Aqaba dans la mer Rouge, décrit comme un refuge corallien unique [18,19].

D'un point de vue physiologique, certaines espèces de coraux sont plus à même de résister au blanchissement, comme les coraux constructeurs de récifs dits « massifs » caractérisés par une croissance lente et un tissu épais, tels que les taxas appartenant aux familles *Faviidae* et *Poritidae* ou *Merulinidae*. Les coraux branchus, appartenant aux familles *Pocilloporidae* et *Acroporidae* sont, quant à elles, généralement plus sensibles aux fortes anomalies de température [20 – 22]. Certaines espèces peuvent s'associer à différents clades d'algues symbiotiques afin d'optimiser leur résistance au stress thermique ou régulent l'expression de leurs gènes pour renforcer les mécanismes de défenses (diversité génétique) [23 – 25]. Une étude récente a également démontré le potentiel d'une mémoire écologique du blanchissement, rendant certaines espèces coraliennes potentiellement plus résistantes aux événements à venir [26]. Cependant, le degré de résilience des coraux reste faible et le temps d'adaptation ou d'acclimatation au stress de température trop court. Il est donc peu probable que ces différents mécanismes jouent un rôle prépondérant dans la survie des récifs. Enfin, d'autres facteurs de stress sont à prendre en considération dans la prédiction du devenir des écosystèmes récifaux. L'effet synergique de certains facteurs (e.g. pollution marine et surpêche) peut altérer les relations trophiques entre les organismes au sein d'un récif, augmentant la susceptibilité des coraux au blanchissement, aux maladies et mortalités. Par exemple, lors des périodes de stress thermique, la prédation des coraux par des organismes corallivores (i.e. étoiles de mer, escargots, poissons de récifs), affaiblit physiologiquement le corail, diminuant sur le long terme

sa résilience au changement climatique et autres facteurs de stress [27 – 29].

L'URGENCE D'AGIR

Ces événements récents inquiètent la communauté scientifique et ont déclenché une prise de conscience collective sur la nécessité d'agir rapidement afin de réduire l'impact de l'homme sur le climat et de préserver les récifs coralliens.

En 2016, l'accord de Paris sur le climat, constituant le premier accord universel sur le réchauffement climatique, fut signé suite aux négociations tenues lors de la Conférence de Paris sur le Climat (COP21) en décembre 2015. Cet accord, ayant pour objectif de « contenir le réchauffement climatique au-dessous des +2 °C par rapport aux niveaux préindustriels d'ici 2100 » et si possible de « poursuivre les efforts pour limiter la hausse des températures à +1,5 °C » a été approuvé par 196 délégations sur les 197 comptant l'Organisation des Nations unies (ONU). L'Union européenne en collaboration avec l'Agence européenne pour l'environnement a, quant à elle, fixé un nombre important d'objectifs environnementaux et climatiques englobant les domaines de la qualité de l'air, de l'eau, la gestion des déchets ainsi que l'énergie et les transports. Fin 2018, le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a présenté un rapport spécial rappelant à l'ordre les instances gouvernementales sur l'urgence d'agir rapidement afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Au rythme actuel, le réchauffement atteindra +1,5 °C entre 2030 et 2052. La France, comptant à elle seule 10 % des récifs mondiaux (58 000 km²), s'engage au niveau national avec l'Initiative française pour les récifs coralliens (IFRECOR) afin d'améliorer l'état de conservation et d'assurer une gestion durable des récifs coralliens français. Au niveau international, le gouvernement français agit en collaboration avec l'International Coral Reef Initiative (ICRI) afin de promouvoir des initiatives et projets pour assurer la protection des écosystèmes côtiers. Suite à la signature de la Déclaration de Bruxelles « Climate Change and Ocean Preservation » (février 2019), la

France rappelle ses engagements internationaux en matière de développement durable, de changement climatique et de la préservation de la biodiversité des milieux océaniques.



Fig.2 — Blanchissement corallien en avril 2019 à Moorea, Polynésie Française. © Kelly Speare, étudiante en thèse à University of California, Santa Barbara.

De nouvelles techniques et de nombreuses ressources ont également été mises en place afin de suivre l'évolution du réchauffement climatique et ses conséquences sur les récifs coralliens. 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. Cette campagne précéda la conception du documentaire « Chasing Corals » (Jeff Orlowski), retraçant le déclenchement et l'évolution du troisième épisode de blanchissement dans les différents bassins océaniques, au moyen de vidéos et images impressionnantes qui éveillèrent les consciences de nombre d'entre nous. L'institut de recherche Scripps à San Diego a récemment lancé le projet « 100 Island Challenge », visant à cartographier 100 récifs coralliens pour mieux appréhender l'impact du changement climatique et des stress anthropogènes. Les chercheurs ont étudié un jeu de données comprenant des milliers d'images de la même zone récifale collectées durant 8 ans. Ces photographies ont été assemblées à l'aide d'un logiciel créant des mosaïques de photos en 3D et ont permis de démontrer la résilience des récifs de Palmyra dans le Pacifique suivant l'épisode de blanchissement

de 2014-2016. Dans la même lignée, la goélette TARA Pacific (menée par le Centre National pour la Recherche Scientifique et le Centre Scientifique de Monaco) a sillonné plus de 100 000 km entre 2016 et 2018 visant à fournir une approche inédite de la biodiversité au sein des récifs et de leur capacité de « résistance, d'adaptation et de résilience » aux facteurs de stress anthropiques au moyen de techniques de pointes. Ces projets ont aussi donné lieu à de nombreuses conférences et opérations de sensibilisation afin d'informer les populations locales, et tout un chacun au devenir des océans. Par exemple, l'organisation non-gouvernementale « Reef Check » forme des plongeurs scientifiques volontaires à la réalisation de transects pour suivre l'évolution de l'état de santé des récifs tropicaux à travers le monde ainsi que des récifs longeant la côte ouest californienne.

Les efforts entrepris par les différents organismes et gouvernements 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) [30] ont par exemple démontré l'efficacité des aires marines protégées pour la résilience des récifs dans les Caraïbes. 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 (AMP ; 1,3 million de km²). Selon le Protected Planet Report, en 2018, 7 % de la surface total des océans était classée « protégée ». Les AMPs représentent donc un refuge inestimable face au déclin de la biodiversité observé depuis les années 1970. Une étude récente a d'ailleurs démontré l'effet positif de la diversité d'espèces coralliennes, (polyculture – comme celles observées au sein d'un récif en bonne santé ou d'une AMP) sur la croissance et la survie des coraux en comparaison à une diminution de la biodiversité caractérisée par une diminution du nombre d'espèces coralliennes (monoculture; comme observé au sein d'un récif dégradé) [31]. Par la suite, les projets de plantation de coraux et restauration de récifs, tels que ceux développés par l'ONG Coral Guardian permettent à la fois de stimuler la vie marine en favorisant le



recrutement de larves coraliennes et de créer de nouvelles nurseries pour les organismes marins.

Des solutions d'ingénierie biologique ont même été proposées, suggérant d'utiliser des colonies coraliennes « 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 [32]. Cependant, ces mesures restent très coûteuses et ne seraient que très peu applicables à grande échelle, étant donné la surface colossale occupée par les récifs coralliens (à elle seule la Grande Barrière s'étend sur plus de 2300 km). Enfin, fin mars 2019 à Monaco, s'est tenu le premier comité de pilotage du projet « World Coral Conservatoire », un programme soutenu par la Fondation Prince Albert II de Monaco et coordonné par le Centre Scientifique de Monaco

et l'Institut Océanographique. Cette initiative, alliant laboratoires de recherche et aquariums publics et privés à travers le monde, propose de créer une « arche de Noé » recensant la plupart des espèces et souches de coraux – un moyen de préserver la biodiversité au sein des écosystèmes coralliens en reliant recherche scientifique, conservation et sensibilisation.

Les récifs coralliens abritent à ce jour plus d'un tiers de la biodiversité marine mondiale et représentent une source de protéine pour plus de 500 millions de citoyens à travers le monde. Selon le Prof. Terry Hughes, une seule solution s'impose afin de préserver la vie marine: « Il faut s'attaquer à la source du problème, en réduisant les émissions de gaz à effet de serre à zéro aussi rapidement que possible ». La conception de projets innovants relatifs aux domaines scientifiques, mais également aux niveaux politique et social, permettra de réduire notre empreinte carbone, d'esquisser et d'assurer un avenir dont bénéficieront les écosystèmes de notre planète et les générations futures.

RÉFÉRENCES

- BRENER-RAFFALLI K. et al., 2018 – *Gene Expression Plasticity And Frontloading Promote Thermotolerance in Pocilloporid Corals*. bioRxiv , 398602. FABRICIUS K.E., 2005 – *Effects of Terrestrial Runoff on the Ecology of Corals and Coral Reefs: Review And Synthesis*. Mar. Pollut. Bull. 50, 125–146.
- CLEMENTS C.S. and HAY M.E., 2019 – *Biodiversity Enhances Coral Growth, Tissue Survivorship and Suppression of Macroalgae*. Nat. Ecol. Evol. 3, 178.
- CHENG L., ABRAHAM J., HAUSFATHER Z., TRENBERTH K.E., 2019 – *How Fast Are the Oceans Warming?* Science (80). 363, 128–129.
- D'ANGELO C. and WIEDENMANN J., 2014 – *Impacts of Nutrient Enrichment on Coral Reefs: New Perspectives and Implications for Coastal Management and Reef Survival*. Curr. Opin. Environ. Sustain. 7, 82–93. (doi:10.1016/j.cosust.2013.11.029).
- FINE M., GILDOR H. and GENIN A., 2013 – *A Coral Reef Refuge in the Red Sea*. Glob. Chang. Biol. 19, 3640–3647.
- FOX M.D. et al., 2019 – *Limited Coral Mortality Following Acute Thermal Stress and Widespread Bleaching on Palmyra Atoll, Central Pacific*. Coral Reefs (doi:10.1007/s00338-019-01796-7)
- GIBSON R.N., BARNES M. and ATKINSON R.J., 2001 – *Territorial Damselfishes As Determinants of the Structure of Benthic Communities on Coral Reefs*. Oceanogr. Mar. Biol. an Annu. Rev. 39, 355–389.
- HOEGH-GULDBERG O., 1999 – *Climate Change, Coral Bleaching and the Future of the World's Coral Reefs*. Mar. Freshw. Res. 50, 839–866.
- HOEGH-GULDBERG O., POLOCZANSKA E.S., SKIRVING W. and DOVE S., 2017 – *Coral Reef Ecosystems under Climate Change and Ocean Acidification*. Front. Mar. Sci. 4, 158.
- HUGHES T.P. et al., 2017 – *Coral Reefs in the Anthropocene*. Nature 546, 82.
- HUGHES T.P. et al., 2017 – *Global Warming and Recurrent Mass Bleaching of Corals*. Nature 543, 373.
- HUGHES T.P. et al., 2018 – *Global Warming Transforms Coral Reef Assemblages*. Nature 556, 492–496. (doi:10.1038/s41586-018-0041-2).
- HUGHES T.P. et al., 2019 – *Ecological Memory Modifies the Cumulative Impact of Recurrent Climate Extremes*. Nat. Clim. Chang. 9, 40.
- HUGHES T.P. et al., 2019 – *Global Warming Impairs Stock–Recruitment Dynamics of Corals*. Nature, 1.
- HUME B.C.C., D'ANGELO C., SMITH E.G., STEVENS J.R., BURT J. and WIEDENMANN J., 2015 – *Symbiodinium Thermophilum Sp. Nov., a Thermotolerant Symbiotic Alga Prevalent in Corals of the World's Hottest Sea, the Persian/Arabian Gulf*. Sci. Rep. 5, 8562.
- KENKEL C.D. and MATZ M.V., 2017 – *Gene Expression Plasticity As a Mechanism of Coral Adaptation to a Variable Environment*. Nat. Ecol. Evol. 1, 14.
- LOYA Y., SAKAI K., YAMAZATO K., NAKANO Y., SAMBALI H. and VAN WOESIK R., 2001 – *Coral Bleaching: the Winners and the Losers*. Ecol. Lett. 4, 122–131.
- MARSHALL P.A., SCHUTTENBERG H.Z. and WEST J.M., 2006 – *A Reef Manager's Guide to Coral Bleaching*.
- MCCLANAHAN T.R., BAIRD A.H., MARSHALL P.A. and TOSCANO M.A., 2004 – *Comparing Bleaching and Mortality Responses of Hard Corals between Southern Kenya and the Great Barrier Reef, Australia*. Mar. Pollut. Bull. 48, 327–335.
- MUMBY P.J. and HARBORNE A.R., 2010 – *Marine Reserves Enhance the Recovery of Corals on Caribbean Reefs*. PLoS One 5, e8657.
- OSMAN E.O., SMITH D.J., ZIEGLER M., KÜRTEN B., CONRAD C., EL-HADDAD K.M., VOOLSTRA C.R. and SUGGETT D.J., 2018 – *Thermal Refugia against Coral Bleaching throughout the Northern Red Sea*. Glob. Chang. Biol. 24, e474–e484.
- RICE M.M., EZZAT L. and BURKEPILE D.E., 2018 – *Corallivory in the Anthropocene: Interactive Effects of Anthropogenic Stressors and Corallivory on Coral Reefs*. Front. Mar. Sci. 5, 525.



- RICHARDSON L.E., GRAHAM N.A.J., PRATCHETT M.S., EURICH J.G. and HOEY A.S., 2018 – *Mass Coral Bleaching Causes Biotic Homogenization of Reef Fish Assemblages*. *Glob. Chang. Biol.* 24, 3117–3129.
- SHAVER E.C., BURKEPILE D.E. and SILLIMAN B.R., 2018 – *Local Management Actions Can Increase Coral Resilience to Thermally-Induced Bleaching*. *Nat. Ecol. Evol.* 2, 1075.
- SULLY S., BURKEPILE D.E., DONOVAN M.K., HODGSON G. and VAN WOESIK R., 2019 – *A Global Analysis of Coral Bleaching over the Past Two Decades*. *Nat. Commun.* 10, 1264.
- VAN OPPEN M.J.H., OLIVER J.K., PUTNAM H.M. and GATES R.D., 2015 – *Building Coral Reef Resilience through Assisted Evolution*. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 112, 2307 LP-2313. (doi:10.1073/pnas.1422301112).
- WILKINSON C.C.R., 2001 – *The 1997-1998 Mass Bleaching Event around the World*.
- WILKINSON C., LINDÉN O., CESAR H., HODGSON G., RUBENS J., STRONG A.E., 1999 – *Ecological and Socioeconomic Impacts of 1998 Coral Mortality in the Indian Ocean: an Enso Impact and a Warning of Future Change?* *Ambio*.
- WISMER S., TEBBETT S.B., STREIT R.P. and BELLWOOD D.R., 2019 – *Spatial Mismatch in Fish and Coral Loss Following 2016 Mass Coral Bleaching*. *Sci. Total Environ.* 650, 1487–1498.
- YONGE S.C.M. and NICHOLLS A.G., 1931 – *The Structure, Distribution and Physiology of the Zooxanthellae*. 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, 11833.

RÉFÉRENCES SITOGRAPHIQUES

- Climate.gov. (2019). *El Niño & La Niña (El Niño-Southern Oscillation)* | NOAA Climate.gov. [online] Available at: <https://www.climate.gov/enso>
- Coral Guardian. (2019). *Conservation des récifs coralliens - Coral Guardian*. [online] Available at: <https://www.coralgardian.org>
- Coralreefwatch.noaa.gov. (2019). [online] Available at: https://coralreefwatch.noaa.gov/satellite/analyses_guidance/global_climate_updates/global_coral_reef_analysis_thru_dec_2010.pdf
- Coralreefwatch.noaa.gov. (2019). NOAA Coral Reef Watch Homepage and Near-Real-Time Products Portal. [online] Available at: <https://coralreefwatch.noaa.gov/satellite/index.php>
- Coralreefwatch.noaa.gov. (2019). *Global Coral Bleaching 2014-2017: Status and an Appeal for Observations*. [online] Available at: https://coralreefwatch.noaa.gov/satellite/analyses_guidance/global_coral_bleaching_2014-17_status.php
- Coralreefwatch.noaa.gov. (2019). *Coral Reef Watch Coral Bleaching Heat Stress Analysis and Guidance*. [online] Available at: https://coralreefwatch.noaa.gov/satellite/analyses_guidance/pacific_cbts_ag_20171109.php
- Livereport.protectedplanet.net. (2019). [online] Available at: https://livereport.protectedplanet.net/pdf/Protected_Planet_Report_2018.pdf

Océan, biodiversité et climat

Gilles Boeuf

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 1370 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 beaucoup plus penser en océan global. Parlons de l'océan, et non « des océans », il est unique et en connectivité ! Un autre trait particulier est, par rapport au reste des eaux libres sur la planète, sa salinité. Celle-ci est extrêmement stable au large (35 psu (*), 1050 mOsm.l⁻¹) et la composition de l'eau océanique au large est presque la même partout, et ceci depuis des dizaines de millions d'années, l'océan est ainsi beaucoup plus stable que les autres milieux de vie.

La biodiversité ne saurait être assimilée à une simple liste d'espèces peuplant un écosystème particulier, elle est considérablement plus qu'un catalogue ou un inventaire. C'est en fait tout l'ensemble des relations établies entre les êtres vivants, entre eux, et avec leur environnement. Nous pouvons la définir simplement comme étant la fraction vivante de la nature. Elle est issue d'une chimie prébiotique, bâtie sur une géodiversité antérieure, et elle s'est diversifiée dans l'océan ancestral vers 3,9 milliards

d'années. La vie est finalement apparue assez rapidement, après le refroidissement initial et la condensation des masses d'eau.

C. De Duve, Prix Nobel en 1974, dit dans « Poussière de vie » en 1996, que la Terre était si idéalement positionnée par rapport au soleil que la vie ne pouvait pas ne pas y apparaître (elle devait donc le faire !) et J. Monod parlait d'hypothèse improbable ! Les plus anciennes roches sédimentaires connues (île d'Akilia, au Sud du Groenland) contenant du carbone d'origine biologique sont datées à 3 850 millions d'années (Ma). Il faut imaginer la vie primitive très simple au début, à partir d'un monde ARN et de proto-cellules. Les gisements actuels de stromatolithes, ces roches précipitant le bicarbonate, avec de très beaux gisements en Australie, et récemment 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 3 700-3 200 Ma, alors sans aucun 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 (CO₂), et ceci avant 3 500 Ma. L'oxygène a ensuite commencé à diffuser hors du milieu aquatique, la composition de l'atmosphère actuelle avec ses 21 % d'oxygène datant d'environ 100 Ma, au Crétacé.



Dans cet océan ancestral se sont produits des événements déterminants pour le vivant et la biodiversité : (1) l'apparition de la membrane nucléaire et du noyau individualisé (transition procaryote-eucaryote) vers 2200 Ma ; (2) la capture de cyanobactéries ambiantes qui deviendront des symbiotes et les organites de la cellule, la mitochondrie et le plaste, avec leur propre petit ADN, respectivement vers 2100 et 1400 Ma ; (3) l'apparition des pluricellulaires et métazoaires vers 2100 Ma. Il s'y produira aussi un fait exceptionnel, 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 (coévolution et dialogue moléculaire), le brassage génétique permettant à terme plus rapidement de « désarmer » le parasite et une sélection sexuelle, bien différente de la sélection naturelle.

Les conséquences physiques des « flux » osmotiques (eau et électrolytes) en environnement marin ont conduit le vivant à deux types de stratégies : (1) dans l'immense majorité des cas, de la première cellule initiale aux crustacés, une régulation isosmotique intracellulaire, 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 intracellulaire et « intérieurs », extra-cellulaire) que celle de l'eau de mer, (2) plus tard, à partir des arthropodes, une régulation anisosmotique extra-cellulaire 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.

Pour la température, bien plus tard, au Trias, vers 210 Ma, après la troisième grande crise d'extinction des espèces vers 251 Ma, les prémisses 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 reconnue dans les océans ne dépasse pas 13 % de l'ensemble des espèces vivantes actuellement décrites, soit moins de 280 000. Ceci est peu et peut être lié à deux raisons. La première c'est que les connaissances, surtout pour les zones profondes et pour les micro-organismes, bactéries et protistes divers, ne sont encore que très partielles : nous sous-estimons donc considérablement la biodiversité océanique. Les nouveaux moyens, comme le couplage entre la cytométrie en flux et les sondes moléculaires permettent la découverte d'une extraordinaire diversité biologique. Les séquençages massifs actuels de la masse d'eau océanique, le « séquençage de mers » (C. Venter, séquençage de tout l'ADN dans un volume d'eau de mer filtrée) apportent des données apparaissant pour la plupart inconnues. 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 (il varie peu), 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 totale de la planète. Si aujourd'hui, il existe de 5 à 7 fois plus de taxons continentaux reconnus, comparativement aux mers et océan, nous pouvons bien sûr nous interroger sur cette question, car initialement la vie fut exclusivement marine, avant les sorties massives, plusieurs fois, en différents endroits sous différentes formes, de l'océan vers 440 Ma pour les métazoaires « élaborés ». La grande crise d'extinction Permien-Trias jouera un rôle primordial avec 96 % d'extinction d'espèces, tant marines que continentales vers 251 Ma. L'explosion des espèces de plantes à fleurs, des insectes et de beaucoup d'autres groupes sur Terre vers 130-110 Ma fut déterminante après les radiations (explosions du nombre d'espèces à partir d'une seule, ancestrale) initiales dès le Dévonien puis surtout le Carbonifère. La coévolution entre plantes et pollini-

sateurs, 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 beaucoup plus grandes.

Enfin, n'oublions pas que la biodiversité est bien plus que la seule diversité spécifique, incluant à la fois les espèces et leur abondance relative. Le sens du mot « biodiversité » a été diversement explicité mais exprime globalement « l'information génétique que contient chaque unité élémentaire de diversité, qu'il s'agisse d'un individu, d'une espèce ou d'une population ». Ceci détermine son histoire, passée, présente et future. Même, cette histoire est déterminée par des processus qui sont eux-mêmes des composantes de la biodiversité. En fait, aujourd'hui on regroupe diverses approches sous ce terme : (1) l'étude des mécanismes biologiques fondamentaux permettant d'expliquer la diversité des espèces et leurs spécificités et nous obligeant à davantage étudier les mécanismes de la spéciation et de l'évolution, (2) les approches plus récentes et prometteuses en matière d'écologie fonctionnelle et de bio-complexité, incluant l'étude des flux de matière et d'énergie et les grands cycles biogéochimiques, (3) les travaux sur la nature « utile » pour l'humanité dans ses capacités à fournir des aliments, des substances à haute



valeur ajoutée pour des médicaments, produits cosmétiques... des sondes moléculaires ou encore à offrir des modèles ancestraux et originaux pour la recherche fondamentale et finalisée, afin de résoudre des questions agronomiques ou biomédicales 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, 11,5 Mt pour les pêches continentales, 19 Mt pour les algues (dont seulement 1 pour la pêche) et 65,6 Mt pour l'aquaculture (dont 20,3 Mt pour la mer), soit un total, tout confondu pour tous les groupes et tous les milieux aquatiques, d'environ 176 Mt. Phénomène lié 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 ¾ de tous les stocks sont pleinement exploités ou surexploités (31 %). 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 vivantes, ce sont aussi de l'ordre de 26 000 molécules d'intérêt pharmacologique (anticancéreux, antibiotiques, immunostimulants, immuno-supresseurs, facteurs de croissance, sondes molé-

culaires...) ou cosmétique et d'extraordinaires et forts pertinents modèles pour la recherche scientifique et les applications biomédicales ou agronomiques qui en découlent. Par exemple, la phagocytose et 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 du calmar, le choc anaphylactique grâce au venin de méduse... Toutes ces découvertes ont valu à leurs auteurs un Prix Nobel.

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 changement climatique. La circulation océanique est affectée par la circulation atmosphérique et les courants de surface sont sous la dépendance des vents. Ils mélangeant 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 (26-30 %) 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. Il est aujourd'hui 30 % plus acide qu'il y a 250 ans. Le phytoplancton océanique stocke également du CO₂ dans la couche de surface ainsi que tous les bio-calcificateurs. 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 changement 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 trois fois plus vite qu'il y

a une cinquantaine d'années. 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! C'est un océan vivant qui peut jouer tous ces rôles.

Ainsi, si le changement 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 surexplorations 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 (très longue stabilité).

Cela fait beaucoup et il est grand temps de réagir!



Biodiversité marine exploitée et changement climatique

Philippe Cury

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

LES ENJEUX DES PÊCHES MARINES

Le changement climatique modifie la productivité des écosystèmes marins et a un impact sur la pêche, notre dernière activité de prélèvements à l'échelle industrielle d'une ressource sauvage sensible aux fluctuations environnementales. La croissance démographique et les changements de comportements alimentaires entraînent une demande croissante de poisson destinée à la consommation humaine. Le poisson est aujourd'hui la principale source de protéines animales pour un milliard de personnes à travers le monde. Elle est aussi l'une des ressources renouvelables les plus échangées au niveau mondial: 28 Mt de poissons marins sont destinées aux marchés américains, européens et japonais qui représentent à eux seuls 35 % des captures mondiales avec plus des 2/3 des poissons capturés dans les zones de pêche situées dans les pays du sud (Swartz *et al.*, 2010). Dans

un contexte de changement climatique il apparaît que les répartitions géographiques des poissons ainsi que la dynamique des écosystèmes vont subir de profondes perturbations dans les décennies à venir et affecter les pêcheries au niveau mondial, compromettant la sécurité alimentaire dans nombre de pays du sud (Lam *et al.*, 2012).

LES EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA BIODIVERSITÉ MARINE

Les changements de température de l'eau, des teneurs en oxygène, de l'acidification, de la sévérité des événements extrêmes et des propriétés biogéochimiques océaniques influent sur la vie des organismes marins. Ils ont des effets directs ou indirects sur le métabolisme des individus (croissance,

respiration, etc.), sur les cycles de vie des espèces, sur les relations entre les proies et les prédateurs et sur les modifications des habitats. Ces modifications qui se produisent à la fois au niveau de l'individu, des interactions entre les espèces et des habitats engendrent des changements dans les assemblages d'espèces mais également dans la productivité et la résilience des écosystèmes (Gouletquer *et al.*, 2013).

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

Les résultats d'une analyse globale récente montrent que les changements dans la phénologie, la distribution et l'abondance sont très majoritairement (81 %) conformes aux réponses attendues dans un contexte de changement climatique (Poloczanska, 2013). Le calendrier de nombreux événements biologiques est ainsi devenu plus précoce concernant l'abondance maximale du phytoplancton et du zooplancton, la reproduction et la migration des invertébrés, des poissons et des oiseaux de mer. Ainsi, au cours des cinquante dernières années, les événements du printemps ont été décalés plus tôt pour de nombreuses espèces avec une progression moyenne de $4,4 \pm 0,7$ jour par décennie et les événements de l'été de $4,4 \pm 1,1$ jour par décennie. Pour l'ensemble des groupes taxonomiques, avec toutefois une grande hétérogénéité, on constate que la vitesse de déplacement en direction des pôles atteint $72,0 \pm 13,5$ km par décennie. Les changements de distribution des espèces benthiques, pélagiques et démersales ont atteint jusqu'à un millier de kilomètres. Ces changements

de distribution vers les pôles ont entraîné des augmentations du nombre d'espèces d'eau chaude par exemple dans la mer de Béring, la mer de Barents ou encore la mer du Nord. Ces changements latitudinaux et en profondeur de poissons benthiques et crustacés s'expliquent principalement grâce aux changements de température (Pinsky *et al.*, 2013). Ces vitesses de migration enregistrées en milieu marin apparaissent plus rapides qu'en milieu terrestre.

L'IMPACT SUR LES PÊCHERIES ET LA SÉCURITÉ ALIMENTAIRE MONDIALE

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

Des études complémentaires, prenant en compte d'autres facteurs que la température des océans, mettent en évidence la sensibilité des écosystèmes marins aux changements biogéochimiques et la né-



cessité d'intégrer des hypothèses probables de leurs effets biologiques et écologiques dans l'évaluation des impacts (Cheung *et al.*, 2011). Ainsi les projections en 2050 de la distribution et du potentiel de capture de 120 espèces de poissons et d'invertébrés démersaux exploités dans l'Atlantique Nord montrent que l'acidification des océans et la réduction de la teneur en oxygène pourraient réduire les performances de croissance et abaisser les potentiels de capture estimés (moyenne sur 10 ans de 2050 par rapport à 2005) de 20 à 30 % par rapport à des simulations faites sans tenir compte de ces facteurs. Les changements de la structure de la communauté phytoplanctonique pourraient de plus, réduire le potentiel de capture projetée d'environ 10 %. Ces résultats mettent en évidence la sensibilité des écosystèmes marins aux changements biogéochimiques (Cheung *et al.*, 2011). Les changements observés sont d'ores et déjà visibles dans la composition spécifique des captures de 1970-2006 qui sont en grande partie attribuables au réchauffement de l'océan à long terme (Cheung *et al.*, 2013). Le changement en milieu marin continuera de créer d'énormes défis et des coûts pour les sociétés dans le monde entier, en particulier ceux des pays en développement (Hoegh-Guldberg & Bruno, 2010).

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

La meilleure façon de lutter contre les effets du changement climatique est de préserver la biodiversité et d'éviter la surexploitation des espèces, qui est reconnue comme un facteur aggravant les effets du changement climatique (Perry *et al.*, 2010). L'approche écosystémique des pêches permet de réconcilier exploitation et conservation des espèces, c'est-à-dire qu'elle vise à maintenir l'intégrité et la résilience des écosystèmes. L'approche écosystémique des pêches contribue ainsi à cet enjeu crucial qu'est le maintien des écosystèmes marins en bonne santé et productifs, tout en proposant une nouvelle façon de considérer l'exploitation halieutique dans un contexte plus large (www.fao.org/fishery/eaf-net). Le rôle joué par

les Aires Marines Protégées (AMPs) permettant une protection des habitats marins et de la biodiversité et rendant ainsi les écosystèmes plus résilients, est crucial dans cet effort d'atténuation des changements climatiques (Roberts *et al.* 2017). La nécessité de développer une politique d'adaptation qui pourrait minimiser les impacts du changement climatique par le biais de la pêche doit devenir une priorité. Pour cela il faudra mieux anticiper les changements à l'aide de scénarios (sensu IPBES) et mettre en place les politiques publiques permettant de s'adapter aux changements produits dans les écosystèmes marins dans le cadre de l'Agenda 2030 des Nations Unies (Euzen *et al.* 2017). Même si l'impact des changements climatiques restera la plupart du temps inéluctable, l'adaptation des systèmes vivants à des changements rapides reste encore à comprendre et à quantifier, ce qui ouvre de nombreuses perspectives de recherches sur ce thème.

RÉFÉRENCES

- POLOCZANSKA E.S., HOEGH-GULDBERG O., CHEUNG W., PÖRTNER H.-O. and BURROWS M., 2014 – Cross-Chapter Box on Observed Global Responses of Marine Biogeography, Abundance, and Phenology to Climate Change. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press.
- BEAUGRAND G.P., REID C., IBANEZ F., LINDLEY J.A. and EDWARDS M., 2002 – *Reorganization of North Atlantic Marine Copepod Biodiversity and Climate*. Science, 296 : 1692-1694.
- CHEUNG W.W.L. et al., 2009 – *Large-Scale Redistribution of Maximum Fisheries Catch Potential in the Global Ocean under Climate Change*. Global Change Biology (2010) 16, 24 – 35.
- CHEUNG W.W.L., DUNNE J., SARMIENTO J. L. and PAULY D., 2011 – *Integrating Ecophysiology and Plankton Dynamics into Projected Maximum Fisheries Catch Potential under Climate Change in the Northeast Atlantic*. ICES Journal of Marine Science, 68 : 1008 – 1018.
- CHEUNG W., WATSON R. and PAULY D., 2013 – *Signature of Ocean Warming in Global Fisheries Catch*. Nature 497 : 365-368.
- EUZEN A., GAILL F., LACROIX D. and CURY P. (eds). 2017. *L'océan à découvert*. CNRS Editions. 318 pp.
- GOULLETQUER P., GROS P., BŒUF P. and WEBER J., 2013 – *Biodiversité en environnement marin*. QUAE Editions.
- HOEGH-GULDBERG O. and BRUNO J.F., 2010 – *The Impact of Climate Change on the World's Marine Ecosystems*. Science, 328, 1523-1528.
- LAM V.W.Y., CHEUNG W.W.L., SWARTZ W. and SUMAILA U.R., 2012 – *Climate Change Impacts on Fisheries in West Africa: Implications for Economic, Food and Nutritional Security*. African Journal of Marine Science, vol. 34, Issue 1, 2012: 103-117.
- PERRY I., CURY P. M., BRANDER K., JENNINGS S., MÖLLMANN C. and PLANQUE B., 2010 – *Sensitivity of Marine Systems to Climate and Fishing : Concepts, Issues and Management Responses*. Journal of Marine Systems 79 : 427 – 435.
- PINKSY M.L., WORM B., FOGARTY M.J., SARMIENTO J.L. and LEVIN S.A., 2013 – *Marine Taxa Track Local Climate Velocities*. Science, 341, 1239-1242.
- ROBERTS M.C., O'LEARY B.C., MCCUALEY D., CASTILLA J.C., CURY P., DUARTE C.M., PAULY D., SÁENZ-ARROYO A., SUMAILA U.R., WILSON R.W., WORM B. and LUBCHENCO J., 2017 – *Marine Reserves Can Mitigate and Promote Adaptation to Climate Change*. PNAS. 114 (24) 6167-6175.
- SWARTZ W., SUMAILA U.R., WATSON R. and PAULY D., 2010 – *Sourcing Seafood for the Three Major Markets: the Eu, Japan and the Usa*. Marine Policy 34 (6) : 1366-1373.



Surexploitation et pêche durable : quels enjeux pour aujourd’hui et pour demain ?

Didier Gascuel

Au cours du xx^e siècle, l’homme a progressivement mis en exploitation les ressources vivantes de l’Océan. L’accroissement des captures, s’est accompagné d’une diminution de la ressource et d’une généralisation des situations de surexploitation, caractérisée par une faible efficacité du système de production. En Europe, la pression de pêche baisse cependant depuis une quinzaine d’années, et un début de reconstitution des stocks exploités est observé. Mais pour assurer une pêche durable, il ne suffit pas d’ajuster la capture à la production biologique de chacun des stocks. C’est d’autant plus vrai que l’approche écosystémique des pêches et les effets attendus du changement climatique appellent à rehausser le niveau des exigences environnementales et à repenser la notion de pêche durable elle-même.

LA MISE EN EXPLOITATION DES OCÉANS

La pêche maritime est une activité millénaire et les premiers impacts sont anciens. Il y a déjà plusieurs siècles, ils ont pu être sévères pour les espèces les plus fragiles, des mammifères marins, certains sélaciens, des migrants comme l'esturgeon, ou des gisements de coquillages. Mais pendant très longtemps la pêche s'est limitée aux ressources côtières et à un petit nombre d'espèces soigneusement sélectionnées. De vastes portions des océans et de très nombreuses espèces sont restées peu affectées par l'homme. À la fin du xix^e siècle, l’Océan paraissait encore immense, et les scientifiques concluaient au caractère illimité des ressources marines.

C'est au xx^e siècle que l'homme a véritablement mis en exploitation des ressources vivantes de la mer, à l'échelle planétaire. Le mouvement, amorcé à la fin du siècle précédent avec l'apparition des moteurs et des chaluts, s'est amplifié après la seconde guerre mondiale, lorsque les grandes flottilles de pêche industrielle se sont développées et ont progressivement conquis tous les océans (Fig. 1). En quelques décennies, la puissance cumulée des navires a été multipliée par 10 (Bell et al. 2016), et la production par 5 (FAO 2018 et 2019). Le pic de production est atteint dès 1996, avec des captures mondiales déclarées de 87 millions de tonnes (source FAO), et qui pourraient attendre 130 millions de tonnes si on

prend en compte l'ensemble des rejets et des prises dites illégales, non déclarées ou non réglementées (source SAUP, Pauly et Zeller 2015). Depuis, les prises sont en nette diminution, notamment en raison de la surexploitation de très nombreux stocks. Chaque année, nous perdrions ainsi plus d'un million de tonnes.

L'accroissement des captures s'est accompagné d'une très forte diminution de l'abondance des stocks exploités. Plusieurs études estiment ainsi que la biomasse des grands poissons de fond et de certains prédateurs pélagiques aurait été divisée par 5 ou 10 au cours du xx^e siècle (Christensen et al. 2003, Worm et al. 2009, Juan-Jordà et al. 2011). Dans une synthèse basée sur l'analyse de 11135 pêcheries, Costello et al. (2008) montrent que 27 % des stocks halieutiques mondiaux auraient vu leur biomasse divisée au moins par 10, dont 9 % par 100 ou plus. À l'inverse, certaines espèces de poissons fourrages, ainsi que de nombreux mollusques ou crustacés pourraient avoir bénéficié du relâchement de préation lié à la surexploitation de leurs prédateurs. In fine, ceci compensant pour partie cela, la biomasse totale des espèces exploitables aurait été divisée par deux ou deux et demi à l'échelle mondiale, avec d'évidentes répercussions sur l'ensemble des réseaux trophiques et sur le fonctionnement des écosystèmes marins (Gascuel et al. 2019).

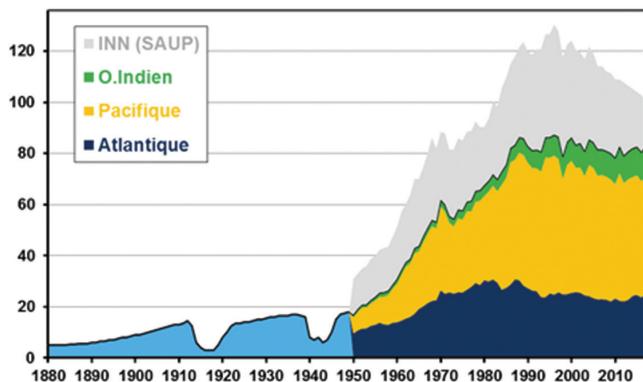


Fig.1 — Évolution entre 1880 et 2017 de la production mondiale des pêches maritimes (hors algues), en millions de tonnes. 1880-1949: reconstitution empirique d'après la littérature scientifique. 1950-2017: sources FAO 2019, et Sea Around Us Project (SAUP) pour les pêches illégales et non déclarées (INN).

LA SUREXPLOITATION... N'EST PAS CE QUE VOUS CROYEZ

Le grand public confond souvent durabilité et équilibre, imaginant que la nature nous fournit chaque année une production que nous pourrions prélever sans impact. Ce serait le banquet de Dame Nature, offert à notre appétit. Et la surexploitation serait dès lors cet excès de boulimie qui nous conduit à « prélever plus que le stock ne produit ». En réalité, les choses ne se passent pas ainsi. En l'absence de pêche, la production biologique nette d'une population naturelle est théoriquement nulle. Les mortalités naturelles compensent tout juste les gains de biomasse liés à la reproduction ou à la croissance des individus, et la population s'ajuste ainsi à la capacité biotique du milieu. Inéluctablement, le premier pêcheur capture donc plus que le stock ne produit. Il impacte nécessairement la ressource, dont la biomasse diminue. Et ceci jusqu'au point où la baisse de compétition intra-spécifique qui en résulte compense l'ajout de la pression de pêche. Si la pression de pêche n'augmente pas à nouveau, il s'instaure alors un nouvel état d'équilibre.

Le « je pêche plus que le stock produit » ne désigne donc qu'une situation de transition entre deux états du stock, vers un équilibre certes plus bas que le précédent, mais qui ne traduit pas nécessairement une situation de surexploitation. *A contrario*, un stock de biomasse très faible, dont la production biologique est également faible, peut être maintenu dans cet état peu désirables. Il suffit pour cela de ne pas pêcher plus que le stock produit. On maintiendra alors une situation de surexploitation équilibrée (au moins sur le moyen terme, sans tenir compte des éventuelles évolutions écosystémiques ou dérives génétiques). *In fine*, l'extinction du stock est d'ailleurs le cas ultime de l'équilibre parfait, dans laquelle il est certain qu'on ne pêchera rien... C'est-à-dire « pas plus que le stock produit ». Ce qui n'est pas, chacun en conviendra, une situation de bonne gestion des pêches !

La surexploitation n'a donc rien à voir avec le déséquilibre. Elle traduit une situation très particulière au

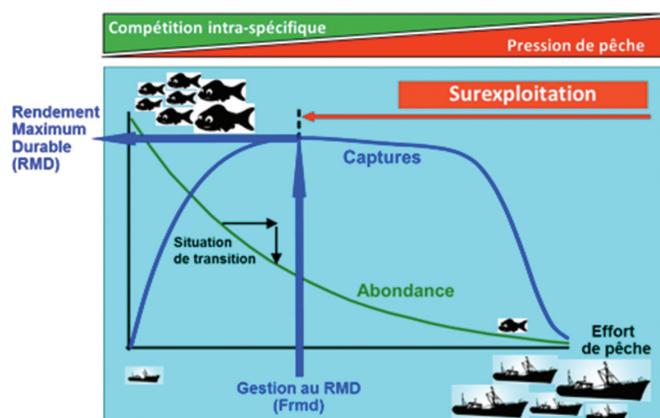


Fig.2 — Schéma conceptuel de l'évolution de l'abondance d'un stock exploité et des captures résultantes, pour un effort de pêche croissant (courbes à l'équilibre). Notion de surexploitation, et principe de la gestion dite au « Rendement Maximum Durable (RMD) ».

secteur des pêches. Dans tous les autres secteurs d'activité, on admet que lorsque les moyens de production augmentent, la production augmente à son tour. Plus de capital et de travail investis entraîne une fonction de production croissante. Plus d'ouvriers et de machines-outils fabriquent plus d'automobiles. Dans certains domaines, en agriculture par exemple, on admet que la production peut tendre vers une valeur asymptotique. Plus de tracteurs dans un champ n'augmente pas indéfiniment la production. En matière de pêche, la dynamique est différente. Au-delà d'un seuil, lorsque les moyens de production augmentent la production diminue. Plus de bateaux, plus gros, plus performants, avec plus d'appareillage électronique et plus d'innovation (les halieutes parlent d'accroissement de l'effort ou de la pression de pêche), conduisent à des captures plus faibles. Et la raison fondamentale en est que la ressource naturelle est affectée. La capture baisse parce que l'impact écologique est trop important, parce que le capital écologique est affecté au-delà du « raisonnable ».

La notion de surexploitation désigne ces situations de fonction de production décroissante. Elle caractérise, en réalité, un système de production devenu fou, une situation dans laquelle on dépense plus d'agent, plus de travail, plus de gasoil... pour

finalement pêcher moins. Comme si dans une industrie automobile on rajoutait aux machines-outils qui construisent les voitures d'autres machines coûteuses chargées de détruire une partie de la production! Une partie du travail des pêcheurs pour capturer du poisson, et une autre pour détruire les poissons du lendemain! Autrement dit, la surexploitation désigne cette situation étrange, où il faut convaincre les pêcheurs de rester chez eux une partie du temps. Ils permettraient ainsi au stock de se reconstituer, et en tireraient in fine une capture annuelle supérieure.

Fondamentalement, les situations de surexploitation traduisent donc une inefficacité du système de production. Les pêcheurs en sont tout à la fois les artisans et les victimes les plus directes. Ils le paient d'une rentabilité économique faible, et souvent de captures plus fluctuantes. Bien sûr, la ressource est elle aussi affectée, avec des biomasses qui sont faibles et une troncation des structures démographiques. Nul doute que ces situations doivent être évitées. Même si le « comment » fait débat, ce principe fait consensus parmi tous les acteurs du système pêche.

Dès les années 1930, les premiers biologistes des pêches ont identifié le risque de surexploitation et appellés à une limitation de l'effort de pêche. L'idée s'est concrétisée après-guerre, lorsque les Etats Unis ont pris l'initiative de proposer la « gestion au rendement maximum durable (RMD) » comme norme internationale de la bonne gestion des pêches. Cette norme a été formellement adoptée par les Nations Unies dès 1955, et inscrite dans le Droit de la mer de 1982. Pour chacun des stocks exploités, l'objectif est ainsi de fixer l'effort de pêche au niveau qui permet la capture maximale, en valeur moyenne sur le long terme. Ni trop peu de bateaux, qui capturent peu. Ni trop, qui laisseraient dans la mer une biomasse résiduelle insuffisante pour assurer durablement des captures élevées. La gestion au RMD est donc celle qui assure – tout juste – l'absence de surexploitation.

PÊCHE DURABLE,

OÙ EN SOMMES-NOUS ?

Il est ainsi devenu d'usage courant et universel d'appeler « pêche durable » toute situation dans laquelle le stock n'est pas surexploité, et en particulier les situations où sont atteints les objectifs de la gestion au RMD. Contrairement à ce que croit souvent le grand public, cette pêche durable n'est donc pas définie par un objectif d'équilibre visant à préserver la ressource, mais par un objectif de maximisation des captures sur le long terme et pour chacun des stocks exploités.

Pour atteindre cet objectif, les différents États de la planète ont progressivement mis en œuvre des mesures de limitation de l'effort de pêche. Pour les grands stocks océaniques, qui représentent la majeure partie des captures et qui sont souvent partagés entre différents pays et différentes pêcheries, quelques décennies d'expérience ont montré que la méthode la plus efficace est de limiter directement les captures en instaurant des quotas de pêche. Le Droit de la mer s'est adapté à cette réalité, en donnant aux États des pouvoirs de police des pêches très étendus au sein de leurs Zones économiques exclusives (*i.e.* jusqu'à 200 miles nautiques soit environ 360 km des côtes). À partir des années 1980, les grands pays développés ont ainsi adopté des politiques de quotas de plus en plus contraignantes. Des succès incontestables ont été enregistrés pour certains stocks, notamment aux USA, en Australie ou en Europe. Force est néanmoins de constater que ces succès ont été insuffisants pour empêcher l'accroissement vertigineux de l'effort de pêche à l'échelle mondiale et la démultiplication des situations de surexploitation dans la plupart des océans de la planète.

Les évaluations de la FAO (2018) montrent ainsi que 33 % des stocks mondiaux faisant l'objet d'une évaluation scientifique sont aujourd'hui surexploités. Ce chiffre est malheureusement en augmentation constante, avec une pression de pêche qui continue à s'accroître très fortement, principalement en Asie. D'autres analyses fournissent une image encore plus pessimiste. Costello *et al.* (2016) estiment par exemple, d'après les statistiques de capture de 4 713 pêcheries mondiales (soit 78 % des captures), que

68 % des stocks sont aujourd'hui surexploités ou à des niveaux de biomasses trop faibles pour fournir le RMD. En valeur médiane, la pression de pêche serait égale à 1,5 fois la valeur cible. Quant à la biomasse, elle n'atteindrait que 78 % de l'objectif visé.

L'Europe de son côté a été longtemps le mauvais élève de la classe des pays développés. Faute de volonté politique partagée dans un espace politique en construction, la pression de pêche s'est accrue jusqu'à la fin des années 1990. On estime ainsi que près de 90 % des grands stocks européens étaient alors surexploités, avec un taux de prélèvement annuel moyen de l'ordre de 45 % des biomasses présentes (Gascuel *et al.* 2016). Les quotas de pêche n'ont commencé à devenir réellement restrictifs qu'à partir de 1998 et la norme de gestion au rendement maximal durable n'a été formellement adoptée qu'en 2005. En quelques années, les mesures prises et le renforcement des moyens de contrôle ont cepen-

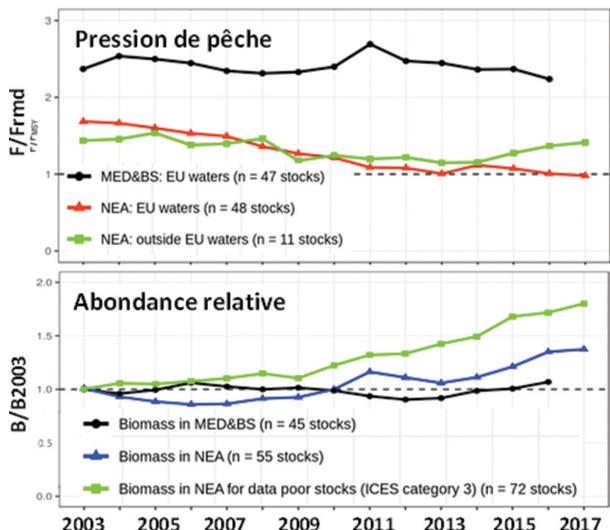


Fig.3 — Evolution des indicateurs de pression de pêche et d'abondance moyenne des stocks exploités en Europe (STECF 2019). Les indicateurs sont calculés pour l'ensemble des stocks évalués par le Conseil international pour l'exploitation de la mer (CIEM). Haut : valeur relative de la pression de pêche par rapport à l'objectif d'une gestion au RMD (en Méditerranée & mer Noire, et en eaux européennes ou non-européennes de l'Atlantique Nord-Est). Bas : abondance relative comparativement à 2003 (en Méditerranée & mer Noire, et en Atlantique Nord-Est pour les stocks bien connus et pour ceux pauvres en données).



dant permis un véritable renversement de tendance. Les dernières évaluations disponibles (STECF 2019) montrent que le taux de prélèvement a divisé par presque deux dans les eaux européennes de l'Atlantic nord-est. En valeur moyenne, il est désormais proche de l'objectif d'une gestion au RMD (Fig. 3).

Parallèlement, la biomasse moyenne des stocks évalués dans cette zone aurait augmenté de 40 % pour les stocks les mieux connus, et sans doute d'avantage si on en croit les données partielles disponibles à une échelle plus large. On partait cependant de tellement bas que les abondances restent encore faibles, nettement inférieures au niveau qui produira le fameux rendement maximum durable. Par ailleurs, les valeurs moyennes cachent de fortes disparités. Au dernier pointage, 41 % des stocks considérés sont encore surexploités dans les eaux européennes de l'Atlantique (STECF 2019). Et surtout, aucune amélioration n'est enregistrée coté Méditerranée, où seul le stock emblématique de thon rouge est soumis à quotas. La situation en Europe reste donc fragile. L'évolution récente montre cependant une chose très importante : des mesures efficaces peuvent être prises pour réduire la pression de pêche, et cette réduction permet aux stocks de se reconstituer. Il y a là une évidente bonne nouvelle. Pour peu que la volonté politique existe, nous ne sommes pas condamnés au déclin inexorable et à la généralisation de la surpêche. Il est possible de retrouver des stocks en bon état.

APPROCHE ÉCOSYSTÉMIQUE ET CHANGEMENT CLIMATIQUE : LES NOUVEAUX ENJEUX DE LA RÉSILIENCE

Reste évidemment une question essentielle : les progrès réalisés sont-ils à la hauteur des enjeux actuels ? Même en admettant que la norme de la gestion au RDM s'imposera partout et conduira aux reconstitutions de stock espérées (ce qui est encore très loin d'être acquis), nous assure-t-elle réellement une pêche durable sur le long terme ? Deux considérations principales conduisent à en

douter et incitent à revisiter la question des normes de gestion.

Il faut en premier lieu souligner que la démarche aujourd'hui mise en œuvre, notamment en Europe, s'est construite essentiellement sur la base des représentations mentales et des modèles développés il y a plus de cinquante ans, dans le cadre d'une approche dite mono-spécifique. Implicitement, on admet ainsi que gérer chacun des stocks isolément, selon la norme du RMD, conduit à une pêche globalement durable. Comme si les stocks n'interagissaient pas entre eux et avec l'ensemble des compartiments de l'écosystème. Comme si la réduction de biomasse imposée à chacun n'avait pas de répercussion sur leurs proies, compétiteurs ou prédateurs, et finalement – pas des effets en chaîne – sur toute la structure et le fonctionnement des réseaux trophiques. A contrario, l'idée s'est progressivement imposée qu'il faut à l'évidence dépasser cette approche, et mettre en œuvre ce qu'on appelle désormais l'approche écosystémique des pêches (Garcia 2003, Cury et Gascuel 2017). Celle-ci impose de prendre en compte l'ensemble des impacts. Ceux qui affectent chacun des compartiments de l'écosystème, mais également les réseaux trophiques ou les habitats, et plus généralement les caractéristiques de productivité, de stabilité ou de résilience des écosystèmes. Il ne fait ici guère de doute que réduire l'impact direct sur chacun des stocks exploités est un enjeu fort pour réduire l'impact global à l'échelle de l'écosystème.

Autrement dit, la maximisation des captures à long terme ne suffit pas. De manière assez paradoxale, l'approche écosystémique nous invite à repenser la pêche durable, en regardant le vieux modèle et tout particulièrement la courbe qui mesure l'impact de l'exploitation sur la biomasse de chacun des stocks exploités. Il faut ici souligner qu'en l'absence de mesures spécifiques de protection des juvéniles, la norme du RMD conduit à une division par deux et demi ou trois de l'abondance du stock considéré, comparativement à une situation sans pêche. Qui pourrait garantir qu'un tel impact, répété sur chacun des stocks, est vraiment durable ? Ceci est d'autant

plus vrai que l'instauration de mesures de sélectivité permettrait généralement de maintenir des captures élevées tout en limitant la réduction des biomasses. En ne pêchant que les plus gros poissons, on pourrait tout à la fois maintenir la production et accroître très fortement la biomasse résiduelle laissée dans l'eau (Froese et al. 2016).

Une seconde raison majeure invite à repenser la norme de gestion. Elle a pour nom « Changement climatique ». On sait que celui-ci a déjà des effets très significatifs, non seulement sur la distribution des espèces, mais aussi sur la productivité et la stabilité des écosystèmes marins (Cheung et al. 2010, Gascuel 2019). Et ces effets iront évidemment en amplifiant. Ici aussi, réviser à la hausse l'ensemble des mesures de protection de la ressource s'impose comme une évidente nécessité. Réduire l'impact de la pêche, reconstruire des ressources et plus généralement des écosystèmes en bonne santé apparaît comme la meilleure adaptation possible face aux effets attendus du changement climatique. Des niveaux de biomasse élevés sont notamment le gage d'une plus grande diversité fonctionnelle et donc d'une plus forte résilience de l'écosystème. En outre, de nombreux travaux de modélisation montrent que renoncer à la maximisation des captures, en acceptant des prises légèrement plus faibles aurait un double avantage.

D'un côté, la réduction de l'impact ainsi engendrée améliorerait significativement le fonctionnement et la stabilité de l'écosystème (Worm et al. 2009). De l'autre, la réduction des coûts d'exploitation compenserait largement la perte de capture et contribuerait ainsi à améliorer la rentabilité de l'exploitation (Gordon 1954). Des objectifs d'optimisation économique ou de résilience écologique conduisent ainsi à admettre une situation de sensible sous-exploitation.

Au plan international, la gestion au RMD reste aujourd'hui la norme de la bonne gestion des pêches. De nombreux États courrent encore derrière cette norme. L'Europe s'en approche progressivement, tandis que d'autres pays semblent encore très loin, notamment en Asie ou dans les pays en développement. À l'inverse, quelques pays vont déjà au-delà, en adoptant des normes de gestion plus précautionneuses. C'est par exemple le cas aux USA ou en Australie. *In fine*, ce que nous dit la situation des différents pays c'est que la notion de pêche durable n'est pas une vérité scientifique établie une fois pour toutes. C'est une construction sociale qui découle des rapports de force entre les acteurs du système pêche, des représentations et valeurs de la société, ou des arbitrages du politique. C'est une construction dont dépend l'avenir de l'Océan et dont l'ensemble des citoyens ferait bien de se saisir.



RÉFÉRENCES

- BELL J.D. et al., 2016 – *Global Fishing Capacity and Fishing Effort from 1950 to 2012*. Fish and Fisheries, 18(3): 489-505.
- CHEUNG W.W.L. et al., 2010 - *Large-Scale Redistribution of Maximum Fisheries Catch Potential in the Global Ocean under Climate Change*. Global Change Biology, 16: 24–35.
- CHRISTENSEN V. et al., 2003 – *Hundred-Year Decline of North Atlantic Predatory Fishes*. Fish and Fisheries, 4: 1-24.
- COSTELLOS C. et al., 2008 – *Can Catch Shares Prevent Fisheries Collapse?* Science, 321: 1678_1681.
- COSTELLOS C. et al., 2016 – *Global Fishery Prospects under Contrasting Management Regimes*. PNAS, 113: 5125-5129.
- CURY P. and GASCUEL D., 2017 – *L'approche écosystémique: la silencieuse révolution des pêches*. In: EUZEN A., GAILL F., LACROIX D. and CURY P. – *L'Océan à découvert*, CNRS Editions, 268-269.
- FAO, 2018 – *La situation mondiale des pêches et de l'aquaculture 2018. Atteindre les objectifs de développement durable*. Rome. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
- FAO, 2019 – *Système mondial de l'information sur les pêches (FIGIS)*. Accessible en ligne sur : www.fao.org/fishery/figis/fr
- FROESE R. et al., 2016 – *Minimizing the Impact of Fishing*. Fish and Fisheries, 17(3): 785–802
- GARCIA S., 2003 - *The Ecosystem Approach to Fisheries: Issues, Terminology, Principles, Institutional Foundations, Implementation and Outlook*. FAO Fisheries Technical Paper, Rome (Italie), 443, 71 p.
- GASCUEL D., 2019 – *Pour une révolution dans la mer, de la surpêche à la résilience*. Actes Sud ed. (Paris), Collection Domaine du possible, 529 p.
- GASCUEL D., et al., 2016 – *Fishing Impact and Environmental Status in European Seas: a Diagnosis from Stock Assessments and Ecosystem Indicators*. Fish and Fisheries, 17: 31-55.
- GORDON H.S., 1954 – *The Economic Theory of a Common-Property Resource: the Fisheries*. Journal of political economy, 62: 124-142.
- JUAN-JORDÀ M.J. et al., 2011 – *Global Population Trajectories of Tunas and their Relatives*. PNAS, 108: 20650-20655.
- PAULY D. and ZELLER D., 2015 – *Catch Reconstructions Reveal that Global Marine Fisheries Catches Are Higher Than Reported and Declining*. Nature Communication, 7: 10244.
- STECF, 2019 – *Monitoring the Performance of the Common Fisheries Policy* (Stecf-Adhoc-19-01). Publication Office of the European Union, Luxembourg, 101 p.
- WORM B. et al., 2009 – *Rebuilding Global Fisheries*. Science, 325: 578-585.

Aquaculture et changements globaux

Marc Metian

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

L'aquaculture, activité de production animale ou végétale en milieu aquatique, est actuellement en plein essor. Cette activité ancestrale, proche de l'agriculture, connaît une croissance exponentielle depuis les années 1980 et fournit aujourd'hui plus de la moitié des poissons et de crustacés sur les marchés mondiaux et ce, dans une période où les volumes de pêche stagnent.

L'aquaculture devrait, sans aucun doute, être touchée par les changements climatiques. À travers les différents documents publiés sur ce point¹, il apparaît clair que les conditions environnementales globales prédictes affecteront le secteur aquacole. Il est cependant important de noter que tous les impacts ne seront pas uniquement négatifs. En effet, les changements climatiques vont potentiellement créer des opportunités de développement pour des

pays/régions dont la production est actuellement réduite.

À la différence des produits issus de la pêche, l'intervention humaine est présente sur l'ensemble du cycle de vie (mis à part quelques exceptions²), ce qui implique qu'une adaptation³ aux effets des changements climatiques via l'action des acteurs est potentiellement réalisable. Ce sont la sévérité des conditions environnementales, les coûts et les capacités d'adaptation des acteurs de l'activité mais aussi des décideurs nationaux et supranationaux qui feront de ces adaptations une réussite.

1 Cf. Références recommandées.

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

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



RISQUES DIRECTS DES CHANGEMENTS GLOBAUX SUR L'AQUACULTURE

La production mondiale de l'aquaculture a atteint un niveau record en 2017 avec 111,0 millions de tonnes (équivalent poids frais; valeur de 242,8 milliards de US dollars), dont 79,2 millions de tonnes de produits consommables (231,0 milliards de dollars US) et 31,8 millions de tonnes de végétaux aquatiques (principalement des algues; valeur: US\$ 11,8 milliards). Les changements climatiques mettront en péril certaines productions aquacoles mais l'envergure de ces impacts n'est pas quantifiable actuellement en l'absence de modèles globaux prenant

Table 1. Synthèse des conséquences sur les océans et les zones côtières du changement climatique qui affecteront l'aquaculture (d'après Allison et al. 2011).

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

en compte l'ensemble des effets directs et indirects des changements globaux. Une chose est sûre, il y aura des effets sur la production qui eux-mêmes se répercuteront sur l'Homme. En effet, la demande du marché mondial pour les produits de la pêche et de l'aquaculture est de plus en plus importante et les produits aquacoles constituent des aliments nutritifs pour les pays développés et en développement (viz. contribution à la sécurité alimentaire), et constituent une source de revenus à dans toutes les communautés, indépendamment du niveau de vie. Parmi les conséquences du changement climatique qui affecteront l'aquaculture, les impacts directs seront essentiellement liés à l'évolution des conditions de production. La production moyenne sera ainsi impactée, non seulement en milieu marin (Table 1) mais aussi en zones continentales (eaux douces et saumâtres) où la majorité de la production mondiale est concentrée. Ces zones de production, sont plus sensibles aux changements. À titre d'exemple, il est prévu, que le réchauffement climatique et l'augmentation globale de la température des eaux de surface qui en résulte impacteraient bien plus significativement l'aquaculture dans ces zones qu'en milieu marin (viz. changement de la plage de la température optimale des organismes actuellement cultivés).

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

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

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

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

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

VULNÉRABILITÉS DIVERSES ET TYPES DE PRODUCTION TRÈS VARIÉS

L'aquaculture n'est pas pratiquée de manière uniforme à travers le monde et ce fait doit être considéré pour faire une évaluation pertinente des impacts potentiels du changement climatique. Le changement climatique est susceptible de se manifester à des degrés variables en fonction des zones géographiques avec pour conséquence des impacts différents. Ainsi, il faut garder à l'esprit que l'aquaculture est principalement présente dans trois régimes climatiques⁴ (tropical, subtropical et tempéré), dans trois types d'environnement (mers, eaux douces et eaux saumâtres) et concerne des taxa très variés. Pour ce dernier point, il est clair que certaines espèces seront plus tolérantes que d'autres aux changements et certaines seront plus enclines à subir des changements plus spécifiques (acidification des

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

océans susceptibles d'affecter principalement les organismes calcifiants tels que les bivalves; production de 15,8 millions de tonnes en 2017).

L'Asie représente à elle seule environ 92 % de la production aquacole mondiale en volume avec la Chine pour principal pays producteur dont la production de poissons représente près des deux tiers de la production mondiale et contribue de manière significative à la nutrition du peuple chinois. La production aquacole asiatique est caractérisée par la diversité des espèces élevées et de systèmes de production utilisés. Cependant, l'aquaculture continentale (eau douce ou saumâtre) domine toujours la production de ce continent où la mariculture de poissons reste toujours sous-exploitée alors qu'à l'inverse, d'autres pays/régions se reposent presque exclusivement sur ce type d'aquaculture (ex. Saumon en Norvège).

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

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

Parmi les différents changements globaux, il y en a un qui est régulièrement mis sur le devant de la scène et dont les premiers effets se sont fait déjà ressentir sur la production conchylicole de la côte ouest des États-Unis: l'acidification des océans. Les effets néfastes associés sont, pour l'instant, bien démontrés pour 2 groupes clefs produits en aquaculture: les bivalves et les crustacés. La présence plus impor-



tante de CO₂ dissous dans les eaux marines peu agir plus généralement à 3 niveaux sur les organismes marins: (1) la limitation des carbonates disponibles, affectant essentiellement les organismes calcifiants, (2) l'augmentation des ions H + ce qui se traduit par diminution du pH – l'acidification du milieu proprement dite – et, (3) l'augmentation de la pression partielle de CO₂ dans les organismes, ce qui se traduirait par une hyperacnie.

L'impact socio-économique sera non négligeable notamment sur la production de crustacés. En effet, en 2017, les crustacés d'élevage représentaient 7 % (8,4 millions de tonnes) du volume de la production de l'aquaculture destinée à la consommation humaine mais 25 % (US \$ 61,1 milliards) en valeur. La production de mollusques (17,4 millions de tonnes), bien que plus de deux fois supérieure à celle des crustacés, ne représentait que la moitié de sa valeur. Il existe des tentatives pour faire face aux impacts des changements climatiques sur les différents systèmes de culture notamment l'utilisation de cages ou de systèmes fermés.

RISQUES INDIRECTS DES CHANGEMENTS GLOBAUX SUR L'AQUACULTURE

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

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

l'agriculture et de la pêche minotière, dont les aliments aquacoles sont composés seront touchés par changements climatiques.

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

Les changements récents dans la distribution et la productivité d'un certain nombre d'espèces de poissons peuvent être attribués avec une grande confiance à la variabilité du climat régional, comme le El Nino-oscillation austral. Il y a de fortes interactions entre les effets de la pêche et les effets du climat. La fréquence et l'intensité des événements climatiques extrêmes sont également susceptibles d'avoir un impact majeur sur la production de la pêche et donc indirectement sur l'aquaculture.

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

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Des solutions pour que l'aquaculture puisse faire face aux changements climatiques existent ou existeront. La résilience de l'aquaculture *sensus lato* face aux chocs inattendus a déjà fait ses preuves. On peut citer notamment le court laps de temps qu'il a fallu à une

grande partie de l'Asie pour changer d'espèce de crevettes lorsqu'une espèce était fortement atteinte par un virus (et que cette dispersion fut régionalement importante) ou la rapidité avec laquelle certains pays touchés par des événements climatiques dévastateurs se sont remis à la production à des niveaux quasi similaires très rapidement.

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

Dans le même temps, il est important que l'évolution des pratiques d'aquaculture soit le plus possible respectueuses de l'environnement, ce qui comprend l'utilisation efficace des ressources comme l'eau, la terre, l'énergie et les nutriments dans les systèmes agricoles. Des améliorations dans la formulation des aliments utilisés sont en cours et devront être effectuées, notamment, en ce qui concerne sur l'inclusion des ressources marines comme ingrédients (réduction ou alternatives comme des coproduits provenant des usines de filetage de poisson). Une aquaculture, plus respectueuse de l'environnement, peut

aussi passer par la mise en place de programme de certification et même si des programmes existent, des débats sont actuellement en cours à ce sujet de la notion d'aquaculture durable. Il est à noté à ce sujet que la situation actuelle n'est pas si mauvaise que ce qui est relayé par les médias car même si elle n'est pas encore parfaite, la production aquacole est globalement plus efficaces énergiquement et en termes de facteurs de conversion (aliment – produit) que les autres systèmes de productions animales terrestres et est relativement moins dégradantes pour l'environnement que ces homologues agricoles.

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

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

RÉFÉRENCES

- ALLISON E.H., BADJECK M.-C. and MEINHOLD K., 2011 – *The Implications of Global Climate Change for Molluscan Aquaculture, in Shellfish Aquaculture and the Environment*. Ed S. E. Shumway, Wiley-Blackwell, Oxford, UK. doi: 10.1002/9780470960967.ch17
- BRANDER KM (2007) Global fish production and climate change. PNAS 104 (50): 19709–19714
- COCHRANE K., DE YOUNG C., SOTO D. and BAHRI T., 2009 – *Climate Change Implications for Fisheries and Aquaculture: Overview of Current Scientific Knowledge*. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper. No. 530. Rome, FAO. 212p.
- DE SILVA S.S. and SOTO D., 2009) – *Climate Change and Aquaculture: Potential Impacts, Adaptation and Mitigation*. In: COCHRANE K., DE YOUNG C., SOTO D. and BAHRI T. (eds.) – *Climate Change Implications for Fisheries and Aquaculture: Overview of Current Scientific Knowledge*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, pp. 151–212.



- DONEY S.C., FABRY V.J., FEELY R.A. and KLEYPAS J.A., 2009 – *Ocean Acidification: the Other CO₂ Problem*. Annual Review of Marine Science 1: 169–192.
- FAO (Food and Agriculture Organization), 2018 – *The State of World Fisheries and Aquaculture*. FAO Fisheries and Aquaculture Department. Rome. 210 pp.
- HANDISYDE N.T., ROSS L.G., BADJECK M.-C. and ALLISON E.H., 2006 – *The Effects of Climate Change on World Aquaculture: a Global Perspective*. Final Technical Report. DFID Aquaculture and Fish Genetics Research Programme, Stirling Institute of Aquaculture, Stirling, U.K., 151 pp.
- www.aqua.stir.ac.uk/GISAP/climate/index.htm
- MERINO G., BARANGE M., BLANCHARD J.L., HARLE J., HOLMES R., ALLEN I., ALLISON E.H., BADJECK M.C., DULVY N.K., HOLT J., JENNINGS S., MULLON C. and RODWELL L.D., 2012 – *Can Marine Fisheries and Aquaculture Meet Fish Demand from a Growing Human Population in a Changing Climate?* Global Environmental Change 22:795–806.
- MERINO G., BARANGE M. and MULLON C., 2010 – *Climate Variability and Change Scenarios for a Marine Commodity: Modelling Small Pelagic Fish, Fisheries and Fishmeal in a Globalized Market*. Journal of Marine Systems 81: 196–205.
- TROELL M., NAYLOR R., METIAN M., BEVERIDGE M., TYEDMERS P., FOLKE C., ÖSTERBLOM H., DE ZEEUWA A., SCHEFFER M., NYBORG K., BARRETT S., CRÉPIN A.-S., EHRLICH P., LEVIN S., XEPAPADEAS T., POLASKY S., ARROW K., GREN A., KAUTSKY N., TAYLOR S. and WALKER B., 2014 – *Does Aquaculture Add Resilience to the Global Food System?* Proceedings of the National Academy of Sciences 111 (37) : 13257–13263.
- TACON A.G.J., METIAN M. and DE SILVA S.S., 2010 – *Climate Change, Food Security and Aquaculture : Policy Implications for Ensuring the Continued Green Growth & Sustainable Development of a Much Needed Food Sector*. Chapter 2. In: Proceeding of the Workshop on Advancing the aquaculture agenda : policies to ensure a sustainable aquaculture sector, French Ministry for Food, Agriculture and Fisheries and OECD (15- 16 April 2010), pp 109-120.
- TACON A.G.J. and METIAN M. 2008 – *Global Overview on the Use of Fish Meal and Fish Oil in Industrially Compounded Aquafeeds: Trends and Future Prospects*. Aquaculture 285 (1-4): 146-158.

Arctique : opportunités, enjeux et défis

Emmanuelle Quillérou
Mathilde Jacquot
Annie Cudennec
Denis Bailly
Anne Choquet
Laure Zakrewski

L'Arctique est, dans l'esprit collectif, un désert blanc et glacé, associé aux ours polaires et aux explorateurs. On trouve pourtant des populations et plusieurs activités économiques établies en Arctique, à travers l'Arctique, ou à la périphérie du cercle polaire arctique, lui conférant de multiples visages. La fonte de la banquise induite par le changement climatique a rouvert la question de l'accès aux ressources naturelles, aux routes maritimes et aux zones touristiques polaires. Les nouvelles opportunités de développement économique en Arctique sont extrêmement attractives pour les entreprises qui y voient des gains potentiels très élevés, mais au prix de forts coûts financiers, environnementaux et sociaux et d'investissements financièrement très risqués. La sécurisation accrue de l'accès aux ressources de l'Arctique pourrait signaler le début possible d'une « ruée vers le froid ». Malgré quelques déclarations médiatisées entre utopie et réalité, cette « ruée vers le froid » ne semble pas s'être encore pleinement matérialisée, ralentie par les investissements conséquents requis mais aussi des considérations diplomatiques, juridiques et sociales. Le défi majeur pour les décideurs publics est de concilier avec succès les perspectives et intérêts des différents acteurs en Arctique, du niveau local à international, et de renforcer de la capacité institutionnelle existante au rythme du développement économique. L'enjeu de cette conciliation est la réalisation du potentiel de création de richesses et de bien-être, avec des bénéfices mutuels et une répartition juste de ces bénéfices. Les choix effectifs des États de l'Arctique et des entreprises privées pour le développement économique, la coordination et la coopération, façoneront la réalité de l'Arctique de demain.

L'Arctique fait référence à une zone océanique autour du pôle Nord, en partie recouverte de banquise et entourée de terres gelées. La région arctique ne possède pas de frontières géographiques clairement établies, et sa population est comprise entre 4 et 10 millions d'habitants selon les limites considérées (Ahlenius et al., 2005 p. 6 & 14; Ministère des Affaires Étrangères de Norvège, 2015, p. 5; Duhaime et Caron, 2006). L'Arctique peut être divisé en deux zones: d'une part l'océan Arctique bordé de cinq États (Canada, Danemark avec le Groenland et les îles Féroé, États-Unis d'Amérique,

Fédération de Russie et Norvège), et d'autre part la région arctique, zone plus vaste qui inclut tous les États dont les territoires se situent à l'intérieur du cercle Arctique, c'est-à-dire les cinq États riverains de l'océan Arctique plus trois États non riverains (Islande, Finlande et Suède).

L'Arctique fait partie du système climatique mondial, avec un rôle dans la redistribution de chaleur par les courants océaniques entre pôle Nord et équateur, ainsi que la redistribution de chaleur et nutriments entre les eaux de surface et les plaines abyssales



profondes (Plateforme Océan et Climat, 2015). L'Arctique est considéré comme une sentinelle avancée démontrant les impacts des changements climatiques à venir (L'Arctique – Sentinelle avancée du réchauffement climatique. Journée-débats co-organisée par la France et la Norvège, Paris, 17 mars 2015; Dahl, 2015). Les impacts du changement climatique mondial sont plus forts et plus rapides en Arctique que dans les autres régions du globe. En plus de cette sensibilité plus forte aux impacts venus d'ailleurs, l'« amplification polaire » fait que les émissions et pollutions en Arctique même y sont plus dommageables qu'ailleurs (Crate, 2012).

La banquise de l'Arctique se rétrécit et s'amincit de manière très visible, en raison de l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre d'origine anthropique dans l'atmosphère, avec des périodes sans banquise (Serreze et al., 2007; Boé et al., 2009; Kwok et Rothrock, 2009; Parkinson, 2014; Speich et

al., 2015; US National Snow and Ice Data Center de Boulder Colorado, 3 mars 2015). Des scénarios et modèles scientifiques ont montré que le niveau de la mer pourrait baisser légèrement dans certaines régions de l'Arctique, alors qu'il pourrait augmenter de plus de 70 cm le long de la côte Est des États-Unis d'Amérique (Plateforme Océan et Climat, 2015).

Ces changements en Arctique ouvrent l'accès aux ressources du plancher océanique et aux routes maritimes arctiques, avec de nouvelles opportunités de développement économique de la région pouvant influencer le commerce mondial (Valsson et Ulfarsson, 2011). Les infrastructures y sont cependant coûteuses, pour des populations clairsemées et isolées, et qui ne sont pas nécessairement en mesure de combiner leurs forces pour surmonter leurs faiblesses communes (Heininen et Exner-Pirot, 2018).

Le développement économique de l'Arctique, s'il est laissé libre et non coordonné, a le potentiel de mener à une « ruée vers le froid », sauvage, motivée par des intérêts égoïstes, plutôt qu'à un effort concerté pour faire en sorte de bénéficier de ces nouvelles opportunités, par des approches « gagnant – gagnant » permettant une création de richesse et de bien-être à tous les niveaux.

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

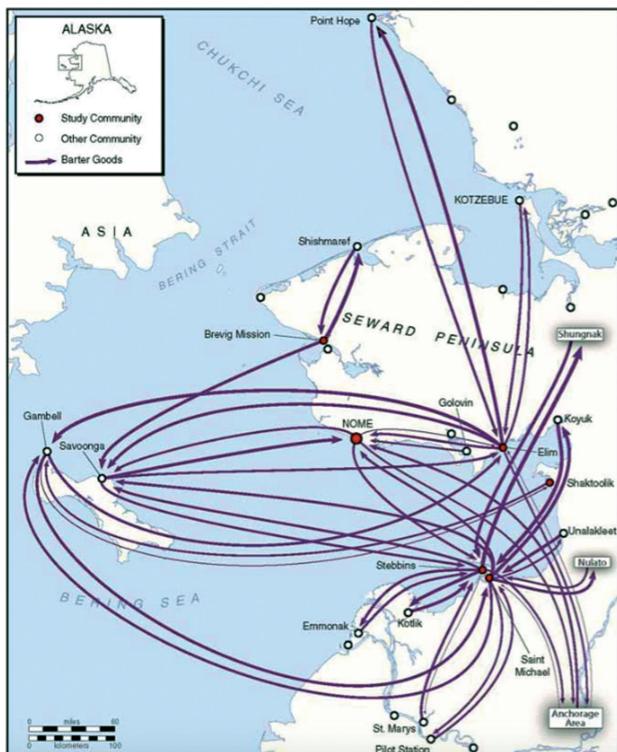


Fig. 1 — Les flux d'échanges commerciaux et de troc entre les communautés voisines, centres régionaux et communautés urbaines d'une même zone, selon des données collectées entre 2004-2006 auprès de six communautés de l'Ouest de l'Alaska. Source : Magdanz et al. (2007, p. 65).

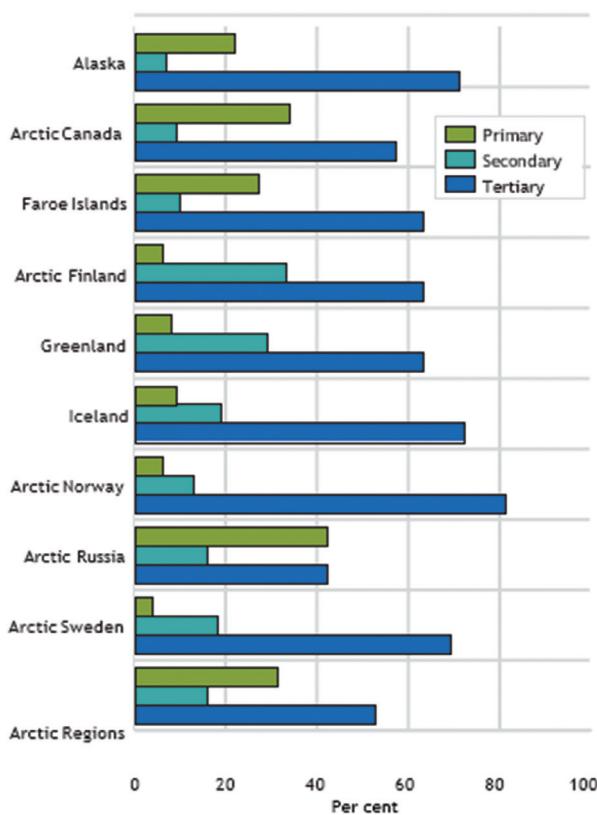


Fig.2 — PIB (%) par secteur économique dans les différentes régions de l'Arctique (année de référence: 2003) (Source: Duhaime et Caron, 2006, Figure 2.1 p. 19). Secteur primaire: extraction à grande échelle de ressources non-renouvelables, pêche commerciale et exploitation forestière à petite échelle;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

L'ARCTIQUE, UN LIEU D'ACTIVITÉ ÉCONOMIQUE INTENSE, MAIS AVEC DE FORTES VARIATIONS D'UN ÉTAT À L'AUTRE ET D'UN SECTEUR ÉCONOMIQUE À L'AUTRE

Plusieurs activités économiques sont établies en Arctique, à travers l'Arctique, ou à la périphérie du cercle polaire arctique: la pêche, l'exploitation forestière, l'exploitation minière (pétrole, gaz, minéraux), le transport maritime, la fabrication et la transformation (poisson, électronique), le tourisme, et services associés aux implantations humaines tels que l'édu-

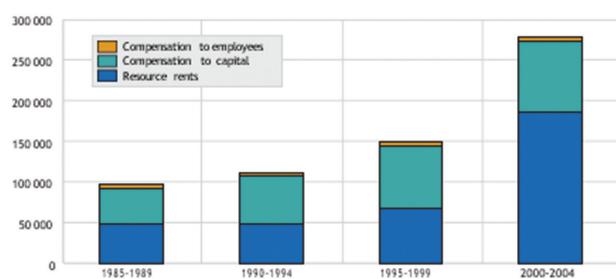


Fig.3 — Décomposition moyenne sur 5 ans de la production brute de pétrole et de gaz « offshore » en Norvège (Source: Duhaime et Caron, 2006, Figure 1 p. 24).

cation, la santé, l'administration, les services postaux, boutiques et restaurants, l'hydroélectricité, les parcs éoliens, et la défense nationale (Ahlenius et al., 2005; Duhaime et Caron, 2006; Glomsrød et Aslaksen, 2009; Dittmer et al., 2011; Conley et al., 2013).

L'Arctique est aussi un lieu où sont pratiquées des activités de subsistance telles que la pêche, la chasse, l'élevage de caribous et de rennes, la collecte et la transformation des aliments traditionnels (Ahlenius et al., 2005, p. 27 ; Glomsrød et Aslaksen, 2009). Ces activités de subsistance sont associées à des traditions commerciales et de troc très importantes entre les différentes populations de l'Arctique (Figure 1 ; Glomsrød et Aslaksen, 2009). Ces traditions ne suffisent parfois plus à assurer un revenu suffisant, vers des activités plus lucratives en complément des revenus tirés de leurs activités traditionnelles (Dana et Riseth, 2011).

L'Arctique, au niveau macroéconomique, affiche une activité économique intense en lien avec une exploitation des ressources naturelles (secteur primaire) et un secteur tertiaire très développé (Figure 2; Duhaime et Caron, 2006; Glomsrød et Aslaksen, 2009). L'exploitation des ressources naturelles est souvent concentrée géographiquement, notamment pour l'extraction à grande échelle des ressources non renouvelables telles que les hydrocarbures, le nickel, les diamants et l'or. À l'inverse, la petite pêche et l'exploitation forestière artisanales peuvent se retrouver sur de très grandes étendues géographiques. Le secteur tertiaire représente souvent 50 % des activités



économiques en Arctique, et le secteur public, très développé, 20-30 %.

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

L'Arctique fait l'objet d'une activité de transport maritime, pour l'instant limitée aux besoins de ravitaillement des populations locales, à la pêche autour de l'Islande et de la mer de Béring, la mer de Barents et la mer de Norvège, et au tourisme le long des côtes du Nord de la Norvège, de l'Ouest du Groenland et du Svalbard. Le transport de marchandises par cargo est surtout associé aux exploitations minières importantes en Alaska (zinc) et en Russie (principalement du nickel). Le transport de pétrole et de gaz a surtout lieu le long des côtes eurasiennes (Peters et al., 2011). Opportunités locales pour le développement des activités économiques découlant du changement climatique en arctique : des bénéfices économiques potentiellement élevés mais pour de forts coûts économiques dans un environnement à haut risque.

Toutes les activités économiques en Arctique sont confrontées à différentes opportunités et contraintes

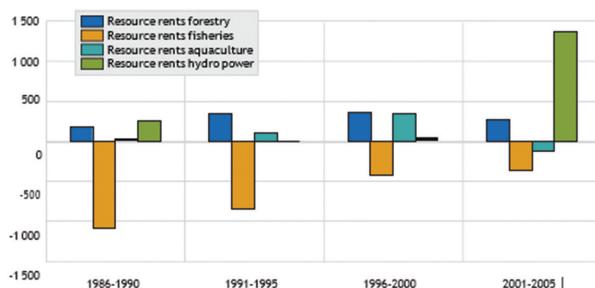


Fig.4 — Rentes moyennes sur 5 ans de l'exploitation des ressources naturelles renouvelables en Norvège (Source : Duhaime et Caron, 2006, Figure 2 p. 25).

induites par les changements climatiques en Arctique. Ces opportunités sont associées à des bénéfices économiques potentiellement élevés, attisant les convoitises, mais qui ont aussi des coûts économiques forts et des risques financiers élevés. La fonte de la banquise permet d'augmenter l'étendue ou la durée d'accès géographique aux ressources naturelles telles que le poisson et le bois (ressources renouvelables), le pétrole, le gaz et les minéraux (ressources non renouvelables). Cet accès facilité pourrait se traduire par une augmentation des quantités extraites et donc du chiffre d'affaires de la pêche, l'exploitation forestière, et l'industrie minière (pétrole et gaz, minéraux). Les opportunités économiques mises en avant ne prennent souvent pas en compte les coûts, non plus que les variations de prix de marché qui peuvent influencer le niveau de revenu effectivement réalisé. Or, l'Arctique reste un environnement risqué.

Les descriptions et les chiffres présentés ci-dessous sont dérivés de l'utilisation de modèles de prévision, généralement associés à un niveau élevé d'incertitude. La qualité des prévisions dépend de la qualité des données, des tendances et des connaissances établies au moment de la formalisation de ces modèles. Les estimations avancées sur les gains potentiels ne sont pas toujours fondées sur des données mesurées de manière objective, mais plutôt sur des perceptions. Les prévisions de ces modèles doivent être considérées avec prudence, surtout lorsqu'elles paraissent particulièrement favorables, car elles pourraient ne pas se matérialiser pleinement, ou seulement dans un avenir plus ou moins lointain (2030-2050). Il n'est pas facile de juger à l'heure actuelle si les revenus espérés se matérialiseront à la hauteur des espérances, ni à quelle échéance.

Le transport maritime bénéficierait de la fonte de la banquise avec une utilisation saisonnière accrue des routes maritimes arctiques et circumpolaires telles que le passage du Nord-Est (ou route maritime du nord, voie de navigation le long de la côte arctique russe qui relie l'Europe à l'Asie et au Pacifique), le passage du Nord-Ouest (le long de la côte nord-américaine), ou le détroit de Béring (de 53 milles marins de long entre la Sibérie et l'Alaska) (Peters

et al., 2011; Conley et al., 2013, p. 32-37). Ces routes permettraient de réduire les distances et le temps de transport, et donc les frais de carburant associés, ce qui, dans un contexte d'augmentation des prix du carburant, les rend économiquement attractives. La réduction des coûts de transport de 40 % au prorata de la distance et des « records » de réduction des coûts de transport entre l'Europe et l'Asie sont souvent citées de manière optimiste et simpliste pour justifier de l'attractivité de ces routes maritimes. La prise en compte des performances des navires dans des conditions de glace polaire donne des estimations plus pessimistes en moyenne, avec des réductions de coûts estimées à 5-16 % seulement dans les conditions actuelles, 29 % en 2030 et 37 % en 2050 (Liu et Kronbak, 2010; Peters et al., 2011).

Ces économies de carburant doivent idéalement compenser l'augmentation des coûts liés à la construction de navires pouvant naviguer dans les conditions arctiques, aux changements fréquents de vitesse de navigation, aux difficultés de navigation et risques d'accidents accrus de par la visibilité réduite et les glaces, entraînant une navigation plus lente et aux frais d'utilisation des services de brise-glace (Liu et Kronbak, 2010). L'Arctique dispose d'un nombre très limité de ports en eau profonde ouverts aux usages publics, de stations de carburant et d'escales de ravitaillement fiables, et d'infrastructures de communication et d'intervention d'urgence très réduites en Russie et Europe du Nord et quasi inexistantes le long de la côte nord-américaine (Valsson et Ulfarsson, 2011; Dawson et al., 2014).

Tout ceci semble pour l'instant limiter l'attrait économique des routes maritimes arctiques et circumpolaires par rapport au canal de Suez ou Panama (Peters et al., 2011). Le transport international de marchandises le long du passage du Nord-Est a d'ailleurs diminué de moitié entre 2011 (41 voyages) et 2016 (19 voyages) (Alexeeva et Lasserre, 2018). La Chine estime cependant que 1 % de son fret pourrait transiter par le passage du Nord-Est à compter de 2020. Elle a en conséquence mis en place des essais médiatisés de transport et commissionné la construction de navires adaptés aux eaux polaires. Les études

récentes penchent plutôt pour une utilisation de ces routes maritimes de manière anecdotique et saisonnière pour les transits liés au commerce international par rapport aux canaux de Suez et de Panama (Hugot et Umana Dajud, 2018; Theocharis et al., 2018). Pour l'instant, l'ouverture saisonnière des glaces n'est pas un facteur suffisant pour que les compagnies maritimes exploitent pleinement pour le transport international ces routes qui ne correspondent pas encore à leurs stratégies commerciales (Lasserre et al., 2016).

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

Il a été suggéré que le changement climatique pourrait être directement ou indirectement l'une des causes de la disparition d'espèces commerciales comme le saumon royal au large de l'Alaska (Conley et al., 2013). La densification des stocks de poissons réduit l'effort de pêche mais la navigation en Arctique, plus difficile, engendre des coûts plus importants (carburants et navires). Une



première estimation montre que les revenus des pêches arctiques augmenteraient de 34 % d'ici à 2050 par rapport à l'an 2000, soit moins d'un pour cent par an en moyenne, avec une augmentation équivalente des coûts (Lam et al., 2016). L'activité ne serait profitable que par l'effet multiplicateur qu'elle mobiliseraient, avec une augmentation des revenus des ménages de 32 % sur 50 ans. Le changement climatique pourrait avoir un impact négatif au niveau local, par exemple sur la pêche de subsistance dans les zones où celle-ci constitue une source importante d'alimentation (Himes-Cornell et Kasperski, 2015). Il faut également rajouter les forts coûts de surveillance et de mise en application des règles pour limiter la pêche illégale, non déclarée et non réglementée (IUU) en Arctique (WWF, 2008).

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

La quantité totale de ressources arctiques non encore découvertes et potentiellement récupérables avec les technologies actuelles est estimée à environ 90 milliards de barils de pétrole, 1669 milliards de pieds cubes de gaz naturel, et 44 milliards de barils de gaz naturel liquide, avec environ 84 % du pétrole et de gaz non découverts offshore (Bird et al., 2008). L'exploitation du pétrole et du gaz en l'Arctique est cependant très coûteuse, pour établir et entretenir des infrastructures adaptées aux conditions arctiques et pouvoir fonctionner en conditions arctiques, ainsi que pour l'investissement dans l'achat de licences d'exploration, d'exploitation, de permis de forage, d'équipement, mais aussi l'investissement dans du personnel qualifié (Conley et al., 2013). Les infrastructures vieillissantes et le manque de fonds d'investissement limitent actuellement le développement des activités extractives en Russie

arctique, malgré un rapprochement stratégique progressif de la Chine depuis 2008 (Alexeeva et Lasserre, 2018).

Suite à un rapport en avril 2012 de la Lloyd's, l'une des plus grandes compagnies d'assurance basée au Royaume-Uni, et de Chatham House, un think tank britannique, certains assureurs, comme la banque allemande West LB, ont indiqué qu'ils n'assureraient pas des opérations en Arctique au vu des défis logistiques et opérationnels associés aux conditions difficiles et imprévisibles (Conley et al., 2013). La société néerlandaise Shell a été l'une des premières à exploiter les réserves en pétrole et en gaz offshore dans les mers de Beaufort et des Tchouktches. Le coût total de l'investissement pour une telle opération est estimé à plus de 4,5 milliards de dollars américains pour l'acquisition de licences d'exploitation en 2005 et 2008, soit un sixième de son budget annuel (Conley et al., 2013). L'investissement total pourrait dépasser 40-50 milliards de dollars américains, ce qui représente un risque financier conséquent pour l'entreprise (Conley et al., 2013). Shell s'est d'ailleurs retirée de l'Arctique en 2015.

En outre, les fluctuations du prix du pétrole, combinées à l'exploitation des réserves de ressources naturelles auparavant non exploitables de manière commercialement viable (par exemple, le gaz de schiste et autres gaz non conventionnels) ont, pour l'instant, fortement réduit les incitations économiques à exploiter les ressources arctiques en pétrole et en gaz (Conley et al., 2013). Il y a encore une très faible concurrence avec les énergies alternatives – à fort potentiel dans le plus long terme – telles l'énergie éolienne, houlemotrice, hydraulique des grands fleuves qui se jettent dans l'océan Arctique, et géothermique (Valsson et Ulfarsson, 2011).

L'industrie minière bénéficierait d'une augmentation de l'accès physique aux ressources minérales telles que le plomb et le zinc en Alaska, l'or au Canada, les terres rares au Groenland, les diamants et le fer au Canada et au Groenland, de l'aluminium en Islande, et du nickel en Russie (Duhaime et Caron, 2006; Conley et al., 2013). La Chine met progressivement en place une stratégie afin de défendre ses intérêts

en Arctique, se positionnant sur la scène géopolitique mondiale comme un état « proche de l'Arctique » (Lasserre et al., 2015). Le Groenland pourrait devenir une porte d'entrée commerciale pour la Chine dans la région arctique suite à la récente découverte de vastes réserves de terres rares et une augmentation de l'intérêt stratégique de la Chine pour ces ressources (Conley et al., 2013; Gattolin, 2014). C'est d'ailleurs ce qui semble avoir motivé la proposition d'achat du Groenland par les États-Unis d'Amérique, qui a défrayé la chronique en août 2019.

L'indice GFMS des métaux de base a augmenté de 300 % entre juin 2002 et juin 2007 (Conley et al., 2013; Gattolin, 2014). En revanche, l'extraction de l'or en Alaska a été arrêtée à cause de faibles prix de marché (Conley et al., 2013). L'exploitation minière en Arctique doit pouvoir résister aux conditions météorologiques difficiles et est donc associée à des coûts d'infrastructure et d'exploitation très élevés. Le développement et la maintenance des infrastructures (routes ou couloirs ferroviaires) sont souvent pris en charge par le gouvernement plutôt que le secteur privé. Le développement d'infrastructures adaptées aux changements climatiques à venir pourrait débloquer l'exploitation de certaines ressources (par exemple du cuivre dont l'exploitation en Alaska a été suspendue par manque d'infrastructures adaptées Conley et al., 2013; Melvin et al., 2016).

Le changement climatique en Arctique semble bénéficier directement au tourisme arctique en permettant un accès étendu à des zones d'intérêt touristique. Des zones auparavant inaccessibles sont devenues accessibles à l'exploration et la navigation touristiques, et ce d'autant plus que la saison navigable se rallonge (Dawson et al., 2014). Les navires de croisière sont parfois d'envergure, tel le Crystal Serenity, un navire de croisière avec 1 200 passagers et 400 membres d'équipage qui a été le premier à traverser le passage du Nord-Ouest en 2016. Il y a une demande croissante à l'échelle mondiale pour des expériences touristiques « lointaines » et des paysages et faunes uniques et emblématiques, conduisant à une augmentation du tourisme arctique (Dawson et al., 2014). Le nombre d'itinéraires aux alentours de l'Arctique ca-

nadien a plus que doublé entre 2005 et 2013, tout en restant relativement limité avec moins de 30 voyages par an (Dawson et al., 2014).

Pour les opérateurs de tourisme arctique, les besoins d'infrastructure et d'exploitation et coûts associés baissent avec le changement climatique et l'accessibilité accrue des zones arctiques (Dawson et al., 2014). Les coûts de transaction sont cependant élevés avec des permis d'exploitation difficiles à obtenir ou associés à des coûts d'opportunité élevés dans certains pays, pour des raisons d'évasion fiscale ou à cause d'un manque de communication efficace entre différents organismes gouvernementaux (Dawson et al., 2014). Les coûts d'information peuvent être élevés pour la navigation dans les zones « inexplorées » et « sauvages » de l'Arctique : des accidents de navigation peuvent survenir en raison de l'insuffisance des cartes marines ou de cartes marines non mises à jour, raison de l'échouage du Clipper Adventurer en été 2010 (Cour Suprême du Canada, 2018). De plus, le développement du tourisme en Arctique peut générer des oppositions des habitants, par exemple à ce que leur territoire devienne un musée (Antomarchi, 2017).

La fabrication et la transformation, limitées en Arctique, pourraient bénéficier de l'augmentation de la disponibilité des matières premières comme le poisson pour la transformation (Islande, Groenland), des terres rares pour l'électronique (Finlande arctique) et l'aluminium pour la métallurgie (Islande) (Glomsrød et Aslaksen, 2009). Comme pour les autres activités économiques, les coûts élevés en capitaux, technologie, main-d'œuvre qualifiée et transport vers les centres de consommation restreignent généralement le développement du secteur secondaire en Arctique (Conley et al., 2013; Arctic.ru, Mars 2015). Les changements climatiques de plus en plus imprévisibles et le dégel saisonnier des sols auparavant gelés toute l'année viennent fragiliser les infrastructures existantes et augmenter les besoins en investissement et réparations.

Les services aux populations arctiques bénéfieraient indirectement d'une activité économique accrue dans la région. Ils seraient aussi les premiers à devoir as-



sumer le financement et l'entretien d'infrastructures comme les routes ou couloirs ferroviaires (Conley et al., 2013).

ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX

Les principales préoccupations environnementales émanent de préoccupations en lien avec la perte d'un environnement encore relativement vierge et d'écosystèmes arctiques uniques à cause du changement climatique, mais aussi de pressions de développement économique générant des pollutions. Une des réponses a été la création de zones protégées, dans lesquelles les pressions humaines directes sont limitées. Par exemple, aux États-Unis d'Amérique, la loi sur la conservation des terres d'intérêt national en Alaska (« Alaska National Interest Lands Conservation Act ») a permis la création en 1980 de l'« Arctic National Wildlife Refuge » (ANWR), une zone sauvage protégée de 19 millions d'hectares, comprenant des troupeaux de caribous, des ours polaires et des mammifères ainsi que de nombreuses espèces de poissons et d'oiseaux. La Russie a également créé plusieurs aires protégées arctiques sur son vaste territoire (Sevastyanov, 2018).

Le développement économique de l'Arctique est associé à un risque élevé de pollution atmosphérique et marine, en particulier par le pétrole en cas de marées noires, les polluants organiques persistants (POPs), les métaux lourds, les substances radioactives, ainsi qu'à un appauvrissement de la couche d'ozone (Kao et al., 2012; Conley et al., 2013). La réhabilitation des sols après extraction minière et l'assainissement des déchets hérités de la guerre froide n'ont pas toujours été couronnés de succès : la stratégie de « développer maintenant et remédier plus tard » a entraîné des coûts importants en terme de santé humaine et environnementale, aux niveaux financier, social et politique (Dance, 2015; Hird, 2016). Les opérations de Shell en Arctique ont été ralenties avant leur retrait en 2015 suite à un accident sur leur barge de réponse, l'Arctic Challenger, qui a démontré un manque de mesures d'intervention appropriées pour prévenir et contenir une marée noire (Conley et al., 2013). Les inquiétudes sur la pollution générée par l'extraction

minière ont bloqué l'exploitation de l'or en Alaska (Conley et al., 2013). Le risque élevé de marée noire et de mauvaise réputation associée, le manque de confiance des assureurs – notamment la Lloyd's, dont les avis font référence – pour assurer les risques liés à l'extraction pétrolière en Arctique, combinés à des coûts financiers et des risques élevés ont conduit Total et BP à se désengager de l'Arctique avant 2015 (Conley et al., 2013).

Les externalités du changement climatique sont également préoccupantes. La fonte de la banquise s'accélère lorsque sont générées en Arctique même les pollutions associées à l'utilisation de carburants diesel lourds par le transport maritime et les navires de tourisme, de par l'« amplification polaire » (Crate, 2012; Conley et al., 2013; Whiteman et al., 2013). Le réchauffement climatique va provoquer la fonte du pergélisol, sol gelé en permanence qu'on trouve essentiellement dans les hautes latitudes de l'Arctique (Guiot, 2017). Whiteman et al. (2013) ont estimé que la libération de méthane avec le dégel du pergélisol coûtera 60 milliards de dollars américains en l'absence de mesures d'atténuation, soit environ 15 % du coût total moyen des impacts du changement climatique estimé à 400 USD milliards de dollars. L'atténuation du changement climatique pourrait réduire de moitié les coûts des rejets de méthane (Whiteman et al., 2013). Les conséquences économiques des émissions de carbone au pôle sont mondiales, mais affectent à 80 % les économies les plus pauvres d'Afrique, d'Asie et d'Amérique du Sud qui subissent des événements climatiques extrêmes avec une fréquence accrue (Whiteman et al., 2013).

ENJEUX SOCIAUX

L'Arctique présente de multiples visages mais aussi de multiples tensions internes : entre développement industriel et protection de l'environnement, et en lien avec les attentes en termes de qualité de vie des populations autochtones traditionnelles et populations occidentalisées (Heininen et Exner-Pirot, 2018). Il y a plusieurs enjeux sociaux et sociétaux associés aux changements climatiques, au

développement économique et à l'industrialisation de l'Arctique. Au niveau social, l'accent est souvent mis sur les populations autochtones et les résidents de l'Arctique qui dépendent fortement des ressources fournies par leur environnement pour leur subsistance. Le recul et l'instabilité de la banquise en raison du changement climatique réduisent le potentiel de chasse de gibier et de mammifères marins et de pêche sous la glace (Ahlenius et al., 2005 p. 4; Himes-Cornell et Kasperski, 2015). Le développement économique génère aussi une concurrence accrue intra- et inter-secteurs économiques pour l'accès aux ressources dans un espace en 3 dimensions. Il y a par exemple une concurrence accrue entre chalutiers et pêcheurs côtiers dans les pêcheries du sud de l'Arctique (Ahlenius et al., 2005 p. 24). Il y a également une concurrence entre la petite pêche et l'extraction de pétrole et de gaz offshore (Alaska), et entre les petits éleveurs et l'extraction de pétrole et de gaz (Russie) (Duhaime et Caron, 2006; Conley et al., 2013).

Les changements historiques des systèmes de gouvernance en Russie ont mis en lumière la forte dépendance des populations de l'Arctique vis-à-vis du service public, et leur vulnérabilité au retrait des activités de services et des gouvernements de cette région, avec des conséquences sociales souvent dramatiques dans un environnement où des alternatives d'emploi sont extrêmement limitées (Glomsrød et Aslaksen, 2009; Amundsen, 2012). Le développement de petits commerces est difficile, limité par l'inflation sur les salaires, le fort coût de la vie et la compétition avec les emplois du secteur public (Heininen et Exner-Pirot, 2018).

L'augmentation du tourisme en Arctique est soutenue par les populations autochtones et les résidents de l'Arctique à condition d'être faite dans le respect du littoral, de la faune, et des paysages naturels sensibles ou culturellement importants (Dawson et al., 2014). C'est ce qui a eu lieu *de facto* en Arctique canadien grâce à la « bonne volonté » et le haut niveau d'éthique des opérateurs de croisières-expéditions. Toutefois, cette activité n'étant pas réglementée, l'arrivée d'acteurs privés moins respectueux pourrait

changer cet état de fait et engendrer des conflits. Le même phénomène s'applique aux recherches scientifiques, avec le développement d'une procédure d'exploitation normalisée pour la conformité des collectivités et de l'environnement pour minimiser l'impact des activités de recherche sur les activités de subsistance des autochtones (Konar et al., 2017). L'Arctique est miné par une santé de ses populations plus mauvaise que les moyennes nationales, conséquence du colonialisme et de la marginalisation : espérance de vie plus faible, fréquence plus forte de troubles psychologiques, toxicomanie, dépression, violence familiale et suicide (Heininen et Exner-Pirot, 2018; Zhuravel, 2018).

Des préoccupations concernant la santé des populations autochtones ont, dans certains cas, arrêté l'extraction minière (par exemple, l'uranium en Alaska, Conley et al., 2013). Ailleurs, des contestations sociales par les autochtones ont bloqué l'extraction minière (par exemple, de l'or et de charbon en Alaska, Conley et al., 2013). Les populations sont sensibles aux alternances entre emballage et contractions inhérentes à l'exploitation des ressources minières : leur volonté d'indépendance financière est souvent limitée par leur dépendance vis-à-vis de transferts depuis les autres régions du pays (Heininen et Exner-Pirot, 2018). Plus récemment, il semblerait que les richesses créées en Arctique y restent, grâce à une diversification accrue des activités, notamment des services, réduisant la dépendance économique de l'Arctique (Larsen, 2016).

Les problèmes sociaux subsistent en Arctique, nourris par la pauvreté, l'insuffisance alimentaire, l'abandon des modes de vie traditionnels par les jeunes, la marginalisation des femmes et des économies arctiques traditionnelles, et le manque d'accès des communautés arctiques à l'information et aux savoirs (Crate, 2012; Dalseg et Abele, 2015; Hodgkins et Weber, 2016; Mathisen et al., 2017; Dalseg et al., 2018; Malik et Melkaya, 2018). Les séparations familiales forcées en Canada arctique dans les années 50 et 60 ont aussi laissé des traces sociales profondes et durables (Healey, 2016).



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

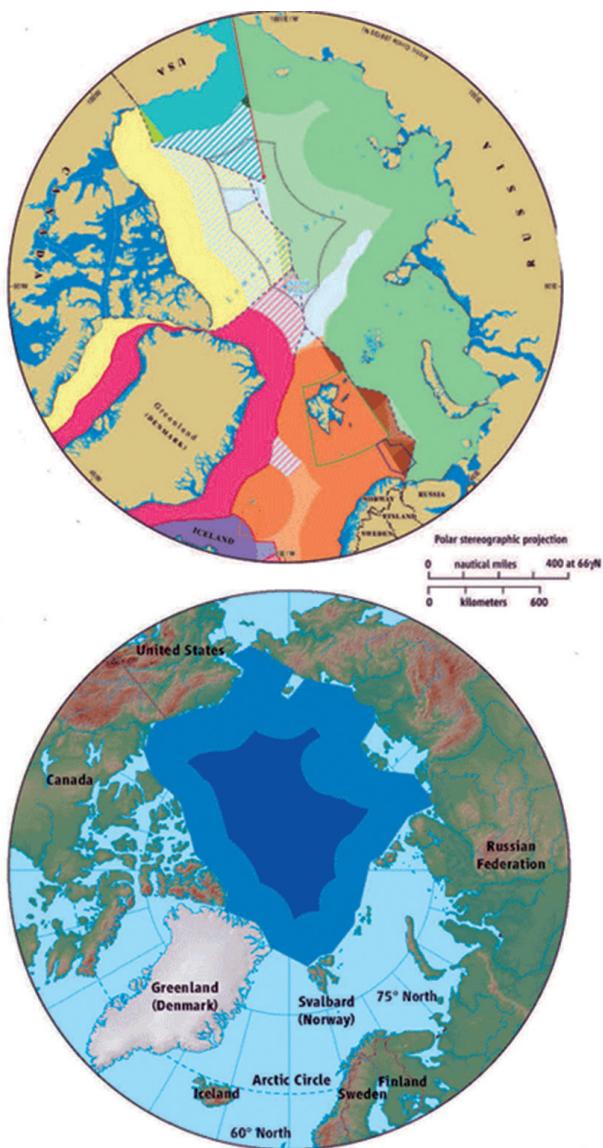


Fig.5 — En haut, représentation des conflits de compétence autour de l'océan Arctique avec des frontières liées au plateau continental (couleurs différentes), et en bas, les sources possibles de coopération liées à des colonnes d'eau partagées, la haute mer constituant un espace international au centre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

L'Arctique semble mûr pour un développement économique plus poussé. Les États riverains de l'océan Arctique semblent se positionner pour faire valoir des droits d'accès aux ressources arctiques et routes maritimes arctiques et circumpolaires stratégiques dans le respect des règles internationales établies. Un développement des activités arctiques pourrait permettre de récolter des bénéfices économiques très élevés, mais les coûts d'investissement et d'exploitation élevés réduisent sa compétitivité par rapport à d'autres régions du monde. La « ruée vers le froid » ne semble pas avoir encore vraiment commencé. Tous les acteurs semblent faire preuve de prudence relative en raison des risques financiers et diplomatiques importants associés au développement économique de l'Arctique.

Les défis politiques à venir: concilier différents points de vue pour tirer parti des opportunités nouvelles en arctique en intégrant les préoccupations environnementales et sociales.

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

Une voie possible pour faciliter la résolution des conflits qui pourrait être considérée par les décideurs du niveau local au niveau mondial repose sur l'intégration de la science, de l'économie, du droit et de la diplomatie (Berkman et Young, 2009). La

science peut aider dans la constitution d'une base mutuellement acceptée et reconnue de connaissances objectives, d'observatoires, de suivis des évolutions, permettant une vérification par toutes les parties prenantes afin d'établir des rapports de confiance. L'économie et le droit peuvent mettre à disposition des outils d'évaluation qui tiennent compte des conflits d'usage, et ainsi contribuer à l'établissement d'arbitrages informés.

L'intégration de la science, de l'économie, du droit, et de la diplomatie pourrait aider à rassembler non seulement les gagnants arctiques du changement climatique, bien connectés au niveau mondial, mais aussi les perdants de ce changement du niveau local au niveau mondial. Cette intégration et l'instauration de discussions multiniveaux pourraient aider à la réalisation des opportunités économiques s'ouvrant avec le changement climatique en Arctique, tout en prenant en compte les préoccupations environnementales et sociales du niveau local au niveau mondial. Les choix par des décideurs pour l'intégration et d'établissement de discussions afin de concilier les perspectives contrastées sur l'Arctique varieront probablement au sein des pays, entre les pays et en fonction de l'échelle considérée (du niveau local au niveau mondial).

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

rant une excellente coordination entre les populations autochtones et les gouvernements (Glomsrød et Aslaksen, 2009).

Les politiques de promotion des intérêts extérieurs à l'Arctique en Arctique peuvent aider à minimiser les conflits entre les parties prenantes, en instaurant une reconnaissance explicite des populations locales et en permettant une collecte d'informations sur les activités, la répartition des bénéfices économiques et les indicateurs sociaux et environnementaux (Ahlenius et al., 2005). Certains pays de l'Arctique ont déjà adopté des mesures de prévention des pollutions avec des mécanismes de compensation juridiquement reconnus, ou ont mis en place des stratégies nationales d'adaptation au changement climatique et de sécurité énergétique (Ahlenius et al. 2005; Amundsen et al., 2007). Par exemple, le Canada a étendu le champ d'application géographique de sa loi sur la prévention de la pollution des eaux arctiques (Berkman et Young, 2009). Certains pays de l'Arctique ont mis en place des programmes nationaux de recherche avec pour objectif spécifique d'informer l'action en Arctique pour l'adaptation au changement climatique (L'Arctique – Sentinelle avancée du réchauffement climatique. Journée-débats co-organisée par la France et la Norvège, Paris, 17 mars 2015). Ces initiatives nationales, cependant, ne permettent pas de résoudre les questions transfrontalières qui nécessitent plutôt des approches supranationales (Berkman et Young, 2009). Une recherche arctique et échanges transcendant les pays, par exemple facilitée par l'Université arctique, pourrait faciliter l'innovation centrée sur les problématiques spécifiques à l'Arctique (Hall et al., 2017).

Entre les différents pays arctiques, il existe un certain nombre de tensions liées à des conflits de compétences (Figure 5), des différends de plus en plus marqués pour l'extraction des ressources naturelles et des risques pour la sécurité transfrontalière (hérités en partie de la guerre froide). Un nouveau « grand jeu politique » est en train de s'établir entre les grandes puissances, avec des implications en matière de sécurité au niveau mondial (Berkman et



Young, 2009). La coopération régionale et internationale semble être généralement favorisée même si les États n'hésitent pas à mettre en avant leur volonté de faire valoir leurs droits souverains. C'est ainsi que la Russie a fortement médiatisé sa volonté d'étendre son plateau continental en plantant un drapeau en titane sous le pôle Nord en août 2007, et en soumettant une requête à la Commission des limites du Plateau continental (CLPC), organe issu de la Convention des Nations Unies sur le droit de la mer (CNUDM) du 10 décembre 1982. Le statut non consensuel des passages du Nord-Est et du Nord-Ouest – sous souveraineté du Canada et de la Russie ou voies maritimes internationales – peut également être évoqué (Lasserre, 2017). Ce « grand jeu politique » couple à ces préoccupations souveraines des intérêts commerciaux au niveau international. Par exemple, le conflit commercial actuel entre Chine et États-Unis d'Amérique les a amenés à s'intéresser tous deux au Groenland.

L'Arctique n'est pas exclu des accords internationaux juridiquement contraignants. La Convention des Nations Unies sur le droit de la mer (CNUDM) du 10 décembre 1982 (convention de Montego Bay) est considérée comme l'un des principaux accords fournissant un cadre juridique pour la gestion des activités humaines dans la région de l'Arctique. Elle octroie aux États riverains des droits souverains dans les espaces sous leur juridiction. Avec la Déclaration d'Ilulissat de mai 2008, les États du Conseil de l'Arctique ont réaffirmé leur volonté de demeurer « engagés » dans le cadre juridique du droit de la mer et « envers le règlement harmonieux de toutes revendications concurrentes susceptibles de survenir ».

D'autres conventions internationales sont aussi pertinentes pour l'Arctique: la Convention internationale pour la Sauvegarde de la vie humaine en mer (SOLAS), qui met l'accent sur les exigences de sécurité, la Convention internationale pour la prévention de la pollution marine par les navires (MARPOL73-78) qui se concentre sur la protection de l'environnement marin, la Convention internationale sur les normes de formation des gens de mer, de délivrance des brevets et de veille (STCW) qui se

concentre sur la formation et les compétences, et la Convention pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du Nord-Est (OSPAR), qui s'applique à une partie de l'Arctique et fournit un guide pour la coopération internationale sur la protection de l'environnement marin en Atlantique du Nord-Est.

Plus récemment, un certain nombre d'accords-cadres ont été conclus, notamment en matière de navigation maritime en Arctique, d'opérations de recherche et de sauvetage, et de gestion des pollutions. Ces accords fournissent des orientations et permettent d'organiser la coopération internationale en Arctique. L'Organisation maritime internationale (OMI) a permis l'adoption de mesures, dont le Recueil international de règles applicables aux navires exploités dans les eaux polaires, plus connu sous le nom de « code polaire » ou de « recueil sur la navigation polaire ». Ce code polaire a permis l'adoption d'amendements à la Convention internationale de 1974 sur la sauvegarde de la vie en mer (SOLAS) (adoptés en 2014 et entrés en vigueur le 1er janvier 2017), à la Convention MARPOL 73-78 (adoptés en 2015 et entrés en vigueur le 1er janvier 2017) et à la Convention STCW sur la formation des gens de mer (adoptés en 2016, entrés en vigueur le 1^{er} juillet 2018). Enfin, dans le secteur de la pêche, un accord international a été signé à Ilulissat, le 3 octobre 2018, visant à prévenir la pêche non réglementée en haute mer dans l'océan Arctique central. Signé par le Canada, la Chine, le Danemark, pour le Groenland et les îles Féroé, l'Islande, le Japon, la République de Corée, la Norvège, la Russie, les États-Unis, l'Union européenne, cet accord impose aux parties de pratiquer la pêche commerciale uniquement dans le cadre des organisations régionales de pêche agissant conformément aux normes internationales reconnues. Cet accord est conclu pour 16 ans et sera prorogé automatiquement tous les cinq ans.

Tous ces accords ont été possibles grâce à des échanges au sein de plateformes de discussion entre les États, qui ont conduit avec succès à la mise en place d'actions concertées et coordonnées avec des bénéfices pour tous (« gagnant-gagnant »). Ces plateformes regroupent des organisations intergou-

vernementales comme l'Organisation des Nations Unies et ses institutions spécialisées (dont l'OMI), ainsi que des forums internationaux comme le Conseil de l'Arctique.

Le Conseil de l'Arctique est constitué des huit États de la région arctique: le Canada, le Danemark (Groenland et les îles Féroé), les États-Unis d'Amérique (Alaska), la Finlande, l'Islande, la Norvège, la Suède, et la Fédération de Russie. Le Conseil de l'Arctique est un « lieu de débats de haut niveau » (<http://www.arctic-council.org>). Il est le principal acteur de l'Arctique, officiellement créé par la Déclaration d'Ottawa en 1996 pour « favoriser la coopération, la coordination et l'interaction entre les États de l'Arctique, avec la participation des communautés indigènes de l'Arctique et de ses autres habitants au regard des problèmes communs de l'Arctique, plus précisément aux problèmes de développement soutenable et de protection de l'environnement dans l'Arctique ». Le Conseil de l'Arctique est une institution « faible », qui n'a pas d'autorité réglementaire (Chater, 2018), mais qui a néanmoins favorisé la négociation d'accords contraignants entre les 8 États arctiques. C'est ainsi qu'ont été adoptés l'Accord de coopération en matière de recherche et de sauvetage aéronautiques et maritimes dans l'Arctique (2011), l'Accord de coopération sur la préparation et la lutte en matière de pollution marine par les hydrocarbures dans l'Arctique (2013) et l'Accord sur le renforcement de la coopération scientifique internationale dans l'Arctique (adopté à Fairbanks (Alaska) en mai 2017, entré en vigueur en mai 2018).

Le Conseil de l'Arctique a également permis la réalisation d'études scientifiques de référence telles que le projet international d'évaluation des impacts du changement climatique en Arctique (« Arctic Climate Impact Assessment », ACIA) avec les groupes de travail du programme arctique de suivi et d'évaluation (« Arctic Monitoring and Assessment Programme », AMAP) et du programme de conservation de la faune et de la flore arctiques (« Conservation of Arctic Flora and Fauna », CAFF), en lien avec le Comité international des sciences arctiques (« In-

ternational Arctic Science Committee », IASC). Le Conseil de l'Arctique est également à l'initiative de rapports sur le développement humain en Arctique (Larsen et Fondhal, 2014), et sur la résilience de l'environnement arctique, mettant en avant des activités permettant le maintien de son intégrité (Conseil de l'Arctique, 2016).

Le Conseil de l'Arctique a également permis une mise en avant des questions arctiques auprès des instances mondiales. Ses initiatives ont été reconnues avec, par exemple, l'adoption en 2001 de la Convention de Stockholm sur les polluants organiques persistants (POP). Adoptée à Stockholm en mai 2001 et entrée en vigueur en mai 2004, elle vise à réduire les niveaux de polluants organiques persistants qui s'accumulent dans l'environnement. Elle reconnaît d'ailleurs que « l'écosystème arctique et les populations autochtones qui y vivent sont particulièrement menacés en raison de la bio-amplification des polluants organiques persistants, et que la contamination des aliments traditionnels de ces populations constitue une question de santé publique » (préambule de la Convention).

Un certain nombre d'acteurs internationaux de suivi et de recherche scientifique développent des initiatives et des projets scientifiques en Arctique. Ces projets scientifiques avec des collaborations internationales pourraient faciliter l'établissement de rapports de confiance et renforcer la coopération entre États de l'Arctique en établissant des bases scientifiques communes reconnues (Berkman et Young, 2009). Ces projets scientifiques incluent par exemple le Comité international de la science arctique (CISA, iasc.info), et le Conseil polaire européen (« European Polar Board » www.europeanpolarboard.org). Plusieurs États non riverains se sont plus récemment intéressés à l'Arctique. La Chine se considère comme un « État proche de l'Arctique » et y est active en terme de recherche scientifique (Alexeeva et Lasserre, 2018). Le Japon a également développé ses activités scientifiques en Arctique (Coates et Holroyd, 2015). À cela se rajoutent quelques centres de formation et universités arctiques ou dédiés à l'Arctique, dont le consortium de l'Université de l'Arctique (www.uarctic.ca).



org). Il existe en outre plusieurs revues académiques spécifiques aux environnements polaires, mobilisant les sciences naturelles comme sociales et humaines (dont The Northern Review, Arctic and North, The Polar Journal, Polar Record, et Advances in Polar Science).

Il est certain que l'Arctique fascine et stimule toujours autant les imaginaires. Il existe de nombreuses organisations et accords autour de l'Arctique, apportant une base institutionnelle qui pourrait être renforcée et développée en fonction des besoins et de leurs évolutions. Le développement économique enclenché crée d'ailleurs déjà des besoins institutionnels nouveaux en Arctique. Le principe de précaution et une

approche constructive de l'action en Arctique semblent avoir été suivis jusqu'à présent. L'un des défis majeurs sera de pouvoir renforcer la capacité institutionnelle existante, au même rythme que le développement économique et les changements rapides induits, afin de mettre en place les garde-fous environnementaux, sociaux et sociétaux jugés nécessaires. Il y a un fort potentiel de création de richesse économique et de bien-être pour le bénéfice de tous. Les choix effectifs de développement économique, de coordination et de coopération effectués par les États de l'Arctique et les entreprises privées dans les prochaines années vont avoir un impact majeur dans le façonnement de ce que sera l'Arctique de demain.

RÉFÉRENCES

- AHLENIUS H., JOHNSEN K. and NELLEMANN C., 2005 – *Vital Arctic Graphics – People and Global Heritage on our Last Wildshores*. UNEP/GRID-Arendal, www.grida.no/files/publications/vitalarcticgraphics.pdf.
- ALEXEEVA O. and LASERRE F., 2018 – *An Analysis on Sino-Russian Cooperation in the Arctic in the Bri Era*. *Advances in Polar Science*, 29(4): 269-282.
- AMUNDSEN H., 2012 – *Illusions of Resilience? An Analysis of Community Responses to Change in Northern Norway*. *Ecology and Society*, 17(4): 46.
- AMUNDSEN H., HOVELSRUD G. K. and PRESTRUD P., 2007 – *Workshop Report of the Workshop on Adaptation to Climate Change in the Arctic, 26-27 June 2006 Oslo, Norway*. Hosted by the Ministry of Foreign Affairs, Norway. Organised by CICERO – Centre for International Climate and Environmental Research – Oslo, www.cicero.uio.no/workshops/acia-workshop-2006/Workshop-report-Final.pdf, 62 p.
- ANTOMARCHI V., 2017 – *Les Inuit et le froid. Les représentations autochtones et celles des touristes*. *Communications*, 2: 101, 63-74.
- ARCTIC COUNCIL, 2016 – *Arctic Resilience Report*. CARSON M. and PETERSON G. (eds). Stockholm Environment Institute and Stockholm Resilience Centre, Stockholm. <http://www.arctic-council.org/arr>.
- ARCTIC.RU, 2015 – *Structure of the Economy*. <http://Arctic.ru/economy-infrastructure/structure-economy>.
- BERKMAN P.A. and YOUNG O.R., 2009 – *Governance and Environmental Change in the Arctic Ocean*. *Science*. 324 : 339-340.
- BIRD K., CHARPENTIER R., GAUTIER D., HOUSEKNECHT D., KLETT T., PITMAN J., MOORE T. E., SCHENK C.J., TENNYSON M.E. and WANDREY C.J., 2008 – *Circum-Arctic Resource Appraisal; Estimates of Undiscovered Oil and Gas North of the Arctic Circle*. U. S. Geological Survey, USGS Fact Sheet 2008-3049, <http://pubs.usgs.gov/fs/2008/3049>.
- BOÉ J., HALL A. and QU X., 2009 – *September Sea-Ice Cover in the Arctic Ocean Projected to Vanish by 2100*. *Nature Geoscience*, 2: 341-343.
- CHATER A., 2018 – *An Explanation for the Growing Institutional Capacity of the Arctic Council*. *The Northern Review*, 48: 51–80.
- CHRISTIANSEN J.S., MECKLENBURG C.W. and KARAMUSHKO O.V., 2014 – *Arctic Marine Fishes and their Fisheries in Light of Global Change*. *Global Change Biology*, 20: 352-359.
- COATES K. and HOLROYD C., 2015 – *Turning Eyes to the North: A Commentary on Japan's Engagement with the North American Arctic*. *The Northern Review*, 40: 86–97.

- CONLEY H.A., PUMPHREY D.L., TOLAND T.M. and DAVID, M., 2013 – *Arctic Economics in the 21st Century: The Benefits and Costs of Cold*. A Report of the CSIS Europe Program. Center for Strategic and International Studies. http://csis.org/files/publication/130710_Conley_ArcticEconomics_WEB.pdf.
- COUR SUPRÈME DU CANADA, Jugement 1555 – 38046 du 5 avril 2018 – Navire M/V clipper Adventurer, http://publications.gc.ca/collections/collection_2018/csc-scc/JU8-1-2018-11-30.pdf
- CRATE S.A., 2012 – *Climate Change and Ice Dependent Communities: Perspectives from Siberia And Labrador*. The Polar Journal, 2:1, 61-75.
- DAHL J.M.I., 2015 – *Assessments, Models and International Politics of the Arctic: why the “New North” Narrative Includes Only Bomber, Polar Bear, Oil, and Gas Deposit Models, and No Original Parts or an Assembly Manual*. The Polar Journal, 5:1, 35-58.
- DALSEG S.K. and ABELE F., 2015 – *Language, Distance, Democracy: Development Decision Making and Northern Communications*. The Northern Review, 41: 207–240.
- DALSEG S.K., KUOKKANEN R., MILLS S. and SIMMONS D., 2018 – *Gendered Environmental Assessments in the Canadian North: Marginalization of Indigenous Women and Traditional Economies*. The Northern Review, 47: 135–166.
- DANA L.P. and RISETH J.A., 2011 – *Reindeer Herders in Finland: Pulled to Community-based Entrepreneurship and Pushed to Individualistic Firms*. The Polar Journal, 1:1, 108-123.
- DANCE A., 2015 – *Northern Reclamation in Canada: Contemporary Policy and Practice for New and Legacy Mines*. The Northern Review, 41: 41–80.
- DAWSON J., JOHNSTON M.E. and STEWART E.J., 2014 – *Governance of Arctic Expedition Cruises Hips in a Time of Rapid Environmental and Economic Change*. Ocean & Coastal Management, 89: 88–99.
- DITTMER J., MOISIO S., INGRAMA A. and DODDS K., 2011 – *Have you Heard the One about the Disappearing Ice? Recasting Arctic Geopolitics*. Political Geography, 30: 202 – 214.
- DUHAIME G. and CARON A., 2006 – *The Economy of the Circumpolar Arctic*. In: GLOMSRØD S. and ASLAKSEN I. (eds) – *The Economy of the North*, 17-23.
- FALK-PETERSEN S., PAVLOV V., BERGE J., COTTIER F., KOVACS K. and LYDERSEN C., 2015 – *At the Rainbow’s End: High Productivity Fueled by Winter Upwelling along an Arctic Shelf*. Polar Biology, 38 : 5-11.
- GATTOLIN A., 2014 – *Rapport d’information fait au nom de la commission des affaires européennes sur les stratégies européennes pour l’Arctique*. Enregistré à la Présidence du Sénat le 2 juillet 2014, Rapport du Sénat no 634, <http://www.senat.fr/rap/r13-684/r13-684.html>, 190 p.
- GLOMSRØD S. and ASLAKSEN I., 2009 – *The Economy of the North 2008*. Statistics Norway. http://ssb.no/a/english/publikasjoner/pdf/sa112_en/sa112_en.pdf, 102 p.
- GUIOT J., 2017 – *Limiter l’augmentation des températures bien en dessous de 2°C : est-ce un objectif atteignable ?* Revue juridique de l’environnement, HS17 (n° spécial), 23-32.
- HALL H., LEADER J. and COATES K., 2017 – *Introduction: Building a Circumpolar Innovation Agenda*. The Northern Review, 45: 1–10.
- HEALEY G., 2016 – *(Re)settlement, Displacement, and Family Separation: Contributors to Health Inequality in Nunavut*. The Northern Review, 42: 47–68.
- HEININEN L. and EXNER-PIROT H. (eds.), 2018 – *Arctic Yearbook 2018*. Akureyri, Iceland: Northern Research Forum. <https://arcticyearbook.com>
- HIMES-CORNELL A. and KASPERSKI S., 2015 – *Assessing Climate Change Vulnerability in Alaska’s Fishing Communities*. Fisheries Research, 162: 1-11.
- HIRD M.J., 2016 – *The DEW Line and Canada’s Arctic Waste: Legacy and Futurity*. The Northern Review, 42: 23–45.
- HODGKINS A.P. and WEBER B., 2016 – *Northern Inequalities: Global Processes, Local Legacies*. The Northern Review 42 (2016): 1–6.
- HUGOT J. and UMANA DAJUD C., 2018 – *Les nouvelles routes polaires changeront peu la géographie du commerce mondial*. La lettre du CEPII no 392, octobre 2018.



- HUNT Jr G.L., BLANCHARD A.L., BOVENG P., DALPADADO P., DRINKWATER K.F., EISNER L., HOPCROFT R.R., KOVACS K.M., NORCROSS B.L., RENAUD P., REIGSTAD M., RENNER M., SKJOLDAL H.R., WHITEHOUSE A. and WOODGATE R.A., 2013 – *The Barents and Chukchi Seas : Comparison of two Arctic Shelf Ecosystems*. Journal of Marine Systems: Large-scale Regional Comparisons of Marine Biogeochemistry and Ecosystem Processes – Research Approaches and Results. 109 – 110: 43-68.
- KAO S.-M., PEARRE N.S. and FIRESTONE J., 2012 – Adoption of the Arctic Search and Rescue Agreement: a Shift of the Arctic Regime Toward a Hard Law Basis? *Marine Policy*, 36: 832-838.
- KONAR B., FRISCH L. and MORAN S.B., 2017 – *Development of Best Practices for Scientific Research Vessel Operations in a Changing Arctic: A Case Study For R/V Sikuliaq*. *Marine Policy*, 86, 182–189.
- KWOK R. and ROTHROCK D.A., 2009 – Decline in Arctic Sea Ice Thickness from Submarine and ICES at Records: 1958-2008. *Geophysical Research Letters*, 36: L15501.
- L'ARCTIQUE, 2015 – *Sentinelle avancée du réchauffement climatique*. Journée-débats co-organisée par la France et la Norvège, Paris, 17 mars 2015.
- LAM V.W.Y., CHEUNG W.W.L. and SUMAILA R., 2016 – *Marine Capture Fisheries in the Arctic: Winners or Losers under Climate Change and Ocean Acidification?* *Fish and Fisheries*, 17, 335-357.
- LARSEN J.N. and FONDAHL G. (eds), 2014 – *Arctic Human Development Report: Regional Processes and Global Linkages*. Nordic Council of Ministers. www.norden.org/en/publications.
- LARSEN J.N., 2016 – *Polar Economics: Expectations and Real Economic Futures*. *The Polar Journal*, 6:1, 1-10.
- LASSEUR F., 2017 – *Géopolitique du passage du Nord-Ouest. Une perspective de relations internationales*. Relations internationales, 2: 170,107-124.
- LASSEUR F., BEVERIDGE L., FOURNIER M., TÊTU P.-L. and HUANG L., 2016 – *Polar Seaways? Maritime Transport in the Arctic: An Analysis of Shipowners' Intentions II*. *Journal of Transport Geography*, 57: 105–114.
- LASSEUR F., HUANG L. and ALEXEEVA O., 2015 – *China's strategy in the Arctic: threatening or opportunistic?* *Polar Record*, 53:1, 31-42.
- LIU M. and KRONBAK J., 2010 – *The Potential Economic Viability of Using the Northern Sea Route (NSR) as an Alternative Route between Asia and Europe*. *Journal of Transport Geography*, 18: 434–444.
- MAGDANZ J.S., TAHBONE S., AHMASUK A., KOSTER D.S. and DAVIS B.L., 2007 – *Customary Trade and Barter in Fish in the Seward Peninsula Area: FIS Project 04-151*. Technical Paper No. 328. Division of Subsistence, Alaska Department of Fish and Game, Juneau, Alaska, Department of Natural Resources, Kawerak, Inc., Nome, Alaska, www.subsistence.adfg.state.ak.us/TechPap/tp328.pdf.
- MALIK L.S. and MELKAYA L.A., 2018 – *Community Social Work As a Condition For Improving the Quality of Life of the Population of the Northern Region*. *Arctic and North*, 31, 33-41.
- MATHISEN L., CARLSSON E. and SLETTØRD N. A., 2017 – *Sami Identity and Preferred Futures: Experiences among Youth in Finnmark and Trøndelag, Norway*. *The Northern Review*, 45: 113–139
- MELVIN A.M., LARSEN P., BOEHLERT B., NEUMANN J.E., CHINOWSKY P., ESPINET X., MARTINICH J., BAUMANN M.S., RENNELS L., BOTHNER A., NICOLSKY D.J. and MARCHENKO S.S., 2016 – *Climate Change Damages to Alaska Public Infrastructure and the Economics of Proactive Adaptation*. *PNAS*, 114(2), E122-E131.
- MINISTÈRE DES AFFAIRES ETRANGÈRES DE NORVÈGE, 2015 – *Le monde du grand nord. La création de valeurs et les ressources. Changements climatiques et connaissances. Le développement des régions du Grand Nord nous concerne tous*. www.norvege.no/PageFiles/732027/Le_Monde_du_Grand_Nord_2015.pdf, 20 p.
- PARKINSON C.L., 2014 – *Global Sea Ice Coverage from Satellite Data: Annual Cycle and 35-Yr Trends*. *J. Climate*, 27 : 9377 – 9382.
- PETERS G.P., NILSSEN T.B., LINDHOLT L., EIDE M.S., GLOMSRØD S., EIDE L.I. and FUGLESTVEDT J.S., 2011 – *Future Emissions from Shipping and Petroleum Activities in the Arctic*. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11 : 5305-5320.
- PLATEFORME OCÉAN ET CLIMAT, 2015 – *Fiches scientifiques*. www.ocean-climate.org, 69 p.
- SERREZE C.M., HOLLAND M.M. and STROEVE J., 2007 – *Perspectives on the Arctic's Shrinking Sea-Ice Cover*. *Science*, 315: 1533-1536.

- SEVASTYANOV D.V., 2018 – *Recreational Nature Management and Tourism in the New Development Plans of the North of Russia*. Arctic and North, 30, 18-32.
- SPEICH S., REVERDIN G., MERCIER H. and JEANDEL C., 2015 – *L'océan, réservoir de chaleur*. In: Fiches scientifiques. PLATEFORME OCÉAN ET CLIMAT, www.ocean-climate.org.
- THEOCHARIS D., PETTIT S., SANCHEZ RODRIGUES V. and HAIDER J., 2018 – *Arctic Shipping: A Systematic Literature Review pf Comparative Studies*. Journal of Transport Geography, 69, 112–128.
- US NATIONAL SNOW AND ICE DATA CENTER IN BOULDER COLORADO, 2015 – *Climate Change in the Arctic*. https://nsidc.org/cryosphere/arctic-meteorology/climate_change.html.
- VALSSON T. and ULFARSSON G.F., 2011 – *Future Changes in Activity Structures of the Globe under a Receding Arctic Ice Scenario*. Futures, 43: 450–459.
- WHITEMAN G., HOPE C. and WADHAMS P., 2013 – *Climate Science: Vastcosts of Arctic Change*. Nature, 499: 401-403.
- WWF, 2008 – *Illegal Fishing in Arctic Waters*. Oslo: WWF International Arctic Programme. http://assets.panda.org/downloads/iuu_report_version_1_3_30apr08.pdf.
- ZHURAVEL V.P., 2018 – *Rights of the Indigenous Peoples of the Russian Arctic: Problems and Solutions*. Arctic and North, 30, 62-78.



Les petites îles, l'océan et le climat

Virginie Duvat
Alexandre Magnan
Jean-Pierre Gattuso

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

Les petites îles, qu'elles appartiennent ou non à un archipel, et quel que soit leur statut politique¹, sont confrontées à un ensemble de contraintes inhérentes à leur petite taille (de quelques milliers de km² de surface à moins de 1 km²) et à leur éloignement géographique par rapport aux principaux centres mondiaux d'activité (peu d'économies d'échelles, par exemple, ce qui nuit à leur compétitivité, au système éducatif, etc.). En particulier, leurs caractéristiques physiques (surface émergée limitée, plaines réduites, forte exposition aux aléas météorologiques et marins) et humaines (forte dépendance vis-à-vis des activités de subsistance et des écosystèmes) expliquent leur forte sensibilité aux changements environnementaux et leur exposition aux catastrophes naturelles. De telles carac-

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

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

Ce texte suit une logique simple, celle de la chaîne des impacts qui part des processus physiques climatiques et océaniques, pour aller jusqu'aux conséquences sur les écosystèmes et sur les ressources des systèmes insulaires. Cela nous conduit à aborder plus globalement la question des changements environnementaux et leur lien avec le processus de « mal-développement »², pour conclure sur quelques messages-clés.

LES PROCESSUS PHYSIQUES À L'ŒUVRE

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

L'élévation du niveau de la mer

Quand on s'intéresse aux petites îles, l'élévation du niveau de la mer est sans aucun doute la conséquence du changement climatique la plus médiatisée, avec des discours catastrophistes qui, mal connectés aux prudentes conclusions scientifiques, annoncent pour les uns, la disparition prochaine des îles les plus basses (en particulier des Maldives, de Kiribati et de Tuvalu) et pour les autres, la sub-

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

Les travaux scientifiques récents mettent en évidence deux éléments. D'abord, le fait que l'océan ne monte pas partout à la même vitesse: l'océan Indien oriental et le Pacifique central, notamment, connaissent des vitesses d'élévation particulièrement élevées, avec des valeurs qui atteignent par exemple + 5 mm/an à Funafuti (Tuvalu) (Becker et al., 2012). En second lieu, la communauté scientifique rappelle que l'élévation du niveau de la mer, qui s'est accélérée depuis le début des années 1990³, va continuer à le faire au cours du siècle à venir. On attend en effet une hausse moyenne du niveau des océans de +45 à +82 cm d'ici à 2100 pour le scénario de projection le plus pessimiste⁴ (Church et al., 2013). Et cette tendance est pour partie irréversible en raison des phénomènes de latence qui caractérisent les processus océaniques et atmosphériques, et qui expliquent que le niveau de la mer continuera à monter au minimum pendant plusieurs siècles

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

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

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



même si l'on arrêtait demain d'émettre tout gaz à effet de serre (Solomon *et al.*, 2009, Levermann *et al.*, 2013).

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

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

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

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

Les cyclones tropicaux possèdent une puissance supérieure à celle des dépressions tempérées, avec des vents dont la vitesse peut dépasser 350 km/h.

Ces vents sont destructeurs pour la végétation, les infrastructures et les bâtiments. Les cyclones s'accompagnent aussi souvent de fortes pluies (jusqu'à 1 500 mm en 24 h) qui font déborder les cours d'eau et peuvent provoquer des inondations catastrophiques. À ces effets strictement météorologiques, s'ajoutent sur le littoral les impacts des vagues cycloniques, lesquelles sont d'autant plus destructrices que les cyclones s'accompagnent d'une surcote marquée⁵. Les conséquences de la submersion d'origine marine (vagues + surcote) sont bien entendu amplifiées lorsque celle-ci se couple à des inondations venues des cours d'eau intérieurs. Les vagues cycloniques, qui atteignent fréquemment 4 à 6 m de hauteur à la côte, peuvent également être à l'origine de pics d'érosion marqués (recul du trait de côte de 10 à 15 m, abaissement du niveau des estrans) ou, au contraire, d'un fort engrangement des côtes sous l'effet de l'accumulation de sable et blocs de corail arrachés au récif corallien (Étienne, 2012).

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

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

Par ailleurs, l'évolution des tempêtes des zones tempérées (nord et sud) et des hautes latitudes, qui reste difficile à prévoir, aura aussi des impacts sur l'évolution des risques liés à la mer en milieu insulaire. En effet, il est désormais clairement établi que les houles puissantes que produisent ces tempêtes se propagent sur de grandes distances à travers l'océan et causent des dégâts importants sur des territoires insulaires éloignés de plusieurs milliers de kilomètres de leur zone de formation (Nurse *et al.*, 2014). Celles de décembre 2008 en particulier ont engendré d'importants dégâts dans de nombreux États du Pacifique occidental, comme la république des îles Marshall, les États Fédérés de Micronésie et la Papouasie-Nouvelle Guinée (Hoeksema *et al.*, 2013).

Enfin, à ce jour, il est tout aussi difficile de prévoir l'évolution du phénomène El Niño alors que quatre de ses manifestations au moins perturbent fortement les milieux insulaires. Premièrement, les variations importantes des températures océaniques de surface qui se produisent pendant les épisodes El Niño se traduisent dans certaines régions par des pics thermiques marqués. Ceux-ci sont à l'origine de phénomènes de blanchissement corallien⁶ dévastateurs (95 à 100 % de mortalité corallienne aux Maldives et aux Seychelles en 1997-1998). En deuxième lieu, les épisodes El Niño se traduisent par une augmentation des cyclones dans certaines régions peu exposées à ces phénomènes, comme c'est le cas de l'archipel des Tuamotu en Polynésie française: alors que la fréquence des cyclones y est de 1 phénomène tous les 20 à 25 ans, 5 cyclones sont passés sur les îles du nord-ouest de cet archipel en l'espace de 6 mois pendant l'épisode El Niño 1982-1983 (Dupont, 1987). En troisième lieu, le phénomène El Niño engendre de fortes perturbations du régime pluviométrique, provoquant des pluies diluviales dans certaines régions (centre et est du Pacifique) et des sécheresses marquées dans d'autres (ouest du Pacifique, avec de forts impacts à Kiribati et dans les îles Marshall, par exemple). Certains archipels, comme ceux du sud

de Kiribati par exemple, peuvent alors connaître des sécheresses d'une durée de 1 à 2 ans. En dernier lieu, les épisodes El Niño s'accompagnent d'une élévation anormale du niveau marin de 30 à 40 cm dans le Pacifique occidental, ce qui provoque des submersions importantes sur les îles de cette région, notamment lorsque ces niveaux marins anormalement hauts se conjuguent avec des houles de tempête. L'évolution du phénomène El Niño intéresse donc tout particulièrement les milieux insulaires.

Le réchauffement de l'océan

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

L'acidification de l'océan

La pollution par les gaz à effet de serre a commencé à générer, en parallèle du changement climatique, une augmentation de la teneur des eaux océaniques en CO₂ dissous, plus connue sous le nom d'acidification de l'océan (Gattuso et Hansson, 2011). L'acidification des océans, c'est donc « l'autre problème du CO₂ » (Turley, 2005, Doney *et al.*, 2009). Les océans ont en effet absorbé environ un tiers du CO₂ anthropique

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



depuis la révolution industrielle. Or, l'augmentation du CO₂ dans l'eau de mer diminue son pH, la rendant plus acide. Les projections pour le xxie siècle annoncent des réductions du pH moyen à l'échelle mondiale, lequel pourrait être de 7,8 en 2100 (Ciais et al., 2013) par rapport à 8,18 avant l'ère industrielle et 8,10 maintenant.

Ce phénomène a d'ores et déjà, et il continuera d'avoir, de lourdes répercussions sur la chimie de base de l'océan, puis par effet domino, sur les organismes (diminution de calcification chez de nombreux organismes à squelette ou coquille calcaire) et les écosystèmes (Pörtner et al., 2014, Gattuso et al., 2014, Howes et al., *In Press*). Ainsi les spécialistes estiment-ils que les conséquences de l'acidification sur les coraux deviendront très importantes au-dessus d'une concentration en CO₂ atmosphérique de 500 ppm (Hoegh-Guldberg et al., 2014)⁷.

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

sociétés modernes vis-à-vis des contraintes environnementales, aménagement de zones exposées aux aléas, etc.) est au cœur des menaces que le changement climatique fait peser sur les littoraux, notamment insulaires (Duvat et Magnan, 2014).

IMPACTS ET VULNÉRABILITÉ DES PETITES ÎLES

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

Quels impacts attendre ?

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

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

Il est impossible de prévoir la réponse des systèmes insulaires aux pressions associées au changement climatique en raison de la multitude des facteurs en jeu, tant naturels (réserves sédimentaires, impacts des tempêtes, réponses des récifs coralliens aux pressions associées au changement climatique, etc.) qu'anthropiques (interférence des aménagements avec le fonctionnement du littoral, impacts des activités humaines et politiques publiques, etc.), et de la complexité de leurs interactions. Ceci étant, l'on peut s'attendre, à l'échelle des prochaines décennies, à une diminution de la superficie des îles, en particulier coralliniennes. Un pays comme les Maldives, dont 80 % de la surface

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

émergée se situe à moins de 1 m d'altitude, verra très probablement sa superficie se réduire significativement sous l'effet de l'élévation du niveau de la mer. Mais ce facteur de pression aura, comme les autres facteurs de pression (fréquence et intensité des tempêtes, dégradation de l'état de santé des récifs coralliens, etc.), des impacts variables d'une île à l'autre, en fonction du contexte géomorphologique et humain. Par exemple, les îles déjà affectées par l'érosion ou dont le littoral est fortement aménagé ne bénéficieront d'aucun mécanisme naturel d'exhaussement leur permettant de s'ajuster à l'élévation du niveau marin. Car pour qu'un tel mécanisme d'ajustement se produise, il faut qu'il existe, non seulement un réservoir sédimentaire sous-marin susceptible d'alimenter les côtes, mais aussi un espace libre de tout aménagement le long du littoral sur lequel puissent s'accumuler les sédiments. Or, ces deux conditions ne sont actuellement réunies que dans un nombre limité d'îles habitées. En revanche, un tel mécanisme d'ajustement naturel fonctionnera probablement sur certaines îles peu ou pas aménagées.

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

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

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

Des récifs coralliens menacés

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

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



seuil critique⁸ jusqu'en 1970, ce qui signifie qu'aucun épisode de blanchissement ne s'est produit jusque-là (Hoegh-Guldberg, 1999). Depuis cette date, à partir de laquelle l'augmentation des températures océaniques de surface liée au changement climatique est avérée, la température de l'océan dépasse systématiquement ce seuil pendant les épisodes El Niño, produisant un phénomène de blanchissement. À partir de l'évolution prévisible des températures océaniques, ces modèles prévoient une fréquence de blanchissement annuelle à partir de 2050, qui pourrait remettre en cause la capacité des coraux à se maintenir. L'augmentation de la fréquence de ces épisodes pourrait ne plus laisser le temps aux récifs coralliens de se régénérer entre deux pics thermiques. Mais ceci reste une hypothèse, car les réactions des récifs coralliens varient d'une région à une autre en fonction de la circulation océanique et de la profondeur : les récifs peu profonds sont en général plus affectés par les pics thermiques et moins résilients que ceux qui se développent dans un environnement plus océanique (profondeurs élevées proches et échanges intenses avec la masse d'eau océanique). À l'échelle locale également, les réponses des différentes espèces de coraux diffèrent. Une même espèce ne réagit d'ailleurs pas de manière identique à deux stress thermiques de même intensité, comme l'ont montré les suivis réalisés en 1996, 1998 et 2002 sur les récifs coralliens du Golfe Arabo-Persique (Riegl, 2007). Celui de 1996 a complètement décimé les coraux branchus du genre *Acropora*, qui se sont réinstallés rapidement et n'ont pas été touchés en 2002. Cela semble indiquer que les coraux possèdent une certaine capacité d'adaptation. Les observations qui ont été réalisées dans le Pacifique oriental aboutissent aux mêmes conclusions. L'épisode El Niño de 1982-83 y a été plus destructeur que celui de 1997-98, ce qui conduit à l'hypothèse que les crises sélectionnent les individus les plus résistants (Glynn et al., 2001). La résilience des coraux dépend également de leur degré d'affaiblissement par des maladies, dont les pics thermiques favorisent le développement dans

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

Pourquoi accorder autant d'importance à l'évolution des récifs coralliens dans l'analyse du devenir des îles ? Parce que la disparition totale ou partielle des récifs coralliens se traduirait d'une part, par l'annihilation de tout mécanisme d'ajustement vertical des îles et des côtes au niveau marin, et d'autre part, par une aggravation de l'érosion côtière, et ce pour deux raisons. D'une part, la mort des récifs réduirait l'alimentation des îles en débris coralliens frais. D'autre part, elle engendrerait une augmentation de l'énergie marine à la côte, donc des prélèvements opérés par les vagues, en particulier en situation de tempête. Dans cette configuration, le facteur qui jouera un rôle crucial dans le maintien des côtes coraliennes sera l'état des stocks de sédiments inertes⁹ susceptibles d'être mobilisés par les agents marins et de compenser la baisse de l'alimentation des côtes en débris coralliens frais. Le rôle de ces sables qui se sont accumulés sur les petits fonds marins ne doit pas être négligé, car certaines îles qui possèdent un récif peu développé (étroit ou présent sur une partie du linéaire côtier seulement) se sont formées et continuent à s'agrandir sous l'effet de la remontée de ces sables anciens vers les rivages (Cazes-Duvat et al., 2002).

Là où les conditions écologiques seront favorables au développement des coraux, les platiers récifaux sans vie corallienne, comme ceux de Kiribati ou des Tuamotu par exemple qui sont constitués d'une plate-forme conglomératique, pourraient être colonisés par des colonies coraliennes. Il en va de même des côtes bordées par un platier rocheux sans vie corallienne. Dans ce cas, le développement d'un récif pourrait

⁸ Bien que la température maximale tolérée par les coraux varie d'une région à une autre - elle est notamment plus élevée dans les mers que dans les océans - l'on peut globalement considérer qu'au-delà de 30°C, un phénomène de blanchissement peut survenir.

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

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

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

Quel devenir pour les mangroves ?

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

Quels impacts aura le changement climatique sur les mangroves ? Théoriquement, une élévation du niveau de la mer engendre leur migration vers le rivage, car les différentes zones écologiques qui constituent la vasière tendent elles-mêmes à migrer dans cette direction pour s'adapter. Mais au-delà de la seule élévation du niveau marin, deux facteurs vont jouer un rôle clé : la vitesse de la sédimentation et le niveau de pression anthropique qui s'exerce sur cet écosystème. Là où les conditions sont favorables (sédimentation active et pression anthropique réduite), l'élévation du niveau de la mer peut être compensée par l'exhaussement

des petits fonds marins. Dans ce cas de figure, les mangroves se maintiennent ou continuent à s'étendre vers le large. Les secteurs les plus sensibles sont donc incontestablement ceux qui sont déjà soumis à une forte érosion, qui détruit la mangrove, et/ou ceux dans lesquels celle-ci est dégradée par l'homme.

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

Quels impacts sur les systèmes de ressources insulaires ?

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

À terre

Les ressources terrestres vont diminuer sous l'effet de différents processus (Nurse et al., 2014, Wong et al., 2014). D'abord, l'augmentation des températures



atmosphériques accroît l'évapotranspiration¹⁰, ce qui assèche les sols et provoque une hausse des prélèvements opérés par les végétaux dans les lentilles d'eau saumâtre. Ces prélèvements ne doivent pas être négligés. En effet, les mesures effectuées dans l'atoll de Tarawa (Kiribati) ont montré que l'arbre le plus répandu, le cocotier, restituait à l'atmosphère par transpiration au moins 150 litres d'eau par jour. Dans ces conditions, l'augmentation prévisible du pompage d'eau par les cocotiers et le reste de la végétation renforcera significativement la pression qui s'exerce déjà sur ces lentilles utilisées par l'homme pour subvenir à ses besoins alimentaires. La dégradation de la qualité des sols et la diminution de la ressource en eau réduiront encore les possibilités de mise en culture, ce qui aura pour effet une baisse de la production qui posera, en particulier dans les systèmes insulaires vivriers, un défi de sécurité alimentaire. Il s'en suivra une augmentation de la dépendance extérieure, particulièrement dans les atolls ruraux de nombreux archipels coralliens. Les sols se dégraderont aussi sous l'effet de leur salinisation, due à l'élévation du niveau de la mer et à l'augmentation des submersions marines qui se produira dans les îles et plaines côtières qui ne s'exhausseront pas. Or, à l'exception du cocotier, peu d'espèces végétales comestibles tolèrent le sel. Les cocotiers ne le supportent d'ailleurs que jusqu'à un certain seuil au-delà duquel ils meurent. La contraction des surfaces exploitées, et en particulier des cocoteraies, réduira par ailleurs la disponibilité en matériaux de construction. Par ailleurs, l'évolution progressive des pratiques culturelles insulaires vers des espèces moins résistantes aux pressions du climat et des agents marins que les espèces indigènes – le bananier étant par exemple moins résistant que le pandanus ou le cocotier – risque d'accroître l'ampleur et la fréquence des pénuries alimentaires (exemple des Maldives suite aux dégâts engendrés par le tsunami de 2004) et des déficits commerciaux (cas des Antilles suite au passage du cyclone Dean en 2007) à l'avenir.

Le changement climatique aura des impacts sur l'évolution quantitative et qualitative des ressources en eau, qui dépend de plusieurs facteurs. Le plus important est le niveau de la mer, dont l'élévation réduira inévitablement le volume des lentilles d'eau saumâtre. En effet, selon le principe de Ghyben-Herzberg qui régit le fonctionnement des aquifères, toute élévation du niveau marin engendre une réduction de leur volume. Des submersions marines plus fréquentes, voire systématiques pendant les hautes mers de vives-eaux, seront à l'origine d'intrusions répétées d'eau salée dans ces lentilles, ce qui contribuera à la dégradation de leur qualité. Les îles et les côtes soumises à une forte érosion côtière seront plus affectées que les autres par la réduction du volume des aquifères et la diminution de leur qualité. Un autre facteur important est la pluviométrie, qui détermine le taux et la fréquence de recharge des lentilles et des cours d'eau qui traversent les plaines côtières. Comme à ce jour l'on ne dispose d'aucune prévision fiable sur l'évolution des précipitations et que subsistent dans certains cas d'îles hautes des incertitudes sur les ressources souterraines en eau douce, il est impossible de dire quels îles et archipels seront les plus affectés par la dégradation de la ressource en eau. Là où les épisodes de sécheresse seront plus fréquents et/ou plus longs qu'actuellement, il faut s'attendre à une réduction du volume d'eau disponible. Par conséquent, l'eau deviendra plus salée, ce qui accroîtra la fréquence et la sévérité des pics de mortalité des cultures (cocotier et taro¹¹ notamment) qui s'observent déjà. Le prélèvement d'eau dans la lentille en période de sécheresse a pour effet de réduire encore son épaisseur. Cela signifie qu'en période de pénurie d'eau, l'utilisation de l'eau de la lentille, qui est cruciale pour la survie de nombreuses populations insulaires, pourrait la rendre impropre à la consommation. Comme les réservoirs d'eau pluviale des îles qui en possèdent sont vides quand la sécheresse dure, ce phénomène pourrait remettre en cause l'habitabilité de certaines îles basses. L'accès individuel à l'eau diminuera aussi sous l'effet de la forte croissance démographique que connaissent ces espaces.

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

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

En mer

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

En dépit des incertitudes qui demeurent, et au-delà du fait que les systèmes insulaires répondront de manière différenciée aux manifestations du changement climatique et de l'acidification des océans, il est certain que les contraintes environnementales, qui sont déjà fortes, vont s'accroître, et que les ressources déjà limitées qu'offrent ces îles vont diminuer ou devenir plus aléatoires qu'aujourd'hui. Par conséquent, c'est la viabilité de certaines îles coraliennes et États insulaires qui pourrait à terme être remise en question. Mais à l'heure actuelle, la principale menace qui pèse sur la viabilité de ces îles est le mal-développement qui a, au cours des dernières décennies, dégradé les ressources disponibles et réduit par certains aspects leur résilience face aux pressions naturelles (Duvat et Magnan, 2012, 2014).

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

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



ENTRE CHANGEMENTS ENVIRONNEMENTAUX LIÉS AU CO₂ ATMOSPHÉRIQUE ET MAL-DÉVELOPPEMENT : LE CAS SYMPTOMATIQUE DES ATOLLS

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

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

Comme Tuvalu et les Maldives, Kiribati est principalement constitué d'atolls dont l'évolution dépend des réponses des coraux à la modification des conditions météo-marines. Sa zone économique exclusive (ZEE) est immense (3,5 millions de km²) et contraste avec la modestie de sa surface émergée (726 km²), laquelle est par ailleurs morcelée en un grand nombre d'îles. À l'échelle de l'atoll, l'élément dominant est le lagon, délimité par un anneau de corail qui porte des îles d'une superficie en général inférieure à 1 km². Celles-ci ne sont par ailleurs pas habitables sur toute leur surface du fait de la présence de marécages et vasières à mangrove, de la forte instabilité de leurs côtes et d'altitudes très faibles par endroits. Culminant en général entre 3 et 4 m, elles sont en effet très exposées au risque de submersion marine. Parce qu'elles sont jeunes (entre 2000 et 4000 ans), faites de sable et de débris de corail, et exposées aux agents marins, leurs sols sont pauvres et leurs ressources végétales peu diversifiées. L'eau y est rare, saumâtre (2 à 3 g. de sel/l) et très sensible aux fluctuations climatiques. Elle provient des précipitations qui s'infiltrent pour constituer une lentille souterraine peu profonde (de 1 à 2 m environ) de taille proportionnelle à celle des îles. Dans les atolls du sud de Kiribati, les sécheresses liées aux épisodes El Niño, qui peuvent durer jusqu'à 2 ans, rendent la présence d'eau aléatoire.

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

climatiques (Di Piazza, 2001). Ce système a permis de diversifier autant que possible l'alimentation de la population et d'amortir les crises dues à la fluctuation des différentes ressources. Il n'a quasiment plus cours aujourd'hui, en particulier dans les îles urbanisées, les plus peuplées (atoll de Tarawa-Sud).

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

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

Les dernières décennies se sont par ailleurs caractérisées, notamment sous l'impulsion des progrès réalisés dans le domaine de la santé, par une explosion démographique dans l'atoll-capitale. La forte croissance de la population de Kiribati – de 38 000 habitants en 1963 à plus de 103 000 en 2010, soit +171 % ! – s'est en effet surtout concentrée dans le district urbain de Tarawa-Sud. Celui-ci abrite aujourd'hui la moitié de la population du pays sur seulement 2 % du territoire, avec une densité de population moyenne de 3 125 hab/km². Cette situation est à l'origine (i) d'une dégradation rapide des écosystèmes et des ressources, (ii) d'une perte du lien identitaire et culturel à l'environnement, (iii) d'une forte exposition des populations aux aléas météo-marins due à l'occupation de zones submersibles et instables, et (iv) d'une dépendance croissante vis-à-vis de l'aide internationale et des importations alimentaires.

L'on déduit de cela que de telles transformations, replacées dans le contexte des conclusions des sections 1 et 2 de ce texte (affaiblissement des récifs coralliens, érosion/submersion, raréfaction des ressources en eau, etc.), vont en grande partie expliquer la vulnérabilité de Kiribati au changement climatique et à l'acidification des océans.

LES MESSAGES-CLÉS À RETENIR ET LES PISTES À EXPLORER

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

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

Ensuite, la vulnérabilité ne dépend pas non plus que des seules pressions d'ordre naturel, en l'occurrence les aléas ponctuels et les changements plus graduels des conditions environnementales. Les facteurs anthropiques vont jouer un rôle eux aussi déterminant dans le devenir des îles et, plus largement, des côtes (Duvat et Magnan, 2014). Si le changement climatique et l'acidification des océans sont des menaces réelles, il est irresponsable et dangereux de le nier, les problèmes de demain sont intimement liés à des modes actuels d'occupation de l'espace et d'exploitation des ressources qui ne sont pas durables.



Cela signifie enfin qu'engager dès maintenant, dans les îles comme sur les littoraux en général, des politiques volontaristes de réaménagement des territoires, de protection de l'environnement et de modification du rapport des sociétés et de leurs économies aux ressources marines et côtières, constitue un pas majeur vers l'adaptation au changement climatique et à l'acidification des océans. L'identification des

facteurs anthropiques de pression, qui agissent aujourd'hui, fournit finalement autant de clés de lecture pour penser et commencer à mettre en œuvre l'adaptation aux changements environnementaux (Magnan, 2013). Les responsabilités humaines sont de puissants leviers sur lesquels agir pour limiter les risques futurs.

RÉFÉRENCES

- ARNDT D.S., BARINGER M. O. and JOHNSON M.R., 2010 – *State of the Climate 2009*. Bull Am Meteorol Soc, 91 : 1-222.
- BECKER M.B., MEYSSIGNAC C., LETETREL C., LLOVEL W., CAZENAVE A. and DELCROIX T., 2012 – *Sea Level Variations at Tropical Pacific Islands since 1950*. Global Planet. Change 80-81 : 85-98.
- CAZES-DUVAT V., PASKOFF R. and DURAND P., 2002 – *Évolution récente des deux îles coraliennes du banc des Seychelles (océan Indien occidental)*. Géomorphologie, 3 : 211-222.
- CHURCH J.A. et al., 2013 – *Sea Level Change*. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- CIAIS P. et al., 2013 – *Carbon and Other Biogeochemical Cycles*. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- DIAMOND J., 2006 – *Effondrement: comment les sociétés décident de leur disparition ou de leur survie*. Gallimard.
- Di Piazza A., 2001 – *Terre d'abondance ou terre de misère. Représentation de la sécheresse à Nikunau (République de Kiribati, Pacifique central)*. L'Homme, 157.
- DONEY S.C., FABRY V.J., FEELY R.A. and KLEYPAS J.A., 2009 – *Ocean Acidification: the Other CO₂ Problem*. Ann Rev Marine Sci 1 : 169-192.
- DUPONT J.-F., 1987 – *Les atolls et le risque cyclonique: le cas de Tuamotu*. Cahiers des sciences humaines, 23 (3-4) : 567-599.
- DUVAT V. and MAGNAN A., 2012 – *Ces îles qui pourraient disparaître*. Le Pommier-Belin.
- DUVAT V., MAGNAN A. and POUGET F., 2013 – *Exposure of Atoll Population to Coastal Erosion and Flooding: a South Tarawa Assessment, Kiribati*. Sustainability Science, Special Issue on Small Islands. 8 (3) : 423-440.
- V. DUVAT and A. MAGNAN, 2014 – *Des catastrophes... « naturelles » ?* Le Pommier-Belin.
- ÉTIENNE S., 2012 – *Marine Inundation Hazards in French Polynesia: Geomorphic Impacts of Tropical Cyclone Oli in February 2010*. Geological Society, London, Special Publications, 361 : 21-39.
- GATTUSO J.-P. and HANSSON L., 2011 – *Ocean Acidification*. Oxford University Press.
- GATTUSO J.-P., HOEGH-GULDBERG O. and PÖRTNER H.-O., 2014 – *Cross-Chapter Box On Coral Reefs*. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects*. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- GATTUSO J.-P., BREWER P.G., HOEGH-GULDBERO. G, KLEYPAS J.A., PÖRTNER H.-O. and SCHMIDT D.N., 2014 – *Cross-Chapter Box on Ocean Acidification*. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects*. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- GLYNN P.W., MATÉ J.L., BAKER A.C. and CALDERON M. O., 2001 – *Coral Bleaching and Mortality in Panama and Ecuador during the 1997-1998 El Niño Southern Oscillation Event: Spatial/Temporal Patterns and Comparisons with*

the 1982-1983 Event. *Bulletin of Marine Sciences*, 69: 79-109.

- HOEGH-GULDBERG O., 1999 – *Climate Change, Coral Bleaching and the Future of the Worlds' Coral Reefs*. *Marine and Freshwater Resources*, 50: 839-866.
- HOEGH-GULDBERG O., 2011 – *Coral Reef Ecosystems and Anthropogenic Climate Change*. *Regional Environmental Change*, 1: 215-227.
- HOEGH-GULDBERG O., CAI R., BREWER P., FABRY V., HILMI K., JUNG S., POLOCZANSKA E. and SUNDBY S., 2014 – *The Oceans*. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- HOEKE R.K., MCINNES K. L., KRUGER J.C., MCNAUGHT R. J., HUNTER J.R. and SMITHERS S.G., 2013 – *Widespread Inundation of Pacific Islands Triggered by Distant-Source Wind-Waves*. *Global and Planetary Change*, 108: 128-138.
- HOWES E. et al., In Press – *The Physical, Chemical and Biological Impacts of Ocean Warming and Acidification*. IDDRI Study.
- HUGHES T.P. et al., 2003 – *Climate Change, Human Impacts and the Resilience of Coral Reefs*. *Science*, 301: 929-933.
- LEVERMANN A., CLARK P.U., MARZEION B., MILNE G.A., POLLARD D., RADIC V. and ROBINSON A., 2013 – *The Multi-Millennial Sea-Level Commitment of Global Warming*. *PNAS* 110 (34): 13745 – 13750.
- MAGNAN A., DUVAT V. and POUGET F., 2013 – *L'archipel de Kiribati entre développement non durable et changement climatique: quelles recherches pour quelle adaptation?* IDDRI Policy Briefs, 09/13.
- MAGNAN A., 2013 – *Éviter la maladaptation au changement climatique*. IDDRI Policy Briefs, 08/13.
- NURSE L., MCLEAN R., AGARD J., BRIGUGLIO L.P., DUVAT V., PELESIKOTI N., TOMPKINS E. and WEBB A., 2014 – *Small Islands*. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- PÖRTNER H.-O., KARL D., BOYD P., CHEUNG W., LLUCH-COTA S. E., NOJIRI Y., SCHMIDT D. and ZAVIALOV P., 2014 – *Ocean Systems*. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- RANKEY E.C., 2011 – *Nature And Stability of Atoll Island Shorelines: Gilbert Island Chain, Kiribati, Equatorial Pacific*. *Sedimentology*, 44: 1859.
- RHEIN M. et al., 2013 – *Observations: Ocean*. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- RIEGL B., 2007 – *Extreme Climatic Events and Coral Reefs: how Much Short-Term Threat from Global Change?* Ecological studies, 192: 315-341.
- SOLOMON S., PLATTNER G.-K., KNUTTI R. and FRIEDLINGSTEIN P., 2009 – *Irreversible Climate Change Due to Carbon Dioxide Emissions*. *Proceedings of the National Academy of Sciences (USA)*, 106 (6): 1704-1709.
- TURLEY C., 2005 – *The Other CO₂ Problem*. Open Democracy. www.opendemocracy.net/globalization-climate_change_debate/article_2480.jsp.
- WONG P. P., LOSADA I. J., GATTUSO J.-P., HINKEL J., KHATTABI A., MCINNES K., SAITO Y. and SALLENGER A., 2014 – *Coastal Systems and Low-Lying Areas*. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.



Océan, changements climatiques et migration

Guigone Camus,
Christine Causse,
Daria Mokhnacheva

Les modifications qui touchent l'océan et la cryosphère ont un rôle clé pour le climat planétaire. Avec le réchauffement, leur rôle de régulation du climat et les services écosystémiques qu'ils fournissent sont menacés. Les impacts de ces changements sur les écosystèmes et les sociétés humaines sont désormais évidents. Ils menacent la sécurité des populations les plus exposées (habitants des côtes, des petites îles, des montagnes et des zones polaires) et ont des impacts économiques, sociaux et culturels sur toutes les communautés humaines, y compris celles qui vivent loin de ces zones. Pour les populations les plus vulnérables, la migration environnementale peut être une réponse. L'anticipation et l'adaptation à ces changements permettraient de réduire les perturbations sur les milieux naturels et sur les communautés qui en dépendent.

L'OCÉAN, LA CRYOSPHERE ET LE CLIMAT

L'océan a absorbé 93 % de l'excès de chaleur généré et près d'un quart du CO₂ émis par les activités humaines. Il régule ainsi le climat et limite l'amplitude du réchauffement atmosphérique. Mais il est fortement perturbé par ce bouleversement majeur. Plus chaud, plus acide, moins bien oxygéné, il se transforme. 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, les marées de très grande amplitude ou les vagues de chaleur océaniques.

La cryosphère se modifie aussi avec le retrait des couvertures glaciaires, la diminution de la banquise et la fonte du permafrost (terres gelées en permanence).

LES ENJEUX

Tous les habitants de la planète dépendent de l'océan et de la cryosphère. Ces milieux naturels qui interviennent dans la régulation du climat et le cycle de l'eau sont également le siège de nombreuses activités: nourriture (pêche et aquaculture), emplois, tourisme, santé, loisirs... Les produits de la mer représentent 20 % de l'apport en protéines hors céréales de l'alimentation humaine mondiale, et assurent les moyens de subsistance de plusieurs dizaines de millions de personnes (60 millions de

personnes travaillaient dans les secteurs primaires de la pêche de capture et de l'aquaculture en 2016 selon la FAO). 80 % du transport international de marchandise se fait par mer.

En 2010, 28 % de la population mondiale (soit 1,9 milliard de personnes) vivait à moins de 100 km des côtes et à moins de 100 m au-dessus du niveau de la mer et 11 % (680 millions) vivaient sur des terres à moins de 10 m au-dessus du niveau de la mer (un chiffre qui devrait atteindre 1 milliard en 2050). Environ 10 % (4 millions) de la population mondiale vivent dans l'Arctique ou dans les régions de hautes montagnes (670 millions). Plus de la moitié de la population mondiale vit aujourd'hui dans des mégapoles, dont beaucoup sont situées près des côtes.

Les îles basses et les côtes (dont les zones de deltas, les zones humides...), des zones polaires aux tropiques, sont en première ligne face au changement climatique par leur exposition aux événements extrêmes, la vulnérabilité des écosystèmes dont ils dépendent pour leurs ressources naturelles et l'augmentation des pressions liées aux activités humaines. 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 aussi parmi les zones les plus densément peuplées au monde.

Si les modifications liées au changement climatique affectant l'océan mondial et la cryosphère 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, phénomènes extrêmes et cycle de l'eau

L'augmentation rapide du niveau de la mer et la plus grande fréquence de tempêtes violentes menacent des millions de vies mais aussi les moyens de subsistance de nombreuses populations, et vont

impliquer un coût de plusieurs milliards de dollars en infrastructures côtières.

L'élévation du niveau de l'océan s'est accélérée entre le milieu du xx^e siècle et ces dernières décennies. L'océan se réchauffe et se dilate, ce qui augmente son volume. À cela s'ajoute l'arrivée d'eau par la fonte des glaces continentales. De 1994 à 2018, l'océan est monté de 8,5 cm, soit une vitesse moyenne de plus de 3,5 mm/an. Cette progression est très variable selon les régions du monde. En Asie du Sud-Est par exemple, l'océan monte très rapidement, jusqu'à 15 mm/an dans certaines zones. En revanche, il baisse près des côtes de l'Alaska. Ceci s'explique par le fait que la chaleur de l'océan est redistribuée de manière inhomogène par la circulation océanique. La hausse du niveau moyen des mers est très dépendante des taux d'émissions de gaz à effet de serre. En 2100, sa valeur moyenne sera comprise entre + 0,43 m à + 0,84 m selon les scénarios du GIEC.

Cette hausse du niveau moyen des eaux marines provoque l'érosion des côtes, un phénomène dont les impacts vont être importants pour toutes les terres basses: en Arctique (où il est combiné à la fonte du permafrost et à la diminution de l'extension saisonnière des glaces), dans les villes côtières très peuplées qui concentrent de nombreuses activités économiques, dans les zones de deltas et dans les îles.

Les atolls coralliens ne sont pas des terres statiques et vont être soumis à la fois au phénomène d'érosion et à celui d'accrétion des terres en lien avec l'apport sédimentaire provoqué par des vagues plus fortes. Pour les îles Salomon, par exemple, sur 33 îles coralliennes étudiées, 5 ont disparu et 6 souffrent d'érosion sévère. À Tuvalu, avec une hausse du niveau moyen des mers d'environ 15 cm entre 1971 et 2014, les petites îles ont vu leur superficie diminuer alors que les îles plus grandes qui sont peuplées ont maintenu leur superficie ou l'ont accrue à l'exception de l'île de Nanumea. Sur 709 îles étudiées, environ 73,1 % ont eu une superficie qui est restée stable ces dernières 40 à 70



années, 15,5 % ont une superficie qui s'est accrue et 11,4 % ont vu leur surface diminuer depuis 40 à 70 ans. Néanmoins, la capacité des îles coralliennes à maintenir leur territoire en s'ajustant naturellement à l'élévation du niveau de la mer pourrait se réduire dans les décennies à venir suite aux effets combinés d'une hausse du niveau de la mer plus importante, de la force accrue des vagues, et des impacts du réchauffement et de l'acidification sur les récifs.

En Arctique, les effets combinés des changements de l'océan et de la cryosphère vont se mêler. La diminution de la couverture saisonnière des glaces réduit la protection des sols et l'accroissement de la température au sol affaiblit la stabilité des sols gelés. Actuellement, 178 communautés de l'Alaska font face à une érosion sévère des côtes et 26 d'entre elles sont dans une situation critique.

Le changement climatique va également être associé à une plus grande fréquence des tempêtes de type cyclonique de forte intensité. Les inondations et vagues violentes vont accentuer le phénomène d'érosion du littoral. Les projections du GIEC montrent que pour de nombreuses zones côtières, les événements extrêmes liés à la montée des eaux (inondations) qui se produisent actuellement tous les 100 ans pourraient advenir une fois par an d'ici la fin du siècle.

Les impacts peuvent concerner les écosystèmes eux-mêmes, les services rendus par ces écosystèmes à l'économie, les infrastructures côtières, l'habitabilité de la région, les moyens de subsistance des communautés et leurs valeurs culturelles et esthétiques. Les installations côtières (habitations, infrastructures, industries, activités agricoles et aquacoles) sont particulièrement vulnérables face à ces phénomènes météorologiques qui peuvent en effet engendrer des pertes humaines mais aussi d'importants dégâts économiques.

En 2015, le cyclone Pam a dévasté le Vanuatu, occasionnant 449,4 millions US\$ de dégâts pour un pays dont le PIB est de 758 millions de US\$. En 2017, le cyclone Winston a fait 43 morts aux Fidji et induit

des pertes équivalentes à un tiers du PIB du pays. En 2017, les ouragans Maria et Irma ont traversé 15 îles et nations des Caraïbes et le coût des réparations est estimé à 5 milliards de US\$. En 2018, le cyclone Gita a affecté 80 % de la population de Tonga.

L'entrée d'eau salée dans les terres suite à la hausse du niveau de la mer et aux inondations va altérer les nappes phréatiques (sources d'eau potable) et les eaux d'irrigation, provoquant une diminution des terres arables et des réserves hydriques. Ainsi, l'inquiétude grandit sur le fait que certains États Insulaires pourraient devenir inhabitables, ce qui aurait des conséquences en termes de réinstallation des populations et de souveraineté de ces États. De nombreux cas d'intrusion d'eau salée affectant les ressources en eau douce et les cultures ont également été constatés dans les zones de delta. Il est estimé qu'environ 260 000 km² de terres ont été temporairement submergés dans les années 1990/2000. La pénétration d'eau saumâtre a été observée dans l'estuaire du Delaware aux USA, dans le delta de l'Ebro en Espagne, dans le delta du Mékong au Vietnam. L'agriculture, notamment la riziculture peut être affectée. Au Bangladesh, la culture des oléagineux, de la canne à sucre et du jute a cessé. Les poissons d'eau douce vont perdre une partie de leur habitat, impactant de fait les communautés de pêcheurs. D'autres conséquences sont la salinisation de l'eau potable et la propagation du virus du choléra, comme par exemple dans le delta du Gange.

De plus, les changements affectant le cycle de l'eau – comme par exemple l'intensité et la fréquence des pluies qui sont liées à l'évaporation de l'eau de mer – accroissent les risques d'inondations dans certaines régions et de sécheresses dans d'autres. Ils affectent les ressources en eau et favorisent les épidémies. On constate donc des menaces accrues pour la santé publique, la sécurité alimentaire, les activités économiques (pêche, tourisme). Les changements de la cryosphère vont également avoir des conséquences sur la sécurité des populations en montagne qui dépendent de l'eau de fonte des glaciers pour leur approvisionnement. L'adaptation à ces phénomènes va

passer par la mise en place de systèmes de régulation du régime des eaux (eaux provenant de la fonte des glaces, gestion des eaux pluviales par exemple).

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

Les changements physiques et chimiques affectant l'océan et la cryosphère vont avoir des impacts importants sur les organismes et les écosystèmes marins et côtiers, affectant à leur tour les moyens de subsistance de millions de personnes qui dépendent directement de ces écosystèmes et des nombreux services qu'ils offrent. Le réchauffement, l'acidification et la désoxygénéation des eaux affectent les espèces marines benthiques et pélagiques, les grands prédateurs, et ils dégradent les écosystèmes tels que les récifs, les mangroves, les marais côtiers, les herbiers et les forêts d'algues.

Beaucoup d'espèces voient leur abondance et leur aire de répartition se modifier avec l'évolution de leur environnement. La disponibilité et l'abondance de ressources marines sont ainsi modifiées. On observe un déplacement vers le nord de certaines espèces, des événements biologiques (comme la reproduction par exemple) qui se produisent plus tôt dans la saison et un changement global de la répartition des espèces.

Les écosystèmes côtiers protègent le littoral contre l'érosion (97 % de la force des vagues est absorbée par les récifs coralliens) et offrent aux populations des ressources diversifiées (nourriture, bois des mangroves, substances utilisées en médecine traditionnelle, etc.). Ces services écosystémiques seront affectés par le changement climatique. La pêche et l'aquaculture sont impactées par les déplacements de la faune marine et les changements touchant le milieu marin. L'acidification, par exemple, affecte le phytoplancton, 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.

Déplacements des populations vulnérables

Ces phénomènes et changements environnementaux ont un impact direct sur divers aspects de la sécurité

humaine et sur les facteurs environnementaux, économiques, politiques et sociaux de la migration humaine.

Les Petits États insulaires en développement (PEID) dont l'économie est fortement liée à la pêche et au tourisme sont parmi les plus exposés. Les impacts du changement climatique vont exacerber les inégalités, provoquer des déplacements de populations et accroître la compétition pour l'accès aux ressources, ce qui augmentera les risques de conflits notamment pour les populations les plus vulnérables.

La transformation des côtes, particulièrement dans les îles basses, a des impacts culturels. Des études menées à Tuvalu montrent que depuis 40 ans, le changement climatique a affecté les lieux de résidence et la mobilité des populations et qu'il a provoqué le regroupement des communautés dans les zones les moins risquées. Le déplacement des populations affecte les structures sociétales, les modes de vie et de subsistance, et s'accompagne d'une perte des héritages culturels et identitaires.

On estime que la montée du niveau de la mer provoquée par une hausse de température globale de 2 °C d'ici la fin du siècle provoquerait la submersion de terres où vivent 280 millions de personnes. Si les risques sont plus élevés pour les zones côtières et les îles basses à faible revenu, cet enjeu concerne aussi les pays développés. Aux États-Unis, les ouragans ont provoqué des déplacements humains et ont eu des impacts économiques importants. Ces mouvements de populations liés aux événements extrêmes interagissent avec d'autres pressions migratoires dues à des causes environnementales et/ou économiques et politiques.

La combinaison de solutions d'adaptation va varier en fonction des impacts observés et pressentis, de la localisation géographique des populations, des capacités d'adaptation des sociétés et de l'établissement de nouveaux modes de gouvernance. La relocalisation des communautés et des activités économiques est de plus en plus considérée comme une solution d'adaptation au changement climatique. Elle s'accompagne cependant de discussions sur les coûts et les



impacts sur le bien-être des personnes relocalisées. Le retrait des populations des zones littorales et des terres basses est déjà en cours dans de nombreuses régions : Alaska, Guatemala, Colombie, Caraïbes, Vietnam. En Papouasie-Nouvelle-Guinée, la moitié des habitants des îles Carteret devraient être déplacés sur l'île de Bougainville d'ici 2020. Des relocalisations sont aussi en cours aux îles Salomon, en Alaska, et sur la côte ouest des États-Unis. Dès 2014, Fiji a aussi mis en œuvre avec succès des programmes de relocalisation de populations de certains villages (ainsi celui Vunidogoloa, à Vanua Levu, par exemple) suite à des phénomènes d'érosion. La relocalisation des populations va représenter un défi sociétal de plus en plus important pour les communautés insulaires et côtières.

En parallèle, d'autres stratégies migratoires peuvent être mises en place. Ainsi, dans de nombreuses régions du monde, les populations rurales touchées

par des aléas récurrents ont recours à la migration temporaire ou saisonnière ce qui leur permet de combler les pertes de revenus temporaires et de subvenir aux besoins de leurs familles grâce à l'emploi en ville ou à l'étranger. Certains pays dans le Pacifique participent par exemple à des programmes de circulation de travailleurs saisonniers mis en place par la Nouvelle Zélande, l'Australie ou le Canada. Si ces programmes n'ont pas été développés directement en réponse aux problématiques du réchauffement global, ils pourraient néanmoins bénéficier aux populations touchées par les impacts du changement climatique désireuses de diversifier leurs sources de revenu grâce à un emploi saisonnier à l'étranger. D'autres accords bilatéraux ou régionaux de ce type pourraient être envisagés à l'avenir pour soutenir les populations les plus affectées par les impacts du changement climatique, notamment dans les États insulaires.

Océan, changement climatique et migrations humaines: importance du Rapport spécial « Changement climatique de 1,5 °C »

En octobre 2018, le GIEC a publié un Rapport Spécial intitulé Global Warming of 1.5 °C. Faisant écho aux revendications déjà formulées par un groupe de pays parmi les plus vulnérables face au changement climatique en 2009 à l'occasion de la COP15 de Copenhague, ce rapport doit principalement son existence aux représentants des Petits États insulaires en développement (PEID) appartenant à l'Alliance of Small Island States (AOSIS). En effet, en 2015, à l'issue de la COP21, ce groupement de pays avait réussi à faire reconnaître leur insécurité au regard de la menace climatique, et ce, au travers de l'inscription, dans les textes de l'Accord de Paris, de trois constats cruciaux pour leur avenir: les états insulaires sont, au même titre que les pays les moins avancés (PMA), des pays vulnérables; cet état de fait requiert de leur apporter une aide financière spécifiquement destinée à l'adaptation; l'insécurité à laquelle ils font face pourrait diminuer si la hausse de la température était contenue à + 1,5 °C. Pour entériner cette dernière requête, les PEID ont demandé au GIEC d'émettre un rapport spécial servant à prouver scientifiquement la pertinence de cette exigence relative à la température. Rappelons que le réchauffement climatique atteint, directement et dangereusement, l'écosystème océan qui entoure les petites îles, en favorisant notamment la montée du niveau de la mer, les cyclones et les tempêtes, l'acidification et la désoxygénéation des eaux.

Rappelant l'urgence d'une réelle prise de conscience du devenir de la planète, les experts de ce Rapport spécial 1,5 °C ont donc analysé, avec une précision inédite, quels seront les dommages que nous subirions d'ici à 2100 si nous ne faisons rien pour limiter l'augmentation de la température globale à 1,5 °C par rapport aux années 1850-1900 (cette période de référence correspondant à l'époque de l'essor industriel et donc au début des émissions de gaz à effet de serre). Ce chiffre ne doit cependant pas être considéré

comme la solution pour vivre dans un monde meilleur, mais bien plutôt comme un remède au pire, qui ne soignera pas le mal de la planète. En effet, même si, à l'échelle internationale, les États consentaient à fournir les efforts d'atténuation et d'adaptation nécessaires à atteindre cet objectif de 1,5 °C, il n'en reste pas moins que les nombreuses régions mentionnées ci-dessus dans l'analyse des défis que représentent les changements de l'océan et de la cryosphère, continueraient de connaître une aggravation des risques climatiques. Et ce, alors même qu'elles y sont déjà confrontées et qu'elles n'en deviennent que plus vulnérables.

Retenons certains des aspects majeurs de ce Rapport 1,5 °C au regard de la question de la migration. Certes, à l'heure actuelle et au vu des données publiées, le GIEC n'est pas en mesure d'évaluer avec précision les niveaux de corrélation entre, d'une part, des augmentations de 1,5 °C, de 2 °C ou de 3 °C, et, d'autre part, des phénomènes croissants de mobilité humaine. Cette difficulté tient également au fait que la migration dépend de facteurs économiques, politiques et sociaux nombreux et souvent interconnectés, qui demeurent extrêmement complexes et qui sont propres à chaque pays ou à chaque peuple. Toutefois, il est certain que la migration dépend étroitement de l'insécurité et de la pauvreté multidimensionnelle qui, elles, sont donc fortement corrélées au changement climatique.

Notons que selon ce même Rapport, dans les communautés directement dépendantes de l'agriculture, une augmentation de l'émigration a pu être corrélée statistiquement avec une augmentation de la température. Par ailleurs et pour exemple, d'après une étude de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE), une augmentation moyenne de la température de 1 °C serait associée à une hausse de la migration bilatérale de 1,9 %. Pour un réchauffement de 2 °C d'ici la fin du siècle, des déplacements significatifs de populations dans les régions tropicales et sur des distances dépassant 1 000 km, pourraient aussi avoir lieu. Parmi les pays susceptibles de se voir contraints à un surcroît de migration climatique figurent ceux qui ont activement promu le Rapport, à savoir les Petits États insulaires en développement (PEID) qui sont en première ligne de par leur exposition directe à un milieu océanique de plus en plus changeant et de plus en plus dangereux.

Le rapport rappelle avant tout que le respect de la limite de 1,5 °C conditionne un principe fondamental et désormais inscrit dans l'Accord de Paris, à savoir le principe d'équité entre les individus, les nations et les générations. Rappelons que le changement climatique et ses conséquences néfastes frappent les États et les peuples de manière très inégale. Les pays industrialisés sont les moins vulnérables et les mieux armés pour lutter et s'adapter. À l'inverse, les pays non industrialisés, faiblement émetteurs de gaz à effet de serre, disposent de moyens de s'adapter bien plus limités. Or ces pays économiquement vulnérables sont ceux qui sont les plus durement et les plus fréquemment touchés par les dérèglements climatiques les plus graves. Inégalité des responsabilités, des richesses, des impacts et des moyens de s'en prémunir, constituent la toile de fond éthique sur laquelle s'appuient les experts du GIEC pour inviter les pays riches à projeter leurs réflexions et leurs actions au-delà de leurs frontières géographiques et politiques et de leurs préoccupations économiques – et, de fait, au-delà également des seules Contributions déterminées au niveau national (NDCs).

Le GIEC revendique donc deux impératifs globaux qui entrent en résonance avec le principe d'équité entre les individus, les nations et les générations: le développement durable et global est aujourd'hui nécessaire pour lutter contre le changement climatique, mais il se doit de tendre vers un autre objectif majeur, à savoir de lutter contre la pauvreté.



The international laws for Ocean and Climate

Bleuenn Guilloux

The interactions between Ocean and Climate Systems are difficult to envisage together legally, because existing frameworks are fragmented and complex to grasp. On the one hand, the international ocean law can be characterized as a comprehensive framework, erecting a global architecture. It consists of a broad range of sectoral and regional arrangements, within the unified legal framework of the 1982 UN Convention on the Law of the Sea (hereinafter UNCLOS)¹. The "constitution for the oceans" (T.B. Koh, 1982) is the result of the codification process of the Law of the sea and the formation of new legal rules (e.g., the Exclusive Economic Zone (EEZ) or the status of archipelagic States). It defines the rights and obligations of States conducting maritime activities (navigation, exploitation of biological and mineral resources, marine scientific research, etc.), according to a zonal division of seas and oceans into zones under national sovereignty or jurisdiction (internal waters, territorial sea and contiguous zone, EEZ, continental shelf) and, zones beyond the limits of national jurisdiction (High seas, the Area)². Since it came into force on the 16th November 1994, more than ten years after its signature in Montego Bay (Jamaica), the International Community has shown a growing concern for many issues related to the uses of seas and oceans and the protection of the marine environment. The topics of major concern are the collapse of most fisheries stocks, the destruction of marine and coastal habitats and biodiversity loss, the sustainable use and conservation of biodiversity of areas beyond national jurisdiction, land-based and marine pollution, and, in recent years, climate change impacts.

Rather than a comprehensive regulatory framework, the climate international law can be described, on the other hand, as a "regime complex", i.e. a network of partially overlapping and non-hierarchical regimes governing a common subject-matter³. The UN climate regime is the cornerstone of the international Law on climate change. It has developed through arduous and protracted international negotiations, aiming at consensus among States and group of States with diverging interests, goals and expectations. The 1992 UN framework convention on Climate Change (hereinafter UNFCCC), which came into force the same year as the UNCLOS in 1994, provides the framework for stabilizing GHG atmospheric concentrations "at a level which would prevent dangerous anthropogenic

1 The UNCLOS was signed on December 10, 1982 (1833 UNTS 3) and entered into force on November 16, 1994. It has 168 State parties in July 2019.

2 For a general schematic of these zones, see <https://www.geoportail.gouv.fr/donnees/delimitations-maritimes> (last consulted July 2019) and of France, <https://limitesmaritimes.gouv.fr/ressources/references-legales-en-vigueur-limites-despace-maritime> (last consulted July 2019).

3 R. O. Keohane, D. G. Victor, "The Regime Complex of Climate Change", *Perspectives on Politics*, Vol. 9, No.1 (March 2011).

interference with the climate system" (Art. 2)⁴. The UNFCCC has been complemented by the 1997 Kyoto Protocol to the UNFCCC (hereinafter KP), setting quantified emission limitation and reduction commitments for developed Parties⁵. The 2015 Paris Agreement (hereinafter PA) specifies the UNFCCC ultimate objective, by setting the result-based temperature objective for all Parties "of holding the increase in the global average temperature to well below 2°C above pre-industrial levels and pursuing efforts to limit the temperature increase to 1.5°C above pre-industrial levels" (Article 2(1)(a))⁶. Besides the UN treaty-based regimes, the climate regime is prone to virtually encompass all sectors of activity or environmental problems through Conferences of parties (hereinafter COP) and Meetings of Parties to the KP (hereinafter MOP), to integrate new regimes or, to coordinate or cooperate with other regimes and fields of international law such as trade law, human rights and the law of the sea.

As framework conventions, the UNCLOS and the UNFCCC are the starting point of new specific legal regimes which evolve over time. With their respective "ethos", context of negotiation, legal scope and character, objectives and mandate, membership, norms, underlying principles and experts, they are loosely coupled. They only intertwine, overlap and occasionally interact on the legal and institutional level. The consideration of climate change under the UNCLOS is mostly interpretative. As ocean-relevant issues, they are under-represented in the consecutive treaties and on the climate agenda, although the vivid nature of climate negotiations does not exclude a greater emphasis in the future.

CLIMATE CHANGE WITHIN THE OCEAN INTERNATIONAL LAW

The UNCLOS makes no explicit reference to climate change. *Prima facie*, the reduction of Greenhouse Gases (hereinafter GHG) to protect and preserve the marine environment falls outside its scope. The Convention shall nonetheless be interpreted and applied in good faith, considering any relevant rules of international law applicable in the relations between the parties, which encompasses the climate UN regime. In that respect, climate change has emerged in recent years beyond the UN climate regime and the fragmentation of international law, leading ocean specialists and policymakers to tackle this urgent challenge.

The interpretative consideration of certain aspects pertaining to climate change in the UNCLOS

The UNCLOS was negotiated during the third UN Conference on the Law of the Sea (1973-1982) at a time climate change was not on international environmental agenda. If the UNCLOS does not directly address climate change, it can be interpreted and applied to it, particularly through its provisions on "Protection and Preservation of the marine environment" (Part XII) and on "Marine Scientific Research" (Part XIII).

The Protection and the Preservation of the Marine Environment from climate impacts

The UNCLOS provides provisions enabling the conservation and enhancement of GHG sinks and reservoirs and, the protection of the marine environment from

4 The UNFCCC was adopted in New York on May 9, 1992 (1171 UNTS 107). It was opened for signature at the Rio De Janeiro Earth summit of June 1992 and came into force on March 21, 1994. It comprises 197 Parties in July 2019, including 196 States and the EU.

5 The PA on Climate (Annex of the decision 1/CP.21) was signed on December 10, 2015 and entered into force in a record time on November 4, 2016 (183 Parties in August 2019).

6 The UNFCCC was adopted in New York on May 9, 1992 (1171 UNTS 107). It was opened for signature at the Rio De Janeiro Earth summit of June 1992 and came into force on March 21, 1994. It comprises 197 Parties in July 2019, including 196 States and the EU.



atmospheric pollution and degradation. This possible linkage operates through its provisions on the "protection and preservation of the marine environment" (Part XII). The conventional and customary obligation to protect and preserve the marine environment embedded in article 192 UNCLOS is relevant for climate change and potentially, GHG emissions impacting the marine realm and its biodiversity. This general obligation may apply to rare or fragile ecosystems like coral reefs, wetlands, vents and seamounts, as well as to habitats of depleted, threatened or endangered species and other marine life forms (Article 194(5)) affected by ocean acidification, deoxygenation or warming. It limits the States' right to exploit their natural resources (Article 193).

The obligation to protect and to preserve the marine environment is supplemented with other provisions tackling marine environment pollution. These provisions include general measures to prevent, reduce and control pollution from any source (art. 194), and specific measures such as measures to combat pollution from land-based sources (art. 207), pollution by dumping (art. 210), pollution from vessels (art. 211) and pollution from or through the atmosphere (art. 212). While dumping of wastes at sea, vessel-source oil and other pollutions have been controlled very effectively since the 1970s, land-based and atmospheric pollution of the marine environment have largely escaped regulation. Around 80% of pollution that entering the marine environment comes from land-based discharges and atmospheric sources.

Even if GHG are not specifically mentioned in UNCLOS as a source of pollution of the marine environment, the precautionary approach is applicable if there is evidence of a risk of serious or irreversible harm to the marine environment. It is also possible to interpret Part XII to include this type of pollution given the broad definition of marine pollution in article 1(1)4 and the indicative list of sources of pollution in article 194(3). The definition of marine pollution is significant as it provides criteria to determine a type of "substance or energy" is a marine pollution. It triggers the application of many pollution-related treaties. Not only GHG emissions from ships but a wide range of

marine activities (mining extraction, shipping, etc.), as well as terrestrial activities (on land industrial activities, mining, deforestation, etc.) could possibly be covered, as sources of GHG, by the obligation of due diligence set in Article 194. Combined, Articles 194, 207 and 212 could cover all airborne sources of marine pollution comprehensively, including GHG. The relevant obligations of States can be inferred from the UNCLOS and underpins in a mutually supportive manner the UN climate change regime, the International Maritime Organization (hereinafter IMO) regime or the regional seas conventions and action plans¹.

The obligation for States and competent International Organizations to promote Marine Scientific Research, including on the ocean-climate nexus

The UNCLOS Part XIII on Marine Scientific Research (hereafter MSR) provides an innovative legal regime, governing scientific activities carried out by States and competent international organizations anywhere at sea. It includes, *inter alia*, provisions on the need to promote marine scientific research (art. 239) and international cooperation (art. 242), to create favorable conditions for MSR (Art. 243) and to circulate information and knowledge resulting from MSR by publication and dissemination (art. 244). Under these provisions and by means of synergistic cooperation, several national, regional and global research has been conducted in the marine realm with the aim of better understanding the impacts of climate change on the ocean and its biodiversity. For instance, the

1 At regional Level, Regional Seas Programmes, traditionally focused on combatting marine pollution, were for a long time "underutilized" for cooperation between States and with regional fisheries management organizations (RFMOs) in addressing the adverse effects of climate change on the ocean. Among few constructive examples, the 2008 Protocol on Integrated Coastal Zone Management in the Mediterranean to the 1976 Convention for the Protection of the Marine Environment and the Coastal Region of the Mediterranean (in force since 2011) sets among its objectives the prevention and the reduction of natural hazards, and particularly climate change, which can be induced by natural or human activities (Art. 5 (e)). For more general information, D. Freestone, "Climate Change and the Oceans", Carbon & Climate Law Review, Vol. 3, No. 4, 2009, pp. 383-386; A. Boyle, "Law of the Sea perspectives on Climate change", The International Journal of Marine and Coastal Law, 27(4), 2012, pp. 831-838; J. Harrison, "Saving the Oceans through Law: The international Legal Framework for the protection of the Marine Environment", Oxford, Oxford University Press, 2017; S. Lee, L. Bautista, "Part XII of the United Nations convention on the Law of the Sea and the Duty to mitigate Against Climate Change: Making out a Claim, Causation, and Related Issues", Ecology Law Quarterly, Vol. 45- Issue 1, 2018, pp. 129- 156.

study of the ocean-atmosphere couple has been strengthened through ocean observing programs and geographic information systems, such as the Global Observation Observing System (GOOS) or the Global Sea Level Observing System (GLOSS). Ultimately, best available science has feed the decision-making process, and has invited States and non-state actors to develop sustainable and resilient ecosystem-based adaptation paths².

Although the ocean science advances, there remain considerable knowledge, information, technological, financial, infrastructural and disciplinary gaps, as well as disparities amongst States. It can hamper the ability of policymakers to make informed decisions, even though ocean science plays a decisive and cross-cutting role in the achievement of the 2030 Agenda. As for the ocean and climate nexus, additional information is still needed in order to better understand sea temperature, sea level rise, salinity distribution, carbon dioxide absorption as well as nutrient distribution and cycling, many of which will be filled by the IPCC Special Report on "the Ocean and Cryosphere in Changing Climate" (SROCC) to be released in September 2019³. The forthcoming UN Decade of Ocean Science for Sustainable Development (2021-2030) carries with it the hope of opening the field of marine science to a more transdisciplinary approach, integrating human, social and legal scientists and stakeholders in the development of adaptive and reflexive socio-ecological solutions⁴.

2 See, in particular, "The first global integrated marine assessment", under the auspices of the UN General Assembly and its Regular Process for Global Reporting and Assessment of the State of the Marine Environment, 2016, available online: <https://www.un.org/regularprocess/content/first-world-ocean-assessment> (last consulted July 2019); the UNESCO-IOC "Global Ocean Science Report: The Current Status of Ocean Science around the World", 2017, available online: <https://en.unesco.org/gosr> (last consulted July 2019), The IPBES "Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services", May 2019, available online: <https://www.ipbes.net/global-assessment-report-biodiversity-ecosystem-services> (last consulted July 2019) and; the IPCC reports including the forthcoming special report (SROCC) on "The Ocean and Cryosphere in a changing Climate", available online: <https://www.ipcc.ch/reports/> (last consulted in July 2019).

3 For more information, www.ipcc.ch/report/srocc (last consulted in July 2019).

4 For more information, <https://en.unesco.org/ocean-decade> (last consulted In September 2019).

Climate change: an urgent challenge for ocean governance

The undebated evidence of the cumulative deleterious impacts of anthropogenic climate change on the marine environment (warming, sea-level rise, acidification, deoxygenation, disruption of ocean water masses and currents, loss of polar ice, biodiversity changes, release of methane, etc.), because of their geographic and temporal scales and complexity, as well as a lack of political will, have been slow to be translated into adaptive legal rules. It was only in the 2006 that climate change really started to be discussed by the ocean community and not only by some particularly vulnerable coastal and archipelagic States or active non state-actors⁵. Mitigation and adaptation challenges such as sea-level rise, ocean acidification, fisheries, GHG emissions from shipping, marine geo-engineering activities are still being discussed or even sometimes regulated within and beyond the ocean regulatory framework, without yet reaching a congruent programmatic vision. Two examples of well-advanced climate-related topics are given below.

The Sea-level rise: shifting maritime boundaries and likely disappearance of States

Besides threatening the integrity of marine ecosystems and environment, climate change threatens States' and population's integrity by the effect of sea-level rise caused by the melting of continental glaciers and polar caps and warming. Depending on the climate scenario, global mean sea level rise is projected to be between 30 cm and 1.10 m in 2100. The sea-level is not rising uniformly with significant local variations, with some areas experiencing three times the global average. More than 70 States are or are likely to be directly affected by sea-level rise, including many in low-lying least developed coastal States

5 See the two reports on the work of the United Nations open-ended informal Consultative process on the oceans and the Law of the Sea to the UN General Assembly on "The impacts of ocean acidification on the marine environment", A/68/159, July 17, 2013 and on "The effects of Climate change on the Oceans", A/72/95, June 16, 2017, available online: https://www.un.org/depts/los/consultative_process/consultative_process.htm (last consulted July 2019). In February 2019, The UNFCCC Secretariats joined UN-Oceans, the interagency mechanism on ocean and coastal issues with the UN System: see UN-Oceans 19th Session Report, Geneva, February 2019, available online: http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/unoceans/docs/UN-Oceans19thMeetingReport.pdf (last consulted July 2019).



and small island developing States which are and will be flooded or submerged by seawater. Another quite large number of States is likely to be indirectly affected by the displacement of people or the lack of access to resources.

Sea-level rise prompt several crucial questions relevant to international law and the Law of the Sea: possible legal effects of sea-level rise on the "shifting" baselines and outer limits of the maritime spaces measured from the baselines (territorial sea and contiguous zone, archipelagic waters, EEZ and continental shelf); on the status of natural or artificial islands and coastal States' maritime entitlements; on maritime delimitation between neighboring States; on maritime spaces under sovereignty and jurisdiction, especially regarding the exploration, exploitation and conservation of resources by the Coastal States, as well as the rights of third States and their nationals (e.g., innocent passage, freedom of navigation, fishing rights). In the most extreme cases, sea-level rise will mean the disappearance of coastal and low-lying islands which will be submerged or rendered uninhabitable. This raises the thorny political, moral and humanitarian issue of the possible loss of Statehood of archipelagic States and, the urgent need for protection of displaced persons which it entails.

Legal solutions are being discussed by legal scholars or have already been put in place to address these challenges: the reinforcement of coasts and islands with barriers or the erection of artificial islands as a means to preserve the statehood of island States against risks of submersion, erosion or salinization of freshwater reserves; the transfer, with or without sovereignty, of a portion of territory of a third State, as in the case of Kiribati purchasing land in Fiji or Tuvalu in New Zealand and Australia; the creation of a legal fiction of the statehood's continuity of islands States, by freezing baselines and/or outer limits as legally established before islands states were submerged or uninhabitable or; the creation of federations of association between small island developing States and other States to maintain

the former statehood or any form of international legal personality⁶.

The regulation of GHG emissions from ships

Considering the importance of maritime transport (about 90% of trade is carried out on the oceans and seas) and its GHG emissions accounting for roughly 2.2% of total carbon emissions, control and reduction of GHG emissions from international shipping are a major challenge for ocean governance. Most of the GHG emissions from ships are emitted in or transported to the marine boundary layer where they affect atmospheric composition. In general, the link between the UNFCCC bodies and COP and, the IMO is more co-operative than conflictive. Co-operation with the IMO (174 Member States and 3 associate members) has become a regular agenda item of the UNFCCC Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice (hereinafter SBSTA), under which the IMO reports its progress in accordance with the climate law objectives. The IMO was and still is a catalyst for co-operation, even if the negotiations on GHG emissions reduction have been shaped by tensions between developed and developing States.

Shortly before the Kyoto conference, the Conference of Parties to the 1973/78 convention for the Prevention of Marine Pollution (hereinafter MARPOL) adopted on 26 September 1997 a new Annex VI on "Regulations for the Prevention of Air pollution from Ships", setting out modest non-mandatory standards to reduce air pollution from all ships, with emphasis on Sulphur Oxide (SOx) and nitrogen oxide (NOx). Following the entry

⁶ These solutions, already studied by the International Law Association since 2012, will be the subject of a future report by the International Law Commission on "Sea-Level Rise in relation to International Law" as recommended in decision A/73/10 of 2018, available online: http://legal.un.org/ilc/guide/8_9.shtml (last consulted July 2019). For more information: D. Vidas, "Sea-Level Rise and International Law: At the Convergence of Two Epochs", 2014, Climate Law, 4, pp. 70-84; C. Schofield and A. Arsana, Climate change and the limits of maritime jurisdiction, in R. Warner, C. Schofield (ed.), "Climate Change and the Oceans: Gauging the Legal and Policy Currents in the Asia Pacific and Beyond", Cheltenham, UK/ Northampton, MA, USA, Edward Elgar, 2012, p. 127-152; J. G. Xue, Climate Change and the Law of the Sea: Challenges of the Sea Level Rise and the Protection of the Affected States, in K. Zou (ed.), "Sustainable Development and the Law of the Sea", Leiden/Boston, Nijhoff-Brill, 2016, pp. 243-277; K. N. Scott, "Climate Change and the Oceans: Navigating Legal Orders", in M. H. Nordquist, J. N. Moore, R. Long (ed.), Legal order in the World's Oceans: UN Convention on the Law of the Sea, 2017, Leiden/Boston, Brill-Nijhoff, pp. 124-164.

into force of Annex VI on 19 May 2005, the Marine Environment Protection Committee (MEPC) agreed to revise MARPOL Annex VI with the aim of significantly strengthening the emission limits via technological improvements and implementation experience. After three years of examination, the MEPC adopted the revised MARPOL Annex VI and the associated NOx Technical Code in October 2008, which both entered into force on 1 July 2010. Contracting Parties to Annex IV has increased rapidly (from 91 in July 2018 to 143 a year later), including the States accounting for almost all global tonnage.

In July 2011, the MEPC 62 adopted the first mandatory global GHG reduction regime for an entire industry sector and the first legally binding agreement instrument to be adopted since the KP, which entered into force on 1st January, 2013, applicable to all ships navigating under the flag of States Parties. It adds to MARPOL Annex VI a new Chapter 4 entitled "Regulations on energy efficiency for ships", which makes the Energy Efficiency Design Index (EEDI) mandatory for new ships and the Ship Energy Efficiency Plan (SEEMP) for all ships over 400 gross tonnage. It requires ships to be constructed according to a design, named Energy Efficiency Design index (EEDI), which sets a minimum energy-efficiency level for different ship types and sizes. In October 2016, the MEPC 70 approved a Roadmap for developing a comprehensive IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships, which provides for an initial GHG reduction strategy to be adopted in 2018 and a revised Strategy by 2030.

In May 2019, MEPC 74 progressed in the implementation of its initial strategy by, among others, planning to amend MARPOL Annex VI at MEPC 75 in April 2020 to strengthen the existing EEDI for some categories of new ships forward from 2025 to 2022 with lower emission reduction targets, adopting a resolution on "Invitation to Member States to encourage voluntary cooperation between the port and shipping sectors to contribute to reducing GHG emissions from ships" and, approving a "Procedure for assessing impacts on States of candidate measures for reduction of GHG emissions from ships".

Despite these measures, an increase of shipping's GHG emissions of 50-250% is foreseen by 2050. The impacts of EEDI on reduction of shipping emissions are estimated to be small. Since the EEDI regulation affects only new build ships, most of ships will not be covered by EEDI before 2040. Furthermore, GHG emissions are not the only aspect of shipping which may affect marine environment. The use of high-density fuel oil in or near the Arctic Ocean produces harmful and significantly higher emissions of Sulphur oxide (SOx) and nitrogen oxide (NOx) that contribute to accelerated snow and ice melt. More generally, although the amendments to Annex VI will have a relatively small impact in controlling global GHG emissions. To avoid emissions "leakage" and be synergetic, GHG reduction efforts from shipping must be correlated with reduction efforts in aviation and land transportation and beyond, with technology, operations and alternative energy sectors⁷.

OCEAN WITHIN THE CLIMATE INTERNATIONAL LAW

In a disconcerting trompe-l'oeil effect, the realistic legal imagery of the climate international law creates the forced illusion that the ocean does not appear to be relevant to climate change or at least, only as a background image in climate negotiations and treaties. This is not so much due to the absence of the ocean in the UN climate regime, but to the lack of overall treatment and effectiveness of the specific legal provisions applicable to it. The ocean is marginally considered by the UNFCCC and the KP, whereas the extent to which the PA is applicable to it remains progressive and therefore, uncertain in its legal effect. However, the vivid nature of climate negotiations pro-

7 For more information, D. Bodansky, "Regulating Greenhouse Gas emissions from Ships: The Role of the International Maritime Organization", in H. Scheiber, N. Oral and M. Kwon (eds.), *Ocean Law Debates: The 50-Year Legacy and Emerging Issues for the Years Ahead*, Leiden/Boston, Brill-Nijhoff, 2018, pp. 478-501; A. Chircop, M. Doelle and R. Gauvin, "Shipping and Climate Change International Law and Policy Considerations", Special Report of the Center for International Governance Innovation, 2018, 92 p., available online: https://www.cigionline.org/sites/default/files/documents/Shipping%27s%20contribution%20to%20climate%20change%202018web_0.pdf (last consulted July 2019).



bably foresees a greater emphasis of ocean-related issues in the future.

The trompe l'oeil view of the ocean in the UNFCCC and the KP

The preamble (recital 4) of the UNFCCC expressively refers to the role and importance of sinks and reservoirs of GHG in marine ecosystems. Article 4 (1) d) states that all Parties, "[...] shall promote sustainable management, and promote and cooperate in the conservation and enhancement, as appropriate, of sinks and reservoirs of all greenhouse gases not controlled by the Montreal Protocol, including [...] oceans as well as other [...] coastal and marine ecosystems". The UNFCCC apprehends the ocean through this "narrow but significant prism"⁸. As for measures related to "integrated plans for coastal zone management" (Art. 4 (1) e)) or the possible adverse effects of sea-level rise on islands and coastal areas (Preamble, recital 12), they are equally vague because adaptation was originally not clearly or only theoretically defined in the UN climate regime.

In the KP, the ocean remains marginally considered. The only notable provision concerns the reduction in GHG from maritime transport sector. Article 2(2) of the KP provides that "the Parties which accounted in total for at least 55 % of the total carbon dioxide emissions for 1990 (Annex I) shall pursue limitation or reduction of emissions of greenhouse gases not controlled by the Montreal Protocol [...] from marine bunker fuels, working through [...] the International Maritime Organization", mandating this specialized UN organization to take more specific mitigation measures in this sectoral area. To track these measures, the IMO Secretariat is regularly reporting to the UNFCCC subsidiary Body for Scientific and Technological Advice (SBSTA) under the agenda item on "emissions from fuel used for international aviation and maritime transport" and participate in UN system activities including side events parallel to COP-MOP-CMA.

In both treaties, the extent to which the ocean and the marine ecosystems can be conserved and enhanced as GHG sinks and reservoirs to mitigate anthropogenic climate change remains vague, without further detailed provisions or reference to the UNCLOS or other relevant agreements. This can partially be explained by the broad scope of the UNFCCC and the fact that the UN climate negotiations has traditionally focused on land based GHG emissions in the atmosphere. If States have however been encouraged to protect and enhance sinks and reservoirs of GHG, only terrestrial sinks or considered as such like mangroves have been utilized by States to meet the emission targets⁹. Ocean sinks, which are nevertheless the most important climate mitigator, remain mostly ignored because they are naturally occurring, rather than directly attributable to human activities.

A progressive consideration of the Ocean within the PA framework

The PA is built up on the 2009 Copenhagen (minimalist) Accord¹⁰ and the 2010 Cancun Agreements¹¹. It broadens the UN climate regime to encompass the GHG emissions of emerging economies such as China, India and Brazil. Contrary to the internationally negotiated and legally binding emissions targets of the KP, it involves a bottom-up process in which States make Nationally Determined Contributions (NDCs), specifying their plan to limit their domestic emissions (Art. 3) vis-à-vis the temperature limitation goals set for all States in Article 2¹².

The inclusion of a reference to the ocean in the preamble of the PA acknowledges a renewal of how the ocean is considered by the Climate law, since it is explicitly mentioned as such, albeit only in general terms and in non-operative part: "noting the im-

⁹ Hence blue carbon coastal ecosystems have not become a new climate mitigation and co-beneficial adaptation option under the UN climate regime, but they have been partially included in existing market-based mechanisms. For example, mangroves only are eligible under The UN collaborative Programme on Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation (REDD+).

¹⁰ Decision 2/CP.15.

¹¹ COP 16/CMP 6.

¹² The Agreement provides for emission reduction commitments for all States, "holding the increase in the global average temperature to well below 2 °C above pre-industrial levels and to pursue efforts to limit the temperature increase to 1.5 °C above pre-industrial levels" (Article 2 (1) (a)).

⁸ B. Guilloux, R. Schumm, "Which international Law for Ocean and climate?", Ocean & Climate platform Scientific Note, 2016, p. 84, available online: https://youthforocean.files.wordpress.com/2017/06/161026_scientificnotes_guilloux.pdf (last consulted July 2019).

portance of ensuring the integrity of all ecosystems, including oceans, and the protection of biodiversity, recognized by some cultures as Mother Earth [...]” (Preamble, Recital 13). This Recital responds to a long-standing concern that marine biodiversity and ecosystem integrity risks are not sufficiently considered by Parties when taking climate action. Such a clause can assume a function of integration and of conflict avoidance with the ocean international law. Although essentially symbolic and political, its legal effect is linked to the universal scope of and the twilight legal effect on the PA itself.

The PA also gives adaptation prominence, which is an important dimension of climate action for several biodiversity, fishery and regional seas instruments. Parties recognize that adaptation is a multiscale global challenge and a key component of the long-term global response to climate change to protect people, livelihoods and ecosystems, particularly in vulnerable developing countries (Art. 7). Therefore, it can serve as a potential common denominator to improve legal and political synergies between ocean and climate regimes. Like the UNFCCC and the KP, the PA remains elusive about ocean-related issues, both in terms of mitigation and adaptation¹³. This lack of consideration must not appear to foreshadow a disappointing legal future, insofar as the implementation of the PA is based on a progressive bottom-up approach¹⁴.

Towards a greater emphasis on the ocean in the climate regime?

¹³ Article 5(1) specifically emphasizes the role of forests in conserving and enhancing GHG sinks and reservoirs. The ocean is not explicitly mentioned which indicates that it is not a priority focus. Moreover, no further reference to the IMO is made in either the PA, nor the decisions to implement the Agreement, including the pre-2020 ambition and action.

¹⁴ For further information, see S. Lavallée, S. Maljean-Dubois, « L'accord de Paris : Fin de la crise du multilatéralisme climatique ou évolution en clair-obscur ? », 2016, RJE, pp. 19-36 ; R. Clémenton, "The Two Sides of the Paris Climate Agreement: Dismal Failure or Historic Breakthrough?", 2016, Journal of Environment & Development, Vol. 25(1), pp. 3-24; D. Klein, M.P. Carazo, M. Doelle, J. Bulmer and A. Higham, "The Paris Agreement on Climate change: Analysis and commentary", Oxford, 2017; D. Bodansky, J. Brunnée and L. Rajamini, "International climate Change Law", Oxford, 2017; R.J. Salawitch, T.P. Canty, A.P. Hope, W.R. Tribett, B. F. Bennett, "Paris Climate Agreement: Beacon of Hope", Springer, 2017; S. Oberthür, R. Bodle, "Legal Form and Nature of the Paris Outcome", 2016, Climate Law, Vol. 6, pp. 40-57; M. Torre-Schaub, (dir.), « Bilan et perspectives de l'Accord de Paris (COP 21) : regards croisés, IRJS, 2017.

In implementing the PA, States have significant capacity to enhance synergies between the ocean and climate regimes (and avoid conflicts) by adopting congruent NDCs and, by providing incentives for domestic actors to change their behavior in order to contribute to both climate and ocean regimes' objectives. At International level, it is likely that the ocean will be discussed in formal negotiations, if not as a separate topic, at least in relation to adaptation action.

Valuing the role of Ocean in Nationally Determined Contributions (hereinafter NDCs)

Rather than setting binding targets within the PA itself, all Parties define independently these targets to the global response to climate change within their NDCs, which cover the efforts made by each of them to reduce national GHG emissions and to adapt to the adverse effects of climate change (Art. 4). Article 3 set a general obligation of conduct, i.e. to undertake and communicate NDCs of increasing ambition, whereas the overarching temperature goal of Article 2 is an obligation of result¹⁵.

In July 2019, 6183 States and the European Union have submitted a NDC on the dedicated UNFCCC platform, representing all Parties to the PA¹⁶. Many contributions are based on national circumstances, address all national major or most significant sources and sinks of GHG emissions and, include an adaptation component. In framing their NDCs, States have significant capacity to enhance synergies between the ocean and climate regimes (and avoid conflicts) by adopting congruent mitigation and adaption policies, and by providing incentives for domestic actors to change their behaviour in order to contribute to both climate and ocean regimes' objectives. Out of 146 coastal or archipelagic States Parties to the PA

¹⁵ J. Pickering, J. S. McGee, S. I. Karlsson-Vinkhuyzen and J. Wenta, "Global Climate Governance Between Hard and Soft Law: Can the Paris Agreement's 'Crème brûlée' Approach Enhance Ecological Reflexivity?", Journal of Environmental Law, 2019, Vol. 31, pp. 1-28; L. Rajamani, "The 2015 Paris agreement: Interplay between hard, soft and non-obligations", Journal of Environmental Law, 2016, Vol. 28, pp. 337-358; N. Höhne, T. Kuramochi, C. Warnecke, F. Röser, H. Fekete, M. Hagemann, T. Day, R. Tewari, M. Kurdziel, S. Sterl and S. Gonzales, "The Paris Agreement: resolving the inconsistency between global goals and national contributions", 2017, Climate Policy, Vol. 17(1), pp. 16-32.

¹⁶ NDC Registry (interim): <https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/Pages/Home.aspx>.

which have submitted a determined contribution, 82 have expressively identified key issues relating to the ocean in the context of mitigation or adaptation, among which about 60 of them have established a clear linkage with SDG 14 (Life below Water). 16 other States mention the ocean in a very superficial or only to describe their geographical context. Together, they represent approximatively 67% of the total of NDCs registered in 2019. 49 coastal and archipelagic States do not refer to the ocean or ocean-related subject matters (e.g. fisheries, coastal ecosystems, sea-level rise) at all, including some with very large marine areas such as USA, Australia and the Russian Federation. Surprisingly, some States which do not address ocean-related actions in their NDCs (for e.g. Monaco or Norway) are very active on the international scene. The Annex I countries remain systematically focused on climate change as more a problem of mitigating emissions and neglect the ocean (for e.g. the EU member States), which demonstrate a caesura among developed States between ocean and climate regimes. On the contrary, SIDS and African countries, particularly vulnerable to climate change and lacking capacity, show a will of interaction between ocean and climate regimes through ocean-based adaptation measures related to fisheries (42 NDCs), coastal protection (54 NDCs) or the preservation of marine ecosystems (for e.g. Benin and Guinea Bissau). These expressions of will and concern are still struggling to be transformed into an operative action framing due to a lack of information and capacity. Certain impacts such as ocean acidification (14 NDCs) receive little attention from governments because the lack of knowledge and education and 39 NDCs include information on additional marine research needs¹⁷.

NDCs are a mean for Parties to adjust to national circumstances and particularities which is of great relevance for ocean-based adaption and mitigation. But they also bear the risk of a belayed and insufficient im-

plementation of Article 2 or of disorderly pluralism¹⁸. It will be therefore necessary to monitor the cost-effectiveness and implementation of ocean-based mitigation and adaptation national measures in a changing climate and environment. Finally, whilst indicating the will of certain States, particularly developing States, to tackle ocean and climate-related issues in a coordinated or integrated manner, NDCs are not the only indication of government's investment in ocean and climate-related actions and other pathways of interactions could be followed.

"Oceanizing" the climate negotiations

During the period from 1992 to 2015, it appeared that climate treaty bodies have been rather passive on the relationship with the ocean regime, which may be surprising given the potential for conflicts or synergies. National delegates generally demonstrated a lack of political will to put ocean related issues on the political agenda or, to develop any ocean-related strategy, because this will bring highly contested issues among State Parties, such as funding or technology transfer.

It was only at COP 21 that some already active groups of States (SIDS and the Alliance of Small Islands States (AOSIS)) or, more eclectic alliance of developed and developing States along with non-state actors, initiated actions to raise awareness of climate risk in oceans and coastal areas, to influence the outcomes of Climate COP and, to foster ocean and climate regime interactions. Following the request made by governments to the IPCC to prepare a Special Report on "the Ocean and Cryosphere in Changing Climate" (SROCC)¹⁹, such mainstreaming gained in intensity. It resulted in recurrent dedicated "Ocean days" and ocean-related side-events alongside official climate negotiations and, the formulation of programmatic

18 Compared with the emission levels under least-cost 2°C scenarios, aggregate GHG emission levels resulting from the implementation of the INDCs in 2016 were expected to be higher by 19% in 2025 and 36% in 2030: Doc. FCCC/CP/2016/2 (2 May 2016), pp. 10-11. On the effects of disorderly pluralism in International Law, see M. Delmas-Marty, *Les forces imaginantes du droit (II) : Le pluralisme ordonné* (Paris : Seuil, 2006), 303 p.

19 The decision to prepare a SROCC was made at the Forty-Third Session of the IPCC in Nairobi (Kenya, 11-13 April 2016): "Decision IPCC/XLIII-6. Sixth Assessment Report (AR6) Products. Special Reports", para. 4, p. 11: https://archive.ipcc.ch/meetings/session43/p43_decisions.pdf. The SROCC is under the joint scientific leadership of Working Groups I, II and III with support from the WGII TSU.

17 N. D. Gallo, D.G. Victor, L.A. Levin, "Ocean Commitments under the Paris Agreement", *Nature Climate Change*, vol. 7 (November 2017): 837.

orientations, including the “Roadmap to Oceans and Climate Action” (ROCA)²⁰, the “Because the ocean” initiative²¹ and, the “Ocean pathway towards an Ocean inclusive UNFCCC process”²².

In the wake of SROCC findings which will be disclosed in September 2019, the COP 25 (co-hosted by Chile and Costa Rica), envisioned by the Chilean president as the “Blue COP”²³, could serve as a political momentum to address ocean and climate nexus in a more integrated manner. As the climate change has “climatized” the global political debates²⁴, the ocean could “oceanize” climate negotiations by gaining traction, even among unilateralist countries (e.g. Australia, Japan or the USA) and, seeking an ocean-specific UNFCCC COP agenda item and/or a SBSTA entry point. If not tackled as a separate topic, the ocean will be however correlated to adaptation. Oceans, coastal areas and ecosystems, including mega deltas, coral reefs and mangroves, will be addressed within

20 For more information, <https://roca-initiative.com/> (last consulted July 2019).

21 For more information, <https://www.becauseocean.org/> (last consulted July 2019).

22 For more information, <https://cop23.com.fj/the-ocean-pathway/> (last consulted July 2019).

23 C. Schmidt, “Before the Blue COP”, opening speech, Because the Ocean Imitative Workshop, Madrid, April 10, 2019, available online: <https://www.becauseocean.org/before-the-blue-cop-madrid-workshop-opens/> (last consulted in July 2019).

24 See S. Aykut, J. Foyer, E. Morena, “Globalising the Climate: COP 21 and the climatization of global debates”, Routledge, 2017.

the Nairobi work programme on impacts, vulnerability and adaptation to climate change (NWP)²⁵.

CONCLUSION

The question of whether Ocean and Climate International Laws will be able to face in a congruent way new challenges posed by climate change on the ocean (and vice versa) remain open. For now, their responses lack of regime interactions, as well as synergies between mitigation and adaptation measures and across time and temporal scales. Throughout global, regional, sectoral and national laws and policies, mitigation and adaptation are often treated separately. Adaptive Law could help to reflect the diversity of socio-ecological contexts, reconcile the enhancement of the ocean and marine ecosystems as sinks of GHG with their conservation, in accordance with the precautionary principle and an integrated management. Such a dynamic and resilient approach based on transdisciplinary governance could foster synergies between separate management approaches (climate change mitigation and adaptation, marine pollution, biodiversity conservation, fisheries) and fragmented regimes (ocean, climate and biodiversity regimes).

25 Doc. FCCC/SBSTA/2019/INF.1 (11 June 2019), para. 30 and 31.

Auteurs

Denis ALLEMAND, Centre Scientifique de Monaco

Denis BAILLY, Université de Bretagne Occidentale

Gilles BOEUF, Sorbonne Université

Laurent BOPP, CNRS, PSL

Chris BOWLER, IBENS, PSL

Guigone CAMUS, Université de la Polynésie Française

Christine CAUSSE, Nausicaa

Anne CHOQUET, Université de Bretagne Occidentale

Annie CUDENNEC, Université de Bretagne Occidentale

Philippe CURY, IRD

Virginie DUVAT, Université de la Rochelle, CNRS

Leïla EZZAT, Université de Californie

Françoise GAILL, CNRS, POC

Didier GASCUEL, AGROCAMPUZ-OUEST Rennes

Jean-Pierre GATTUSO, CNRS, Sorbonne Université

Lionel GUIDI, CNRS, Tara GO-SEE

Bleuenn GUILLOUX, Kiel's University

Mathilde JACQUOT, Université de Bretagne Occidentale

Eric KARSENTI, CNRS, Tara GO-SEE

Nadine LE BRIS, Sorbonne Université

Alexandre MAGNAN, IDDRI

Marc METIAN, AIEA

Daria MOKHNACHEVA, OIM

Emmanuelle QUILLEROU, Université de Bretagne Occidentale

Sabrina SPEICH, ENS, LMD

Laure ZAKREWSKI, Université de Bretagne Occidentale

Colomban DE VARGAS, CNRS, Tara GO-SEE

Comité d'experts

Denis ALLEMAND, Centre Scientifique de Monaco

Nadia AMEZIANE, Museum national d'Histoire Naturelle

Salvatore, COI-UNESCO

Denis BAILLY, Université de Bretagne Occidentale

Gilles BOEUF, Sorbonne Université

Laurent BOPP, CNRS, PSL

Claude BOUCHER, CNFGG

Chris BOWLER, IBENS, PSL

Corinne BUSSI-COPIN, Institut Océanographique,

Fondation Albert 1^{er}, Prince de Monaco

Christine CAUSSE, Nausicaa

Guigone CAMUS, UPF

Xavier CAPET, CNRS, IRD

Joachim CLAUDET, CNRS, CRIODE

Philippe CURY, IRD

Agathe EUZEN, CNRS

Emmanuel GARNIER, CNRS, Université de Franche-Comté

Didier GASCUEL, AGROCAMPUZ-OUEST Rennes

Michel HIGNETTE, Union des Conservateurs d'Aquariums

Marie-Françoise LALANCETTE, SHOM

Nadine LE BRIS, Sorbonne Université

Hervé LE TREUT, IPSL, Sorbonne Université

Céline LIRET, Océanopolis

Fabrice MESSAL, Mercator Océan

Marc METIAN, AIEA

Serges PLANES, CNRS, EPHE

Thierry PEREZ, CNRS

Gabriel PICOT, Aquarium tropical de la porte dorée

Gilles REVERDIN, CNRS, PSL

Marie-Alexandrine SICRE, CNRS, LOCEAN

Sabrina SPEICH, ENS, LMD

Anna ZIVIAN, Ocean Conservancy



ocean-climate.org

Plateforme Océan et Climat

Intégrer l'océan dans le champ des négociations climatiques