

Que faire face à l'acidification des océans ?

Raphaël Billé (Iddri-Sciences Po), Ryan Kelly (Center for Ocean Solutions), Arne Biastoch (GEOMAR), Ellycia Harrould-Kolieb (université de Melbourne), Dorothee Herr (UICN), Fortunat Joos (université de Bern), Kristy Kroeker (université de Californie à Davis), Dan Laffoley (UICN), Andreas Oschlies (GEOMAR), Jean-Pierre Gattuso (CNRS-INSU et UPMC)

Ce *policy brief* est une adaptation en français d'un travail de recherche publié en 2013 en anglais dans la revue *Environmental Management*, disponible à l'adresse : <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00267-013-0132-7>.

CAUSES ET CONSÉQUENCES DE L'ACIDIFICATION DES OCÉANS

Depuis le début de la révolution industrielle, les océans ont absorbé environ un tiers des émissions de dioxyde de carbone (CO₂) d'origine anthropique. Cet apport massif de CO₂ entraîne des changements radicaux dans l'équilibre chimique océanique, notamment dans la concentration en carbonates. Ces changements sont collectivement désignés par l'expression « acidification des océans », dans la mesure où une augmentation du CO₂ dissout dans l'eau de mer abaisse son pH (et accroît donc son acidité).

Les mécanismes chimiques à l'œuvre dans ce phénomène d'acidification étant bien cernés, les projections sont relativement simples en ce qui concerne les eaux de surface en pleine mer pour une trajectoire donnée de CO₂ atmosphérique. Celles qui reposent sur les scénarios du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) tablent sur une réduction moyenne du pH de la surface des océans entre 0,14 et 0,35 unité d'ici la fin du XXI^e siècle, soit un niveau de pH de surface de 7,8¹ en 2100 (Orr, 2011). Par ailleurs, « les impacts sur l'acidification des océans continueront de s'aggraver pendant des siècles, même si les émissions cessent » (Joos *et al.*, 2011).

1. Sur l'échelle totale.

Bien que le CO₂ atmosphérique soit la principale cause de l'acidification des océans globalement, deux autres facteurs connus ou possibles ont été identifiés :

- l'acidification des eaux côtières provoquée par d'autres polluants : les rejets agricoles, industriels et humains d'azote et de phosphate. Déterminer l'importance relative de chacun de ces polluants – ainsi que leur importance par rapport au CO₂ atmosphérique – nécessite encore des recherches, mais il semblerait que les pollutions côtières puissent avoir localement un impact significatif sur l'acidification de l'eau de mer, à des échelles de quelques dizaines voire centaines de kilomètres ;
- la dissolution des hydrates de méthane : à l'heure actuelle, ils sont stockés sous forme solide sous le plancher océanique, avec le risque que l'augmentation de la température de l'eau ne mène à ce que des quantités importantes de méthane soient relâchées dans les océans – puis éventuellement dans l'atmosphère. Le volume de méthane ainsi libéré pourrait être suffisamment important pour provoquer l'acidification des eaux profondes avec, selon les estimations, des baisses régionalement circonscrites de pH allant jusqu'à 0,25 unité. En raison de l'inertie thermique des océans et de la pénétration retardée de la chaleur dans les sédiments, le processus de libération du méthane serait irréversible et se prolongerait sur un laps de temps considérable, même si le réchauffement climatique était finalement stoppé.

Les conséquences de l'acidification des océans sur les sociétés dépendront des interactions parmi et entre espèces et écosystèmes, qui réagissent tous à un rythme et avec une intensité différents, mais aussi de l'interaction entre acidification et autres facteurs de stress des océans ainsi que des réponses de chacun des groupes humains affectés. Il semble malgré tout évident que, par sa rapidité et son ampleur, le phénomène de l'acidification menace de nombreux écosystèmes et espèces marins. Les organismes qui se développent en fixant le carbonate de calcium, comme les récifs coralliens, les crustacés et le zooplancton, font partie des premières victimes potentielles. On comprend dès lors que l'acidification des océans aura des répercussions sur différents secteurs d'activité (la pêche, l'aquaculture ou le tourisme par exemple) et sociétés littorales, sachant qu'elle pourra également avoir des effets indirects sur des pans nettement plus vastes de l'économie et de la population mondiales. Il est donc important de recenser et d'étudier les options dont nous disposons, en termes de gestion et de politiques publiques, malgré les incertitudes entourant encore les impacts exacts de ce phénomène.

QUELLES ACTIONS FACE À L'ACIDIFICATION DES OcéANS ?

Empêcher l'acidification de se produire

Prévenir l'acidification peut passer par trois voies principales, chacune liée à l'une des causes identifiées ci-dessus.

Limiter la concentration de CO₂ dans l'atmosphère, soit en réduisant les émissions, soit en retirant le CO₂ une fois émis. Le CO₂ et les autres gaz à effet de serre (GES) sont le principal sujet des négociations internationales sur le climat depuis l'adoption, en 1992, de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC). Elles n'ont pas permis jusqu'ici de parvenir à un accord de long terme juridiquement contraignant qui engagerait toutes les grandes puissances économiques ainsi que les pays émergents à réduire leurs émissions de GES de façon à atteindre l'objectif de limitation de l'augmentation moyenne de la température mondiale à moins de 2° C au-dessus des niveaux préindustriels. Quoi qu'il en soit, cette limite de 2°C retenue internationalement pour « empêcher[r] toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique »² pourrait se révéler inadaptée face à l'acidification des océans, pour deux raisons. D'abord, personne ne peut encore dire avec précision ce que serait un niveau « non dangereux » d'émissions de CO₂ du point de vue de l'acidification des océans. En outre, les négociations climatiques portent sur les effets cumulés des GES et ne privilégient pas la réduction de l'un ou l'autre d'entre eux (le CO₂ en l'occurrence).

Le retrait du CO₂ de l'atmosphère une fois qu'il a été émis pourrait aussi prévenir l'acidification des océans. Parmi les méthodes utilisées pour renforcer l'absorption et le stockage par les systèmes biologiques terrestres et marins ou celles qui font appel à des dispositifs artificiels (physiques, chimiques et biochimiques), « aucune n'a encore fait la preuve de son efficacité à un coût raisonnable et avec des effets secondaires tolérables » (The Royal Society, 2009). Leur efficacité en matière de réduction de l'acidification des océans dépend de la technique employée, mais toutes « semblent relativement inefficaces en termes de réduction maximale du CO₂ atmosphérique qu'elles sont susceptibles d'atteindre de manière réaliste » (Williamson et Turley, 2012). Cela dit les appels à évaluer le potentiel, les coûts et les avantages de la géo-ingénierie se

2. CCNUCC, article 2.

multiplient, et ces questions suscitent un intérêt croissant.

Réduire les polluants côtiers qui aggravent l'acidification provoquée par le CO₂ fait partie des leviers possibles pour atténuer ce phénomène dans les eaux côtières³ (Kelly *et al.*, 2011). L'intérêt de cette approche dépend bien sûr de l'importance relative des facteurs d'acidification autres que ceux liés au CO₂, mais la réduction de la pollution pourrait se révéler d'une importance cruciale dans les zones où l'impact chimique des effluents telluriques est comparable à celui des émissions de CO₂. Là où les économies locales et nationales sont fortement tributaires de services écosystémiques dépendant de la calcification (conchyliculture ou tourisme lié aux récifs coralliens par exemple), la réduction des facteurs localement responsables de l'acidification pourrait engendrer des résultats à la fois plus rapides et à moindre coût politique qu'un hypothétique accord mondial sur le CO₂.

Limiter ou réduire l'effet de serre et, partant, le réchauffement des océans, pour éviter la dissolution d'hydrates de méthane, peut passer soit par la réduction des émissions de GES, soit par la gestion du rayonnement solaire. La réduction des émissions de GES autres que le CO₂ (notamment les cinq autres gaz couverts par le protocole de Kyoto) ouvre d'intéressantes perspectives technologiques d'atténuation, pour certaines indépendantes des difficiles négociations internationales sur le climat (HFC, PFC ou SF₆ par exemple⁴). Par ailleurs, les techniques de gestion du rayonnement solaire et donc des impacts thermiques suscitent désormais un certain intérêt au niveau international. Mais « l'ampleur et même le sens de leurs effets restent pour l'instant difficiles à apprécier » (Williamson et Turley, 2012).

Renforcer la résilience des écosystèmes face à l'acidification des océans

En plus de s'attaquer aux causes amont de l'acidification des océans, il est possible de renforcer la résilience des écosystèmes marins pour qu'ils tolèrent mieux les impacts de ce phénomène. C'est particulièrement important puisque l'acidification est déjà une réalité et qu'elle

se poursuivra même si nous parvenons à réduire rapidement les émissions de CO₂. À ce jour, nous ne disposons pas d'études empiriques sur la résilience des écosystèmes face à l'acidification. Mais l'essentiel de ce que nous savons de la résilience des écosystèmes vis-à-vis d'autres facteurs de stress – dont le réchauffement climatique, la surpêche, la pollution par les nutriments et la dégradation des habitats – peut s'appliquer au phénomène d'acidification des océans⁵. Si ces autres facteurs de stress réduisent sans doute la résilience des écosystèmes face à l'acidification, de manière réciproque l'acidification diminuera la résilience des écosystèmes face aux autres facteurs de stress. On voit donc que les instruments communément employés pour accroître la résilience et alléger la pression exercée par les différents facteurs de stress sont également essentiels pour l'acidification des océans. En font notamment partie les réseaux représentatifs d'aires marines protégées correctement connectées entre elles.

Le renforcement de la résilience ne résoudra pas en tant que tel le problème de l'acidification des océans. Toute initiative visant à accroître la résilience en diminuant les facteurs de stress additionnels ne sera vraiment efficace que si elle va de pair avec une forte limitation de la concentration du CO₂ dans l'atmosphère.

Adapter les activités humaines par anticipation ou en réaction à l'acidification des océans

L'adaptation à l'acidification des océans recouvre potentiellement un large éventail d'actions par des individus ou des groupes humains – et elles deviendront nécessaires étant donné l'impact des émissions de CO₂ sur l'acidification actuelle et à venir des océans.

Les exemples concrets sont encore peu nombreux, mais des activités économiques comme la pêche ou l'aquaculture devront très probablement s'adapter à des eaux plus acides en recourant à des solutions technologiques à mesure que la connaissance progressera et que les impacts deviendront plus visibles. Pour certaines activités requérant un spectre étroit de variation du pH – comme la conchyliculture –, le potentiel d'adaptation devrait être important. Mais la physiologie des espèces risque souvent d'opposer une limite infranchissable⁶. La relocalisation de

3. En haute mer, dans les zones moins susceptibles de subir l'impact des facteurs de stress propres au littoral, ces leviers auront probablement moins d'efficacité et seront moins faciles à mettre en œuvre étant donnée la complexité du dispositif juridique régissant ces espaces.

4. HFC, hydrofluorocarbures ; PFC, perfluorocarbures ; SF₆, hexafluorure de soufre.

5. Ainsi, par exemple, des écosystèmes plus riches en biodiversité ont plus de chances de résister aux stress environnementaux (Folke *et al.*, 2004).

6. Hoegh-Guldberg *et al.* (2007) estiment par exemple que les conséquences sur les récifs coralliens deviennent incontrôlables dès une teneur en [CO₂]_{atm} supérieure à 500 ppm.

certaines activités viendra donc compléter les stratégies d'adaptation locale.

Remédier à l'acidification lorsqu'elle s'est déjà produite

L'acidité peut être diminuée grâce à des **produits additifs (autres que le fer)**. Depuis de nombreuses années, l'ajout de minéraux alcalins en poudre, à l'instar du carbonate de calcium (« chaulage »), est utilisé pour combattre l'acidification des lacs (Weatherly, 1998). Les techniques envisagées pour les océans visent à répliquer le processus naturel d'effritement des roches qui fournit des substances alcalines *via* les rivières et les eaux de ruissellement.

Les modèles à l'échelle planétaire suggèrent que l'alcalinisation des océans pourrait atténuer la concentration de CO₂ dans l'atmosphère et l'acidification de l'eau – mais au prix d'apports intensifs, de grande ampleur et sur le long terme. Il reste encore beaucoup à faire sur le plan de l'étude des impacts biogéochimiques et écologiques de ces additifs, de leurs coûts financiers et environnementaux et de la mise au point de méthodes permettant de vérifier et contrôler le processus. Les avantages au plan local doivent aussi être mieux cernés et la faisabilité d'apports répétés et durables de matériaux alcalins soigneusement analysée.

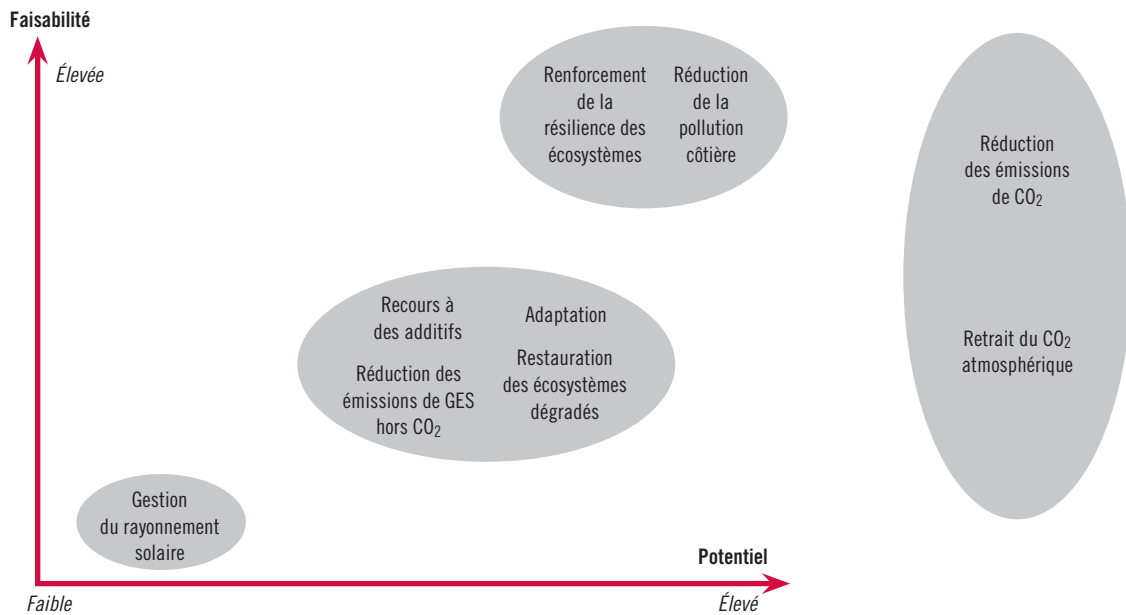
Une autre option consiste à réparer les dégâts provoqués par l'acidification en **restaurant des écosystèmes dégradés**. Il est en effet possible de dépasser les formes d'interventions passives, qui se contentent de supprimer d'autres impacts, et d'opter pour des interventions actives qui augmentent les capacités écologiques. Les estuaires sont par exemple un lieu idéal pour ce type d'actions, en ce qu'ils constituent des points chauds locaux de l'acidification. La santé de leurs écosystèmes a un impact considérable sur l'économie de nombreuses régions côtières. Étant donné le rythme soutenu de l'acidification des estuaires, les ostréiculteurs observent déjà une mortalité accrue des larves et des juvéniles (Green *et al.*, 2009), qui oblige le secteur à s'adapter à ces nouvelles conditions chimiques et – ce point est encourageant – à tisser de nouvelles collaborations entre scientifiques, défenseurs de l'environnement et acteurs économiques. Les projets de restauration écologique recourent déjà à des stratégies telles que la pose de collecteurs (coquilles) pour accélérer la récupération de naissains auparavant en voie d'épuisement (Beck *et al.*, 2009).

COMPARER LES DIFFÉRENTES ACTIONS ENVISAGEABLES POUR LUTTER CONTRE L'ACIDIFICATION DES OcéANS

Les différentes options présentées jusqu'ici n'offrent pas toutes le même degré d'efficacité ou de faisabilité. Par leurs interactions, elles doivent être envisagées dans leur ensemble. Ainsi, le développement de la résilience des écosystèmes sera d'autant plus efficace que l'acidification sera contenue ; la réduction locale du taux d'acidité pourrait devenir une pratique courante dans les aires marines protégées ; et des efforts locaux visant les pollutions telluriques pourraient stimuler des actions nationales et mondiales plus ambitieuses sur le front du CO₂. Mais surtout, toutes ces solutions ne reviennent jamais qu'à gagner du temps : quelles que soient les autres options envisagées, il reste impératif d'agir en parallèle pour réduire les émissions de CO₂.

La première question importante est donc de savoir si – et comment – l'acidification des océans peut faire une différence dans les négociations menées sous l'égide de la CCNUCC. Le fait d'y intégrer ce phénomène pourrait permettre à la fois d'encourager une réduction drastique des émissions de CO₂ et de s'assurer que les politiques d'atténuation prennent bien en compte les effets non thermiques d'une augmentation du CO₂, marquant ainsi la différence entre le CO₂ et les autres GES. On peut supposer que l'acidification des océans viendrait renforcer le sentiment d'urgence à agir, puisque les effets chimiques et l'impact mondial du phénomène sont incontestables et fort probablement irréversibles à l'échelle humaine. Néanmoins, la possible disparition de certains États insulaires, la multiplication d'événements climatiques extrêmes dans les deltas densément peuplés et les zones littorales de faible altitude, ou la plongée de centaines de millions d'êtres humains dans une situation d'insécurité alimentaire en raison de la désertification, n'ont jusqu'ici pas été des arguments suffisamment convaincants pour inciter la communauté internationale à prendre les décisions qui s'imposent. Autrement dit, le pouvoir de persuasion des arguments n'est pas forcément décisif dans une situation de dilemme typique de l'action collective. Dès lors, il est difficile d'être optimiste sur le fait que les nouveaux arguments relatifs à l'acidification des océans aient plus d'impact sur les négociations climat, alors même que les résultats de ces négociations ne sont jamais à la mesure des préoccupations scientifiques.

L'état de l'art en matière de techniques de géo-ingénierie indique qu'aucune d'elles ne peut offrir de solution alternative simple ou facilement

Figure 1. Comparaison du potentiel et de la faisabilité des différentes options de gestion

acceptable à l'acidification des océans. Comme le soulignent Joos *et al.* (2011), « les techniques de géo-ingénierie n'en sont pas encore au stade de l'application, contrairement aux technologies sobres en carbone ». Mais on ne peut ignorer que les techniques de retrait du CO₂ de l'atmosphère pourraient devenir incontournables face au retard pris pour en réduire les émissions. Elles impliquent moins d'incertitudes et de risques que les techniques de gestion du rayonnement solaire et ce sont des leviers bien plus efficaces contre l'acidification (même si elles ont un impact moins immédiat sur le changement climatique). De même, la réduction des émissions de GES hors CO₂ ne fera pas une différence marquée à court ou moyen terme en ce qui concerne l'acidification, mais elle pourrait avoir un effet significatif à long terme pour prévenir la dissolution d'hydrates de méthane et l'acidification dans certaines zones bien spécifiques.

La réduction des sources de pollution côtière est importante à bien des égards, et pas uniquement pour combattre l'acidification. Mais, plus facilement que dans les négociations internationales sur le climat, l'acidification peut être abordée dans les débats locaux et intégrée dans les politiques locales pour inciter à agir de manière plus efficace et plus ambitieuse. Cela permettrait de conclure de nouvelles alliances stratégiques avec des acteurs puissants, comme les industriels de la pêche et de la conchyliculture. À cet effet, une évaluation spatialement explicite de l'importance relative des différentes causes de l'acidification s'impose, pour

optimiser au maximum l'efficacité de recommandations politiques à des échelles infra-globales.

Le renforcement de la résilience des écosystèmes et la réhabilitation de ceux qui ont pâti de l'acidification des océans doivent constituer un autre angle d'action. Le renforcement de la résilience offre des leviers d'action à différentes échelles spatiales et il est de toute façon nécessaire, même en l'absence de toute acidification, de protéger les écosystèmes marins d'un large éventail de facteurs de stress. Il s'agit en outre d'une option attrayante en ce qu'elle nécessite une coordination internationale moindre que la réduction des émissions de CO₂ et que nous avons déjà une solide expérience en matière de protection et de restauration des écosystèmes.

La figure 1 opère une comparaison qualitative des différentes options discutées. Le terme « potentiel » renvoie à l'efficacité probable de chacune des options vis-à-vis de la lutte contre l'acidification des océans, alors que le terme « faisabilité » doit être compris comme le rapport entre les opportunités et les obstacles (technologiques, politiques, économiques, etc.). Quatre groupes peuvent être constitués :

1. les deux options visant la concentration de CO₂ dans l'atmosphère sont celles qui recèlent visiblement le plus de potentiel. Elles ne peuvent pas être comparées aux autres – du moins si l'on conserve les mêmes échelles. La faisabilité politique et sociale de réductions immédiates des émissions de CO₂ soulève des inquiétudes, alors même que les

moyens technologiques sont disponibles : selon les points de vue, la faisabilité est donc jugée relativement faible ou relativement élevée. Le retrait du CO₂ pourrait être une solution politiquement plus aisée, mais les incertitudes sur les moyens techniques sont fortes ;

2. le renforcement de la résilience des écosystèmes et la réduction de la pollution côtière présentent l'un comme l'autre un potentiel et une faisabilité élevés. Ce sont des solutions dites « sans regret » qui comportent des avantages connexes considérables : il s'agit probablement des deux options qui offrent en l'état actuel des choses la plus grande marge de manœuvre ;

3. vient ensuite un groupe de quatre options qui ont un potentiel inférieur aux deux premiers et se situent à un niveau moyen en termes de faisabilité. Elles méritent néanmoins des efforts significatifs, soit parce qu'elles sont efficaces à court terme, soit parce qu'elles comportent des avantages connexes importants. Le niveau respectif de potentiel et de faisabilité de ces quatre options ne peut pas être comparé dans l'état actuel des connaissances ;

4. enfin, la gestion du rayonnement solaire ne présente apparemment guère d'intérêt potentiel pour contrecarrer l'acidification des océans et paraît difficilement praticable à court ou moyen terme, même si ce jugement pourrait se révéler erroné sur une échelle de temps de plusieurs siècles.

BASE JURIDIQUE ET POLITIQUE D'ACTION

L'examen des options pour lutter contre l'acidification des océans conduit à s'interroger sur l'existence de bases juridiques et politiques adéquates ou sur l'opportunité de se doter de nouveaux instruments et cadres juridiques ou politiques. La réponse apparaît comme une caractéristique fondamentale de la problématique de l'acidification des océans : bien qu'il s'agisse d'une préoccupation environnementale internationale relativement récente, bon nombre des actions requises pour atténuer ce phénomène ou y remédier ne nécessitent pas de modifications radicales des cadres juridiques en place ou en cours d'élaboration. Que l'on envisage de réduire les émissions de CO₂ et autres GES, de diminuer la pollution locale par les nutriments, de protéger et de réhabiliter des écosystèmes ou d'adapter les activités humaines, le cadre d'action existe à tous les niveaux, mondial, régional, national et local. Ce qui fait défaut, en revanche, ce sont des politiques adaptées et efficaces pour mettre en œuvre les instruments juridiques existants.

À l'échelle mondiale, la CCNUCC traite des émissions de GES et, comme l'affirment Harrould-Kolieb et Herr (2011), « bien que la CCNUCC n'ait pas au départ été conçue pour traiter de l'acidification des océans, elle offre un cadre au sein duquel aborder les deux problématiques de l'acidification des océans et du changement climatique. Créer un autre mécanisme international uniquement pour traiter de la réduction du CO₂ serait inutile, source de confusion et irréaliste ». Mais la plupart des politiques domestiques ont échoué jusqu'ici à mettre en œuvre les objectifs de la Convention.

Outre le cadre de la CCNUCC, l'absorption du CO₂ par les océans constitue une « pollution du milieu marin » au sens de l'article premier de la Convention des Nations unies sur le droit de la mer (CNUDM) : « l'introduction directe ou indirecte, par l'homme, de substances ou d'énergie dans le milieu marin, y compris les estuaires, lorsqu'elle a ou peut avoir des effets nuisibles tels que dommages aux ressources biologiques et à la faune et la flore marines, risques pour la santé de l'homme, entrave aux activités maritimes, y compris la pêche et les autres utilisations légitimes de la mer, altération de la qualité de l'eau de mer du point de vue de son utilisation et dégradation des valeurs d'agrément ». La 10^e Conférence des Parties (CdP 10) de la Convention sur la diversité biologique (CDB) faisait amplement référence à l'acidification des océans et plusieurs des objectifs d'Aichi pour 2020 adoptés dans le cadre de son nouveau plan stratégique sont aussi pertinents pour cette question⁷. La réalisation ou non de ces objectifs cruciaux relève, là encore, de la conception et de la mise en œuvre de politiques adaptées à l'échelon national.

Pour l'instant, une faille réglementaire importante dans la législation mondiale qui pourrait entraver les réponses apportées à l'acidification des océans est l'absence d'un cadre juridique clair permettant d'établir des aires marines protégées dans des zones situées au-delà des juridictions nationales. Quant à l'encadrement des méthodes de retrait du CO₂, le cadre juridique international paraît suffisant pour certaines techniques⁸, mais devra être renforcé pour d'autres à mesure qu'elles deviendront opérationnelles. L'alcalinisation des océans relèverait du protocole de 1996

7. Notamment ceux qui ont trait à la pollution, y compris celle causée par l'excès d'éléments nutritifs, ou à la restauration des écosystèmes.

8. Ainsi, la fertilisation des océans par le fer est régie par la résolution LC-LP.1 (2008) adoptée dans le cadre de la Convention et du protocole de Londres et dans laquelle les parties contractantes ont déclaré qu'étant donné l'état actuel des connaissances, les activités de fertilisation des océans à des fins autres qu'une recherche scientifique justifiée devaient être interdites.

à la Convention de Londres sur la prévention de la pollution des mers résultant de l'immersion de déchets, mais de nouvelles discussions seront indispensables sur les différents additifs, le régime applicable au titre du protocole et leurs éventuels impacts écologiques – négatifs ou positifs. La gestion du rayonnement solaire n'est couverte par aucun cadre de gouvernance internationale, mais il s'agit seulement d'une problématique potentielle à moyen ou long terme qui reste marginale dans le débat sur l'acidification des océans.

L'échelle régionale a vu se développer depuis plusieurs décennies de multiples instruments juridiques et politiques pour lutter contre les pollutions telluriques. Beaucoup ont été construits sur la dynamique enclenchée par le Sommet de la Terre en 1992, le Programme d'action mondial pour la protection de l'environnement marin contre les effets des activités terrestres de 1995 et le Plan de mise en œuvre de Johannesburg qui appelle les États à « n'épargner aucun effort pour réaliser des progrès importants (...) afin de protéger le milieu marin des conséquences des activités terrestres ». L'Union européenne (UE) a ainsi adopté la directive cadre sur l'eau (2000) et la directive Stratégie milieu marin (2008) sans oublier les différents protocoles adoptés dans le cadre des mers régionales du Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE). Néanmoins, ces protocoles n'ont pas reçu l'attention politique qu'ils méritent.

Un examen systématique des dispositions nationales serait impossible, mais les décisions prises aux États-Unis peuvent illustrer notre propos. Ce pays, qui a ratifié la CCNUCC mais n'est pas partie à la CNUDM ni à la CDB, est relativement bien outillé pour lutter contre l'acidification. Kelly et Caldwell (2012) indiquent que « le gouvernement américain a commencé à s'intéresser à l'acidification des océans par petites touches significatives. En 2009, le Congrès a voté une loi centrée sur cette question⁹, établissant un groupe de travail inter-agences fédérales ainsi qu'un programme de recherche rattaché à la National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA), l'agence chargée de l'étude des océans et de l'atmosphère. Une équipe spéciale sur l'acidification des océans a été constituée, qui réunit des scientifiques indépendants et des décideurs politiques pour agir comme conseil auprès du groupe de travail inter-agences ». Le *Clean Water Act* sur la qualité de

l'eau régit le pH en milieu marin et, peut-être plus surprenant, l'Environmental Protection Agency liste le CO₂ parmi les polluants au titre du *Clean Air Act* sur la qualité de l'air. Ce sont là deux textes essentiels pour l'action des autorités américaines sur leur territoire.

Enfin, au plan infranational et local et pour rester sur l'exemple américain, Kelly et Caldwell (2012) reviennent sur la compétence juridique des États et des juridictions locales qui contrôlent les rejets dans les eaux littorales susceptibles de rendre les habitats plus sensibles à l'acidification.

Une caractéristique essentielle de cette problématique de l'acidification des océans tient donc au décalage actuel entre l'existence de cadres juridiques pour l'essentiel adaptés, et ce à toutes les échelles, et l'insuffisance ou l'inefficacité des politiques censées les traduire en actions concrètes.

UN ARGUMENT FORT POUR RÉUSSIR LÀ OÙ NOUS AVONS ÉCHOUÉ JUSQU'ICI

L'examen des différentes options disponibles ne doit pas occulter un certain nombre d'obstacles qui se dresseront inévitablement dans la lutte contre l'acidification des océans. Trois de ces freins découlent de la nature même des impacts : (i) ils sont pour l'instant encore mal définis et mal quantifiés ; (ii) ils sont largement « invisibles », à la fois parce qu'ils sont difficiles à isoler des effets d'autres facteurs de stress et parce qu'ils se produisent sous l'eau (à l'inverse des pluies acides par exemple, dont on peut constater l'effet sur les forêts) ; et (iii) ils sont très variables selon les sociétés, les écosystèmes et les échelles de temps, même si l'acidification des océans est un enjeu mondial (elle se produit partout et appelle une réponse mondiale). D'où une motivation tout aussi inégale à agir. Il faut noter que l'acidification des océans est probablement le premier enjeu environnemental mondial à émerger alors que la plupart des options pour agir ont déjà été identifiées et testées à l'occasion du traitement d'autres enjeux environnementaux – même s'il faut bien admettre que nous avons échoué à les mettre en œuvre avec l'intensité requise et à l'échelle nécessaire.

Pour toutes ces raisons, il serait illusoire de penser que le problème de l'acidification sera résolu facilement. Les constats qui précèdent signifient que nous devons nous efforcer de réussir là où, pour l'instant, nous avons largement échoué : réduire les émissions de CO₂, protéger les écosystèmes marins des différents facteurs de stress, restaurer ceux qui ont été dégradés et, en anticipant un scénario du pire, mettre au point des technologies de dernier recours dans une perspective de survie.

9. Le 30 mars 2009, le président Obama signait la *Federal Ocean Acidification Research and Monitoring (FOARAM) Act*, 33 U.S.C. § 3701 et seq., un texte fédéral autorisant le financement et la mise en place d'un plan inter-agences sur l'acidification des océans, et instaurant un programme de recherche et de suivi sur cette question au sein de la NOAA.

Étant donné l'issue incertaine des négociations visant à réduire les émissions de CO₂, toute action pouvant être menée doit l'être, aussi marginale soit-elle *a priori* – surtout si elle a d'importantes retombées environnementales positives par ailleurs. Quoi qu'il en soit, l'acidification des océans est une raison supplémentaire pour œuvrer

au succès des négociations sur le climat. Elle vient certes s'ajouter à une liste déjà longue, mais elle a des spécificités (échelles de temps, amplitude et irréversibilité de ses impacts notamment) qui pourraient contribuer à faire une différence dans l'effort, plus vaste, visant à contrôler des émissions de CO₂ qui ne cessent d'augmenter. ■

RÉFÉRENCES

Beck MW, *et al.* (2009) Shellfish reefs at risk: a global analysis of problems and solutions. The Nature Conservancy, Arlington, VA, 52 pp

Folke C, *et al.* (2004) Regime shifts, resilience, and biodiversity in ecosystem management. Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics 35:557-581

Green MA, *et al.* (2009) Death by dissolution: Sediment saturation state as a mortality factor for juvenile bivalves. Limnology and Oceanography 54:1037-1047

Harrould-Kolieb ER, Herr D (2011) Ocean acidification and climate change: synergies and challenges of addressing both under the UNFCCC. Climate Policy 12(3):378-389.

Hoegh-Guldberg O, *et al.* (2007) Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification. Science 318:1737-1742

Joos F, *et al.* (2011) Impact of climate change mitigation on ocean acidification projections. In: Gattuso J-P, Hansson L (eds) Ocean Acidification, Oxford University Press, Oxford, pp 273-289

Kelly RP, *et al.* (2011) Mitigating Local Causes of Ocean Acidification with Existing Laws. Science 332:1036-1037

Kelly RP, Caldwell MR (2012) Why Ocean Acidification Matters to California, and What California Can Do About It: A Report on the Power of California's State Government to Address Ocean Acidification in State Waters. Center for Ocean Solutions, Stanford Woods Institute for the Environment, Stanford University, California

Orr JC (2011) Recent and future changes in ocean carbonate chemistry. In: Gattuso J-P, Hansson L (eds) Ocean acidification, Oxford University Press, Oxford, pp 41-66

The Royal Society (2009) Geoengineering the climate. Science, governance and uncertainty. September, 83 p

Weatherley NS (1988) Liming to mitigate acidification in fresh-water ecosystems - A review of the biological consequences. Water, Air, and Soil Pollution 39:421-437

Williamson P, Turley C (2012) Ocean acidification in a geoengineering context. Philosophical Transactions of the Royal Society A 370:4317-4342