



Laurent BOPP
travaille au Laboratoire
des sciences du climat
et de l'environnement
(LSCE), à l'institut Pierre-
Simon-Laplace (IPSL).

Alexandre MAGNAN
travaille à l'Institut du
développement durable et
des relations internationales
(IDDRI), à Paris.

Jean-Pierre GATTUSO
travaille au Laboratoire
d'océanographie (CNRS-
UMPC), de l'Observatoire
océanologique de
Villefranche-sur-mer.

L'ESSENTIEL

- Quel que soit le scénario, optimiste ou non, des émissions de gaz à effet de serre, les océans pâtiront du réchauffement climatique.
- L'augmentation des températures et de la quantité de carbone absorbée par les océans nuira aux organismes marins.
- Les activités humaines, telles la pêche et l'aquaculture, seront touchées. En outre, les infrastructures du littoral seront plus vulnérables.
- Les mesures de lutte existent, mais on doit les mettre en place sans tarder.

Océans et climat : un duo inséparable

Les océans sont menacés par le dérèglement climatique à plus d'un titre : réchauffement, acidification, montée des eaux... De grands dangers pèsent sur les espèces marines, mais aussi sur les services que rendent les océans à l'humanité.



LES CORAUX sont en première ligne face au réchauffement climatique. L'acidification des océans nuit aussi à leur survie.

Le 26 août 2015, la NASA a annoncé qu'une montée des océans d'au moins un mètre due au réchauffement climatique est inévitable dans les 100 à 200 prochaines années. La seule incertitude porte sur le rythme de ce phénomène. L'agence américaine alerte sur les dangers que courent les grandes villes situées en bord de mer telles Tokyo, Miami, Singapour... Cette hausse du niveau marin n'est qu'une des manifestations du réchauffement climatique. On doit aussi ajouter le réchauffement et l'acidification des eaux, les menaces sur les écosystèmes marins et côtiers... Malgré son immensité et son apparente stabilité, l'océan est touché de plein fouet par les modifications d'envergure que l'humanité inflige au climat de la Terre.

Les activités humaines ont fait passer la concentration de CO₂ dans l'air de 0,0278 % il y a 150 ans, à près de 0,04 % aujourd'hui. C'est une augmentation de plus de 40 %. Les concentrations d'autres gaz à effet de serre, notamment le méthane (CH₄) et le protoxyde d'azote (N₂O), ont aussi fortement crû. Or l'océan agit comme un intégrateur de ces modifications : il absorbe la majeure partie de la chaleur en excès dans le système climatique (selon le GIEC, cette proportion s'élève à plus de 90 % depuis les années 1970), limitant ainsi la vitesse à laquelle l'atmosphère se réchauffe. Mais ce rôle bénéfique des océans n'est pas sans conséquences pour ce dernier : il se réchauffe, il s'acidifie, le niveau de la mer monte, et les grands courants marins sont perturbés. Sommes-nous prêts à y faire face ?

Ces modifications des propriétés physico-chimiques fondamentales de l'océan se répercutent sur le fonctionnement des écosystèmes et sur les espèces marines elles-mêmes, en modifiant leur répartition géographique et leurs rythmes saisonniers. Les humains et certaines de leurs activités sont au bout de la « chaîne d'impacts ». Parce que l'océan fournit par exemple 11 % des protéines animales consommées par les humains à l'échelle de la planète, il joue un rôle crucial dans la sécurité alimentaire de centaines de millions de personnes.

La Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) a pour objectif de stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre atmosphérique « à un niveau qui empêcherait toute perturbation dangereuse du système climatique... dans un laps de temps suffisant pour que les écosystèmes puissent s'adapter naturellement, pour que la production alimentaire ne soit pas menacée, et pour que le développement économique puisse se poursuivre d'une manière durable ». Selon l'accord de Copenhague signé en 2009, ces objectifs impliquent une augmentation de la température moyenne à la surface du globe de moins de

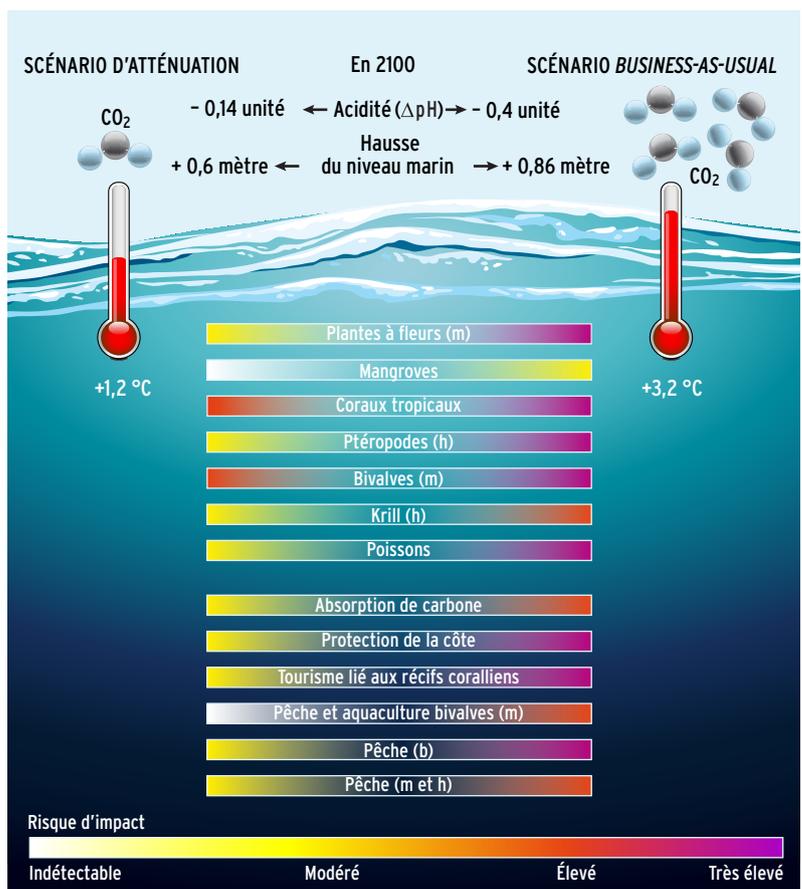
2 °C par rapport à la température moyenne de la période préindustrielle.

Pourtant, malgré le rôle critique de l'océan dans le fonctionnement du système climatique, malgré les biens et services qu'il apporte aux sociétés humaines, les négociations internationales sur le climat n'ont pour l'instant que très peu considéré les impacts du changement climatique sur l'océan, lesquels fournissent pourtant des arguments de poids en faveur d'une réduction immédiate et drastique des émissions mondiales de gaz à effet de serre.

Des océans négligés

Plusieurs questions sont encore aujourd'hui sur la table. Que sait-on de la façon dont l'océan va réagir à la perturbation climatique ? Dans quelle mesure sera-t-il encore capable de limiter l'amplitude de la perturbation en absorbant carbone et chaleur ? Comment les modifications de l'environnement vont-elles se propager aux organismes marins, aux écosystèmes et *in fine* aux services écosystémiques rendus par l'océan ? Enfin, quels sont les moyens d'agir ? La limitation des émissions de gaz à effet de serre, et en particulier celle des émissions anthropiques de dioxyde de carbone, est-elle la seule option ? D'autres types d'actions permettraient-elles de limiter les impacts du dérèglement climatique sur l'océan ? Saura-t-on, nous humains, nous adapter ?

DEUX SCÉNARIOS sont en lice à l'horizon 2100 : celui d'atténuation importante des émissions de CO₂ (à gauche) et celui de *business-as-usual* (à droite). L'ampleur des dangers qui pèseront sur les organismes marins (*en noir*) et les services rendus à l'humanité par les océans (*en blanc*) dépendent de celui que nous suivrons. Les *h*, *m* et *b* indiquent respectivement les hautes, moyennes et basses latitudes.



Le dernier rapport du GIEC, ainsi que nos récents travaux, dressent un tableau assez précis des futurs possibles de l'océan à la fin du XXI^e siècle. Ces futurs possibles attirent l'attention sur un point essentiel : l'évolution de l'océan, sa capacité à modérer le changement climatique et son rôle vis-à-vis de nombreuses activités humaines vont avant tout dépendre de notre propre aptitude à réguler nos émissions de gaz à effet de serre. Si peu d'efforts sont faits en ce sens, au cours des prochaines années et décennies, l'océan de nos petits enfants ne ressemblera pas à celui d'aujourd'hui. Si au contraire nous parvenons à fournir ensemble des efforts substantiels, c'est-à-dire suffisants pour rester sous la limite des 2 °C, l'océan de demain pourrait continuer, malgré une série d'impacts tout de même importants, à modérer le changement climatique et ses effets multiples, et à rendre de précieux services aux populations humaines.

Une physico-chimie contrastée

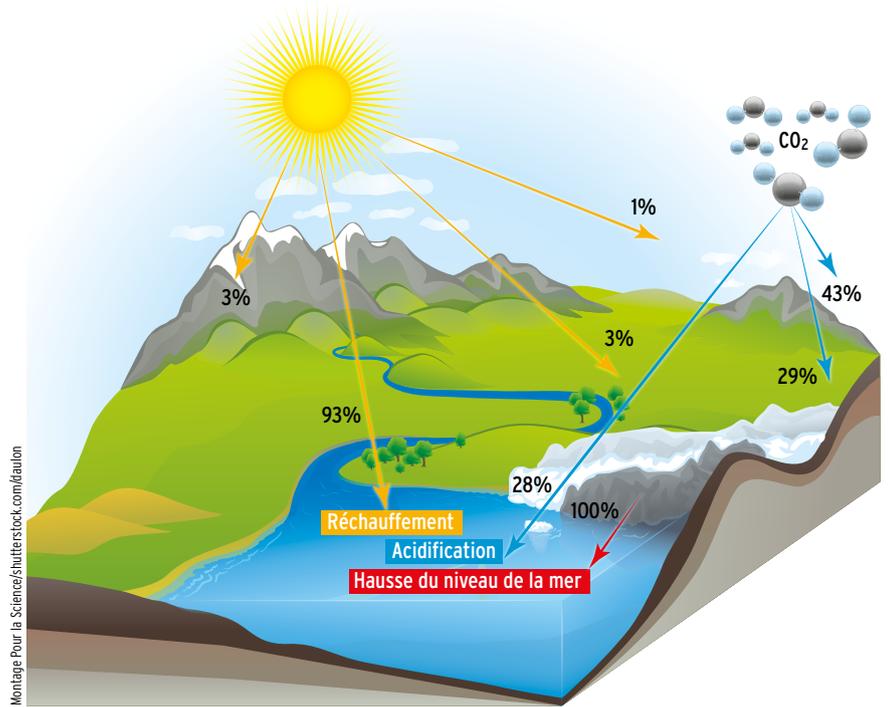
Les modèles de climat utilisés pour simuler l'évolution du climat de notre planète au cours des prochaines décennies livrent les caractéristiques potentielles futures de l'environnement océanique. On peut par exemple utiliser deux scénarios très contrastés pour mettre en évidence les effets d'une réduction importante des émissions de gaz à effet de serre.

Dans le premier de ces scénarios, celui dit de « *business-as-usual* » (noté BAU, qui signifie que tout reste comme aujourd'hui), les émissions de CO₂ continuent d'augmenter jusqu'à la fin du XXI^e siècle. Dans le deuxième scénario, dit d'atténuation, les émissions de CO₂ sont réduites de moitié par rapport à celles d'aujourd'hui en 2050, et deviennent nulles avant la fin du siècle. C'est le seul scénario susceptible de limiter le réchauffement global à 2 °C à la fin du siècle

Les propriétés physico-chimiques de l'océan de demain sont très sensibles au choix du scénario. Alors que la température moyenne des eaux de surface de l'océan a déjà augmenté de 0,8 °C depuis le début du XX^e siècle, l'océan se réchaufferait de 0,7 °C supplémentaire d'ici 2100 dans le cas du scénario d'atténuation. Pour le scénario BAU, le réchauffement atteindrait +2,7 °C, soit 4 fois plus.

Les différences sont encore plus marquées pour l'acidité de l'eau de mer qui est causée par l'absorption du gaz carbonique d'origine humaine et qui a déjà augmenté de 30 % depuis 1850. Dans les eaux de surface, la concentration moyenne en ions H⁺ (ou protons) croîtrait de 10 % dans le cas du scénario d'atténuation d'ici 2100, cette augmentation dépasserait 100 % dans le scénario BAU.

L'océan profond serait lui aussi perturbé et, là encore, les modifications dépendent notablement



du scénario d'émissions, en particulier de carbone. En effet, l'acidification des eaux de surface se propagerait dans l'intérieur de l'océan et pourrait atteindre une grande partie des réservoirs profonds de biodiversité dans le cas du scénario BAU. De même, le réchauffement des eaux de surface pourrait entraîner une stratification de l'océan de surface, laquelle conduirait à une diminution du contenu en oxygène de l'océan profond. Cette « désoxygénation » de l'océan serait d'autant plus marquée que les émissions de CO₂ resteraient importantes.

Le carbone que nous émettons aujourd'hui perturbe le système terrestre de façon irréversible et ceci pour plusieurs générations. À cause de l'inertie du système climatique, de l'océan en particulier, le contenu des eaux en carbone, l'acidité et le contenu en chaleur ainsi que le niveau de la mer vont continuer à augmenter longtemps après une éventuelle stabilisation des quantités de CO₂ atmosphérique. Cependant, l'amplitude de ces changements, irréversibles, augmente quasi linéairement avec l'augmentation des émissions, soulignant ainsi l'urgence de la réduction des émissions de dioxyde de carbone. D'autant plus que les organismes marins sont menacés.

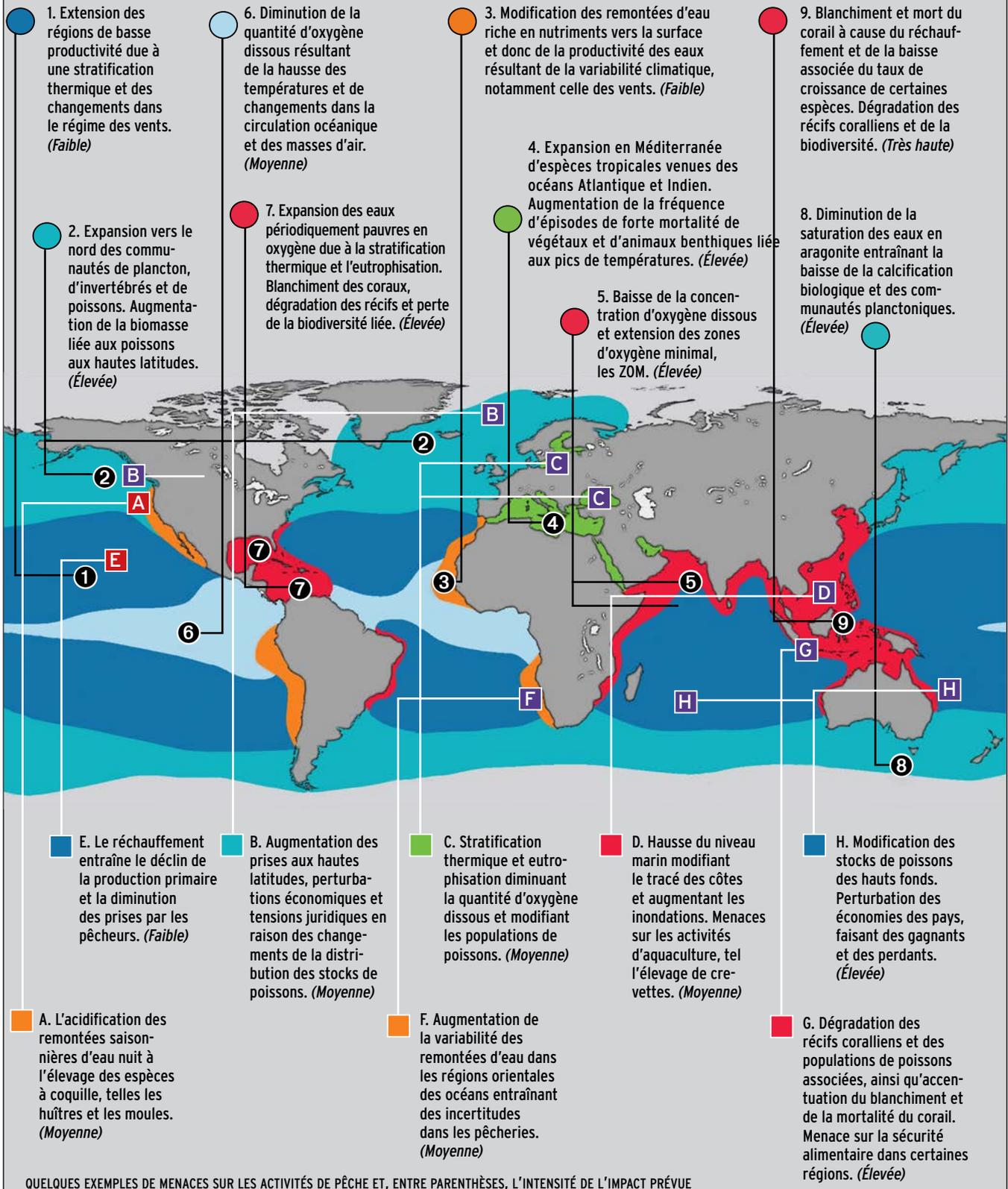
Les espèces chamboulées

Les organismes et les écosystèmes marins et côtiers sont perturbés par le réchauffement, par l'acidification et par la désoxygénation de l'océan. D'abord, l'augmentation des températures océaniques peut modifier la croissance des organismes, mais aussi leur comportement, leur alimentation et leur succès reproducteur. Ces modifications sont avant tout dépendantes

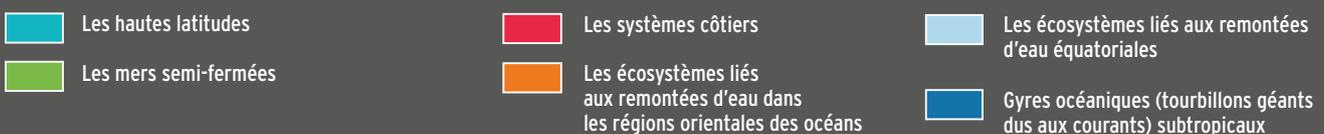
LES OCÉANS HYPERABSORBANTS. Ils captent l'essentiel de la chaleur atmosphérique, le quart du CO₂ émis et la totalité de l'eau résultant de la fonte des glaces.

LES OCÉANS MENACÉS DE TOUTE PART

QUELQUES EXEMPLES D'EFFETS DU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE SUR LES OCÉANS ET, ENTRE PARENTHÈSES, LA VULNÉRABILITÉ ASSOCIÉE.



QUELQUES EXEMPLES DE MENACES SUR LES ACTIVITÉS DE PÊCHE ET, ENTRE PARENTHÈSES, L'INTENSITÉ DE L'IMPACT PRÉVUE



© J.-P. Gattuso et al., Science

de la tolérance thermique des espèces. Elles sont également notablement corrélées au degré du réchauffement, mettant en évidence encore une fois l'importance du scénario d'émissions de gaz à effet de serre que nous suivrons.

De nombreuses études ont mis en évidence des déplacements des aires de répartition de centaines d'espèces marines (invertébrés, poissons, mammifères), le plus souvent en suivant le décalage des températures, c'est-à-dire vers le nord dans l'hémisphère Nord et vers le sud dans l'hémisphère Sud. Ces mouvements peuvent atteindre jusqu'à 400 kilomètres par décennie. Ces changements se poursuivront avec le réchauffement projeté, mais leur amplitude dépendra, de nouveau, du scénario d'émissions.

On a montré que les déplacements vers les pôles de près de 800 espèces marines (des invertébrés aux poissons) seraient plus rapides (de 65 % en 2050) dans le cas du scénario BAU par rapport à celui d'atténuation. Parmi les organismes les plus à risque, citons les espèces polaires, qui n'ont guère d'espaces vers où migrer, ainsi que des espèces tropicales, tels les coraux des récifs, extrêmement sensibles au réchauffement.

L'acidification de l'océan est une autre menace importante pour les organismes et les écosystèmes océaniques. Les espèces à coquilles ou squelettes calcaires sont le plus en danger. En laboratoire, on a révélé que l'acidification prévue en 2100 dans le cas du scénario BAU diminuerait notablement la calcification de ces organismes, et ainsi affaiblirait les structures calcifiées. Des mesures de terrain ont aussi mis en évidence que certains écosystèmes étaient déjà touchés : diminution de l'épaisseur des tests (une enveloppe minérale) de coccolithophoridés (des algues unicellulaires microscopiques) en Méditerranée, dissolution des coquilles de ptéropodes (des mollusques) dans l'upwelling (des remontées d'eau riche en nutriments) au large de la Californie et dans l'océan Austral, érosion sévère de certains récifs coralliens...

Les effets de la diminution de l'oxygène varient selon les organismes. Une augmentation du volume des zones pauvres en oxygène favoriserait le développement de certaines espèces adaptées à ces conditions, en particulier des organismes microbiens et certaines espèces de grande taille comme le calmar de Humboldt. Toutefois, l'aire de distribution de la majorité des animaux, poissons et invertébrés non adaptés, pourrait être très réduite.

On ne connaît pas d'analogie à la perturbation en cours, mais l'étude des modifications passées du cycle du carbone liées à l'activité volcanique

montre que chacun des épisodes a eu les mêmes effets : réchauffement, acidification, désoxygénation. Leur impact a été considérable. Par exemple, 95 % des organismes marins ont disparu lors de la crise de la fin du Permien, il y a 250 millions d'années, bien que l'environnement ait changé beaucoup moins vite qu'aujourd'hui.

Ces études sur l'évolution des organismes et écosystèmes sont encore qualitatives. Beaucoup reste à apprendre sur l'effet combiné des différents facteurs de stress (réchauffement, acidification, désoxygénation) et sur leurs interactions avec d'autres perturbations anthropiques (surpêche, pollution des eaux côtières, etc.). La façon dont

les différentes espèces s'adapteront (ou pas) génétiquement constitue aussi une inconnue majeure. Malgré ces incertitudes, on sait que le scénario BAU fait peser un risque très élevé sur la plupart des organismes marins et des écosystèmes océaniques étudiés. Les modifications à venir de l'environnement océanique se propagent de façon évidente aux services rendus par l'océan aux sociétés humaines.

L'homme et la mer

Le premier de ces services mis en danger est l'absorption de carbone, et donc la régulation du changement climatique. Cette absorption dépend de plusieurs processus, principalement physico-chimiques, dont beaucoup sont sensibles au changement climatique. L'océan serait ainsi capable d'absorber plus de la moitié des émissions anthropiques de CO₂ d'ici 2100 dans le cas du scénario d'atténuation, alors que cette proportion tombe à 25 % dans le cas du scénario BAU.

Un autre service inestimable rendu par les écosystèmes océaniques est la protection du littoral. Les récifs coralliens, les bancs d'huîtres, les mangroves, les marais salants et les herbiers protègent les côtes et les infrastructures humaines en réduisant l'énergie des vagues, et donc en limitant l'érosion côtière et les inondations. Par exemple, on a estimé le service des écosystèmes des zones humides sur les côtes américaines à 23,2 milliards de dollars (20,7 milliards d'euros) par an grâce à leur protection des infrastructures contre les tempêtes. Or ces habitats naturels sont touchés par le réchauffement et l'acidification de l'océan, pressions qui se combinent avec d'autres, d'origine strictement anthropique, tels l'urbanisation, la déforestation, le dragage des récifs...

La pêche et l'aquaculture sont aussi affectées par le changement climatique et l'acidification de l'océan. Ainsi, la pêche en zone tropicale pourrait pâtir du changement climatique, avec

Le service des écosystèmes des zones humides américaines est estimé à 23,2 milliards de dollars par an.



shutterstock.com/WilaineCrevette

LA MANGROVE PROTECTRICE. Cet écosystème océanique protège les côtes et les infrastructures humaines des dégâts de l'érosion et des inondations.

des baisses de rendement importantes liées à la perte de certains habitats critiques, tels des récifs coralliens, ou à une diminution de la productivité de divers écosystèmes océaniques et côtiers. Les populations locales, qui dépendent des ressources halieutiques côtières pour leur nourriture, leur sécurité économique, et pour leurs cultures traditionnelles, sont menacées.

Réchauffement et acidification sont également des facteurs de risque pour l'aquaculture. Plusieurs études de cas le démontrent : une réduction de la production mytilicole au Royaume-Uni, de l'ordre de 50 à 70 %, est prévue pour respectivement les scénarios d'atténuation et BAU. Aux États-Unis, le coût global des effets de l'acidification sur la capture ou l'aquaculture des mollusques pourrait atteindre 100 milliards de dollars (89,5 milliards d'euros) en 2100 dans le cas du scénario BAU.

Enfin, la dégradation des récifs coralliens en raison du réchauffement et de l'acidification devrait avoir une incidence négative sur le tourisme. La perte de récifs coralliens pour les scénarios d'atténuation et BAU pourrait ainsi coûter respectivement 1,9 et 12 milliards de dollars (1,7 et 10,7 milliards d'euros) par année en raison de l'impact négatif sur la fréquentation touristique.

Comment limiter les risques ?

Le réchauffement de l'océan, l'acidification et l'élévation du niveau de la mer font peser un risque généralisé sur les systèmes océaniques naturels et, par propagation, sur les services rendus par l'océan aux sociétés humaines. Il est donc absolument essentiel d'en limiter les effets. Comment s'y prendre ?

Les options de gestion de ces risques peuvent être regroupées en quatre grands types : l'atténuation, qui vise à limiter à la source le changement climatique et l'acidification ; la protection des écosystèmes déjà affectés, de sorte à favoriser ou au moins maintenir leur capacité de résilience ;

l'adaptation des sociétés humaines aux modifications en cours et à venir ; enfin, la réparation des dommages sur les écosystèmes qui ont eu ou auront lieu.

Une seule de ces options – l'atténuation –, aborde le fond du problème, les autres ayant vocation à seulement retarder ou diminuer les impacts, ce qui ne les rend cependant pas moins utiles ! Ainsi, sans une réduction drastique des émissions de gaz à effet de serre (le scénario d'atténuation), les options pour réduire les risques resteront limitées...

Notons néanmoins qu'un certain nombre de développements vont dans le bon sens : de nouvelles pratiques sont à l'étude et aideraient à lutter contre ces impacts de façon plus efficace (extraction du CO₂ dissous dans l'eau de mer, culture du corail, surveillance de l'acidité de l'eau de mer pour l'aquaculture). La mise en place d'aires marines protégées et l'identification de zones ou de régions moins exposées au triptyque réchauffement-acidification-désoxygénation permettraient également d'identifier des zones refuges pour certaines espèces ou types d'écosystèmes, et ce au bénéfice de la conservation de la biodiversité marine.

Cependant, plusieurs de ces options ont un coût qui pourrait se révéler prohibitif, d'autant que l'efficacité de la plupart de ces méthodes dépend – de façon inversement proportionnelle – du scénario d'émissions suivi dans les prochaines décennies.

Les océans à Paris

Une conclusion forte émerge : le maintien des écosystèmes et des services océaniques relève en grande partie du processus des négociations climatiques dont la conférence climat organisée à Paris en novembre et en décembre 2015 (la COP21) sera une étape importante. Du fait de son rôle dans la régulation du système climatique comme dans le développement des sociétés humaines, l'océan doit être partie prenante des discussions engagées.

Une autre raison est que l'océan est aussi l'une des grandes victimes du changement climatique : les impacts des émissions anthropiques de CO₂ sur les organismes, les écosystèmes et les services océaniques sont en effet déjà détectables, et les risques d'impacts ne feront que s'élever d'ici 2100, même dans le cas de scénario d'atténuation.

L'océan rappelle ainsi que la réduction immédiate et substantielle des émissions de CO₂ est un préalable indispensable à un futur viable. Et ce d'autant que les options de protection, d'adaptation et de réparation pour l'océan deviendront de moins en moins efficaces à mesure que la concentration en CO₂ atmosphérique augmentera. Dès lors, tout nouvel accord mondial sur le climat qui ne minimiserait pas les impacts sur l'océan serait à la fois incomplet et inadéquat. ■

Jean-Pierre Gattuso participera au Forum du CNRS 2015 : « Que reste-t-il à découvrir ? » consacré au changement climatique les 13 et 14 novembre 2015 : <http://leforum.cnrs.fr/>

livre

• E. BARD, *L'Océan, le climat et nous : un équilibre fragile ?*, Le Pommier/Universcience, 2011.

articles

• J.-P. GATTUSO *et al.*, *Contrasting futures for ocean and society from different anthropogenic CO₂ emissions scenarios*, *Science*, vol. 349(6243), 2015.

• A. AVERY *et al.*, *Climat : l'enjeu pour les océans*, in P. JACQUET *et al.* (dir.), *Océans, la nouvelle frontière, Regards sur la terre*, Armand Colin, pp. 337-349, 2011.

internet

• Le projet *Ocean Initiative 2015* en vidéo : https://youtu.be/dsncyks_nkE

• Le Centre international de coordination des recherches sur l'acidification des océans : <http://bit.ly/PLS-Acid>