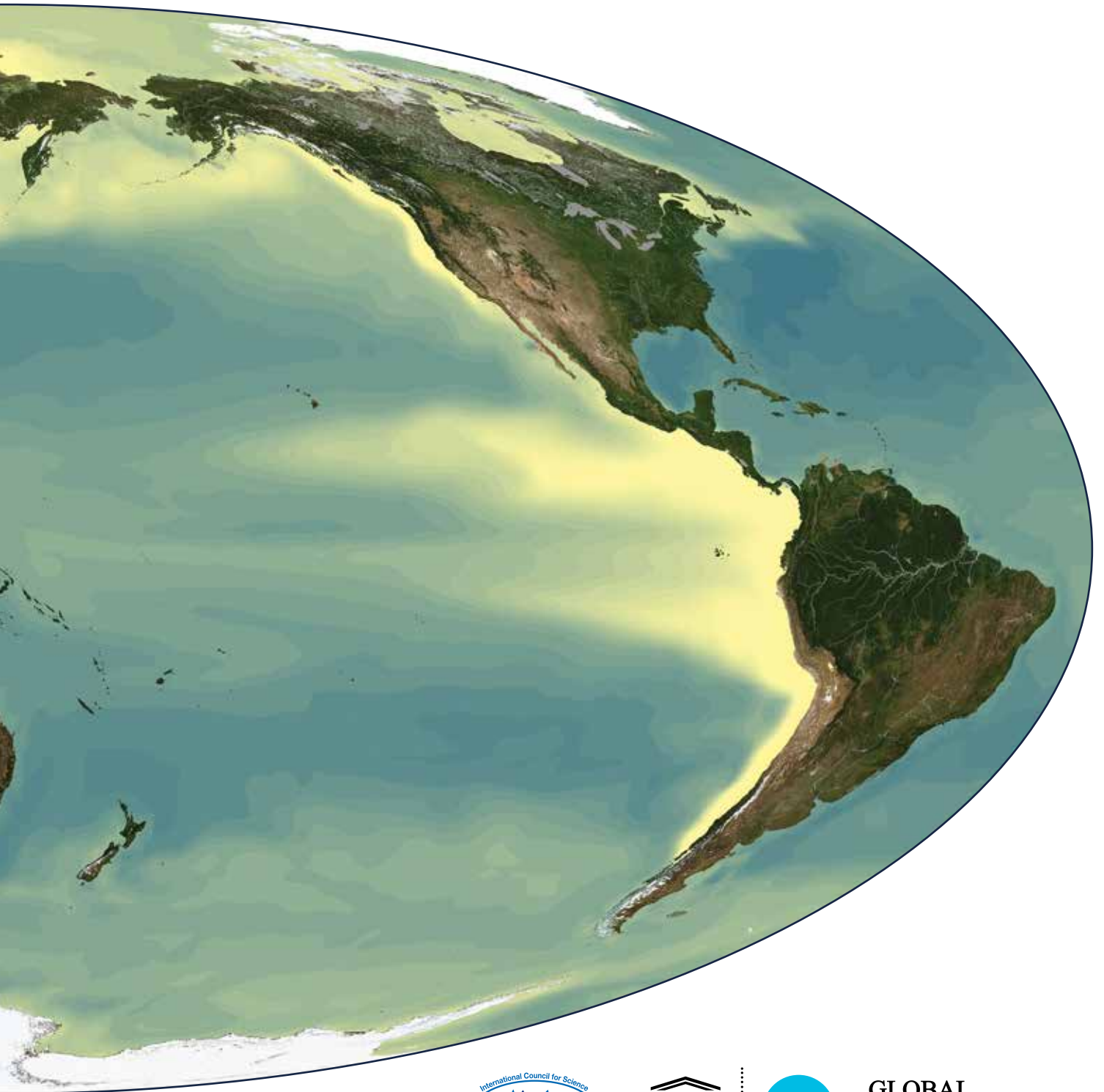


ACIDIFICATION DES OCÉANS

Résumé à l'intention des décideurs

Troisième Symposium sur « L'océan dans un monde avec un taux élevé de CO₂ »



**GLOBAL
IGBP** International
Geosphere-Biosphere
Programme
CHANGE

Parrains scientifiques :

Le Programme international sur la géosphère et la biosphère (PIGB) a été lancé en 1987 pour coordonner les recherches internationales sur les interactions à l'échelle mondiale et régionale entre les processus biologiques, chimiques et physiques à l'œuvre sur la planète, ainsi que leurs interactions avec les systèmes humains. Les projets internationaux centraux du PIGB étudient l'acidification des océans, il s'agit des projets suivants : Projet de recherche intégrée sur la biogéochimie marine et l'écosystème (IMBER), Étude sur la couche troposphérique à la surface de l'océan (SOLAS), Les changements planétaires survenus dans le passé (PAGES) et Interaction terre-océan dans les zones côtières (LOICZ).

La Commission océanographique intergouvernementale de l'UNESCO (COI-UNESCO) a été créée par l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO) en 1960 pour fournir aux États membres de l'Organisation des Nations Unies (ONU) un mécanisme essentiel chargé d'orchestrer la coopération mondiale dans le domaine de l'étude des océans.

Le Comité scientifique de la recherche océanique (SCOR) a été créé par le Conseil international des unions scientifiques en 1957 et coparraine les projets internationaux IMBER et SOLAS.

Citation :

PIGB, COI, SCOR (2013). Acidification des océans Résumé à l'intention des décideurs – Troisième Symposium sur « L'océan dans un monde avec un taux élevé de CO₂ ». Programme international sur la géosphère et la biosphère, Stockholm (Suède). (IOC/BRO/2013/5)

Directeurs de publication :

Wendy Broadgate (PIGB), Owen Gaffney (PIGB), Kirsten Isensee (COI-UNESCO), Ulf Riebesell (GEOMAR), Ed Urban (SCOR) et Luis Valdés (COI-UNESCO).

Auteurs :

Wendy Broadgate, PIGB ; Ulf Riebesell, GEOMAR, Centre Helmholtz pour la recherche sur l'océan de Kiel (Allemagne) ; Claire Armstrong, Université de Tromsø (Norvège) ; Peter Brewer, Institut de recherche de l'Aquarium de la Baie de Monterey (MBARI) (États-Unis) ; Ken Denman, Université de Victoria (Canada) ; Richard Feely, Laboratoire pour l'environnement marin du Pacifique, NOAA (États-Unis) ; Kunshan Gao, Université de Xiamen, (Chine) ; Jean-Pierre Gattuso, CNRS-UPMC, Laboratoire d'océanographie (France) ; Kirsten Isensee, COI-UNESCO ; Joan Kleypas, Centre national de recherches sur l'atmosphère (Climat et dynamiques mondiales), (États-Unis) ; Dan Laffoley, Union internationale pour la conservation de la nature (Suisse) ; James Orr, Laboratoire des sciences du climat et l'environnement (France) ; Hans-Otto Pörtner, Institut Alfred Wegener (Allemagne) ; Carlos Eduardo de Rezende, Universidade Estadual do Norte Fluminense (Brésil) ; Daniela Schmidt, Université de Bristol (Royaume-Uni) ; Ed Urban, SCOR ; Anya Waite, Université d'Australie occidentale ; Luis Valdés, COI-UNESCO.

Les auteurs remercient les personnes ci-après pour leurs commentaires sur le projet de manuscrit : Jim Barry (MBARI), Richard Black (Commission océan mondial), Luke Brander (Université libre d'Amsterdam et Université de science et de technologie de Hong Kong), Sam Dupont (Université de Göteborg), Jonathan Wentworth (Office parlementaire de la science et de la technologie du Royaume-Uni) et Wendy Watson-Wright (COI-UNESCO).

Infographie :

Félix Pharand-Deschênes (Globaïa), Naomi Lubick (PIGB), Owen Gaffney (PIGB), Wendy Broadgate (PIGB)

Conception et production graphiques :

Hilarie Cutler (PIGB), Naomi Lubick (PIGB)

Couverture :

Le pH des océans en 2100. Données de modèles fournies par Tatiana Ilyina de l'Institut Max Planck pour la météorologie ; carte établie par Globaïa.

ACIDIFICATION DES OCÉANS

La recherche sur l'acidification des océans se développe rapidement. Le troisième Symposium sur « L'océan dans un monde avec un taux élevé de CO₂ » (Monterey, Californie, septembre 2012) a réuni 540 experts venus de 37 pays pour examiner les résultats des travaux de recherche sur l'acidification des océans, les impacts de ce phénomène sur les écosystèmes, ses conséquences socioéconomiques et ses incidences sur le plan réglementaire. Plus du double de scientifiques ont participé au symposium de Monterey comparé à l'édition précédente qui s'était tenue quatre ans plus tôt.

Nous présentons ici un résumé de l'état des connaissances sur l'acidification des océans sur la base des dernières recherches présentées à l'occasion du symposium et celles qui l'ont suivi.

Les niveaux de dioxyde de carbone (CO₂) présent dans l'atmosphère sont en hausse du fait des activités humaines telles que l'utilisation de combustibles fossiles, et augmentent l'acidité de l'eau de mer. Ce processus est connu sous le nom d'acidification des océans. D'un point de vue historique, l'océan a absorbé près d'un quart de la totalité du CO₂ rejeté dans l'atmosphère par les êtres humains depuis le début de la révolution industrielle, entraînant une augmentation de 26 % de l'acidité des océans¹.

L'acidification des océans provoque une modification des écosystèmes et de la biodiversité marine. Elle peut compromettre la sécurité alimentaire et elle limite la capacité des océans à absorber le CO₂ émis par les activités humaines. L'impact économique de l'acidification des océans pourrait être considérable.

Réduire les émissions de CO₂ est la seule façon de minimiser les risques à grande échelle sur le long terme.



Katharina Fabricius

RÉSUMÉ DES RÉSULTATS

Au cours des vingt dernières années, il a été établi que le pH des océans de la planète diminuait du fait des émissions anthropiques de CO₂ dans l'atmosphère.

Le troisième Symposium sur « L'océan dans un monde avec un taux élevé de CO₂ » s'est fondé sur cette information.



Katharina Fabricius

- ▶ L'océan continue de s'acidifier à une vitesse sans précédent dans l'histoire de la planète. Les dernières recherches indiquent que le rythme de ce changement est peut-être le plus rapide des derniers 300 millions d'années.
- ▶ À mesure que l'acidité de l'océan augmente, sa capacité d'absorption du CO₂ présent dans l'atmosphère diminue, ce qui réduit le rôle de l'océan dans l'atténuation du changement climatique.
- ▶ Les impacts de l'acidification des océans sur des espèces précises ont été constatés en laboratoire et dans le cadre d'études de terrain sur des organismes répartis des pôles aux tropiques. De nombreux organismes sont affectés négativement : réduction de leur capacité à former et à maintenir les coquilles et les squelettes calcaires, réduction de la survie, de la croissance, de l'abondance, ainsi que du développement des larves. À l'inverse, des données indiquent que certains organismes tolèrent l'acidification des océans et que d'autres, comme certains herbiers marins, peuvent même en profiter.
- ▶ D'ici à quelques décennies, de vastes régions des océans polaires deviendront corrosives pour les coquilles non protégées des organismes marins calcaires.
- ▶ Les modifications de la chimie des carbonates dans les océans tropicaux peuvent gêner ou empêcher la croissance des récifs coralliens d'ici quelques décennies.
- ▶ Les effets profonds de l'acidification des océans devraient toucher les réseaux trophiques, la biodiversité, l'aquaculture et, donc, les sociétés humaines.
- ▶ Les espèces n'ont pas toutes le même potentiel d'adaptation à de nouveaux environnements. La chimie de l'océan peut changer trop rapidement pour que de nombreuses espèces ou populations s'adaptent par le biais de l'évolution.
- ▶ De multiples facteurs de stress – l'acidification des océans, le réchauffement, les baisses de concentrations en oxygène dans l'océan (désoxygénation), l'augmentation de l'irradiance des UV-B en raison de l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique, la surpêche, la pollution et l'eutrophisation – et leurs interactions représentent des défis de taille pour les écosystèmes océaniques.
- ▶ Nous ne comprenons pas complètement les rétroactions biogéochimiques au système climatique qui peuvent découler de l'acidification des océans.
- ▶ Il reste difficile de prévoir comment des écosystèmes entiers changeront sous l'effet de l'élévation des niveaux de CO₂. Si nous en savons suffisamment pour anticiper une évolution de la biodiversité et des écosystèmes marins au cours de notre existence, nous sommes incapables de faire des prévisions quantitatives fiables au sujet des impacts socioéconomiques.
- ▶ Les populations qui dépendent des services écosystémiques des océans sont particulièrement vulnérables et devront peut-être s'adapter aux effets de l'acidification des océans ou les surmonter d'ici à quelques décennies. Dans certaines régions, les secteurs de l'aquaculture et de la pêche de crustacés et mollusques peuvent peut-être faire face à la situation en ajustant leurs pratiques de gestion afin d'éviter les impacts de l'acidification des océans. La disparition des récifs coralliens tropicaux compromettra le tourisme, la sécurité alimentaire et la protection des côtes pour une grande partie des populations les plus pauvres du globe.

ATTÉNUATION ET ADAPTATION

L'acidification des océans n'est pas explicitement couverte par des traités internationaux. Les processus de l'ONU et les conventions internationales et régionales commencent à prendre en considération ce phénomène (Convention/Protocole de Londres, Convention des Nations Unies sur le droit de la mer, Convention sur la diversité biologique, entre autres). Les négociateurs de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) ont commencé à recevoir des rapports périodiques de la communauté scientifique sur l'acidification des océans, et la question est désormais traitée dans les rapports d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC).

En juin 2012, la Conférence des Nations Unies sur le développement durable (Conférence Rio + 20) a reconnu que l'acidification des océans constituait une menace pour des écosystèmes économiquement et écologiquement importants et pour le bien-être humain.

Cependant, il n'existe encore aucun dispositif international ou financement adéquat pour s'attaquer spécifiquement à l'atténuation de l'acidification des océans ou à l'adaptation à ses effets.

Considérations politiques

- ▶ La première cause de l'acidification des océans est le rejet de CO₂ atmosphérique dans l'atmosphère par les activités humaines. La seule option réaliste connue pour atténuer l'acidification à l'échelle mondiale est la limitation des niveaux futurs de CO₂ atmosphérique.
- ▶ Une gestion appropriée de l'utilisation des sols et le changement d'affectation des terres peuvent améliorer l'assimilation du CO₂ atmosphérique par la végétation et les sols, par le biais d'activités telles que la restauration des zones humides, la plantation de nouvelles forêts et le reboisement.
- ▶ Les propositions de géo-ingénierie qui ne réduisent pas le CO₂ atmosphérique – par exemple les méthodes qui se concentrent uniquement sur la température (telles que la rétrodiffusion des aérosols ou la réduction des gaz à effet de serre autres que le CO₂) – n'empêcheront pas l'acidification des océans. L'ajout de minéraux alcalins dans l'océan ne serait efficace et économiquement réalisable qu'à une très petite échelle dans les régions côtières, et les effets indésirables d'une telle pratique sur l'environnement sont largement méconnus².
- ▶ Les impacts d'autres facteurs de stress sur les écosystèmes océaniques, tels que l'élévation des températures et la désoxygénation – qui vont aussi de pair avec l'augmentation de la teneur en CO₂ – seront réduits en limitant l'augmentation des niveaux de CO₂.
- ▶ Le secteur de la conchyliculture est confronté à d'importantes menaces et peut tirer parti d'une évaluation des risques et de l'analyse de stratégies d'atténuation et d'adaptation. Par exemple, la surveillance de l'eau de mer autour des éclosiers conchylicoles peut permettre de déterminer à quel moment limiter l'apport d'eau de mer ayant un pH trop bas, les éclosiers peuvent être déplacés, ou les responsables peuvent sélectionner les stades larvaires ou les souches qui résistent le mieux à l'acidification des océans au moment de la reproduction.
- ▶ Aux échelons locaux, les effets de l'acidification des océans sur la résilience des écosystèmes peuvent être limités en minimisant d'autres facteurs de stress locaux^{3,4,5} grâce aux actions suivantes :
 - Élaborer des pratiques de gestion durable pour les pêches, telles que réglementer les prises pour réduire la surpêche et créer des plans de réduction des captures accessoires à long terme. Il a été montré que, s'il est mis en place et appliqué, ce type de gestion maintient la résilience des écosystèmes.
 - Adopter une gestion durable des habitats, le renforcement de la protection des côtes, une réduction des apports fluviaux en sédiments et l'application de l'aménagement de l'espace marin.
 - Créer et maintenir des aires marines protégées (AMP) qui aident à gérer les écosystèmes menacés et très vulnérables pour renforcer leur résilience face à de multiples facteurs de stress environnementaux⁶.
 - Surveiller et réguler les sources d'acidification localisées issues de ruissellements et de polluants tels que les engrais.
 - Réduire les émissions de dioxyde de soufre et d'oxyde nitreux produites par les centrales thermiques alimentées au charbon et les échappements des navires⁷ qui ont d'importants effets acidifiants au niveau local.

ACIDIFICATION DES OCÉANS

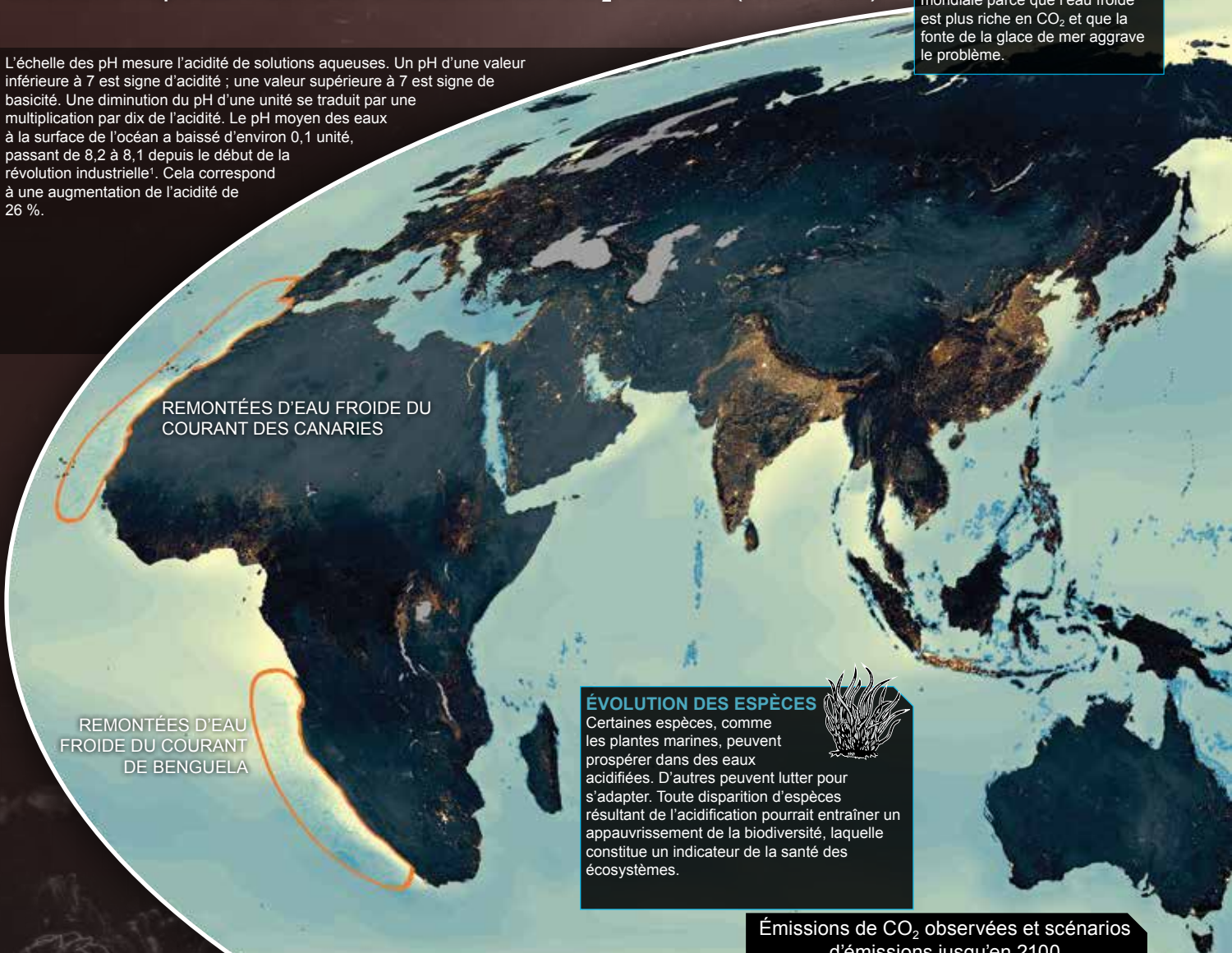
Le pH des océans en 2100

Scénario reposant sur des émissions de CO₂ élevées (RCP* 8,5)

L'échelle des pH mesure l'acidité de solutions aqueuses. Un pH d'une valeur inférieure à 7 est signe d'acidité ; une valeur supérieure à 7 est signe de basicité. Une diminution du pH d'une unité se traduit par une multiplication par dix de l'acidité. Le pH moyen des eaux à la surface de l'océan a baissé d'environ 0,1 unité, passant de 8,2 à 8,1 depuis le début de la révolution industrielle¹. Cela correspond à une augmentation de l'acidité de 26 %.

ARCTIQUE

Les eaux de l'Arctique s'acidifient plus vite que la moyenne mondiale parce que l'eau froide est plus riche en CO₂ et que la fonte de la glace de mer aggrave le problème.



REMONTÉES D'EAU FROIDE DU COURANT DES CANARIES

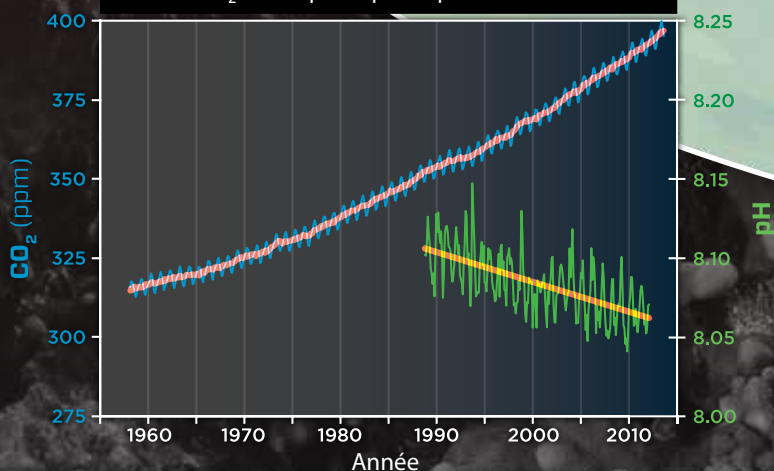
REMONTÉES D'EAU FROIDE DU COURANT DE BENGUELA

ÉVOLUTION DES ESPÈCES

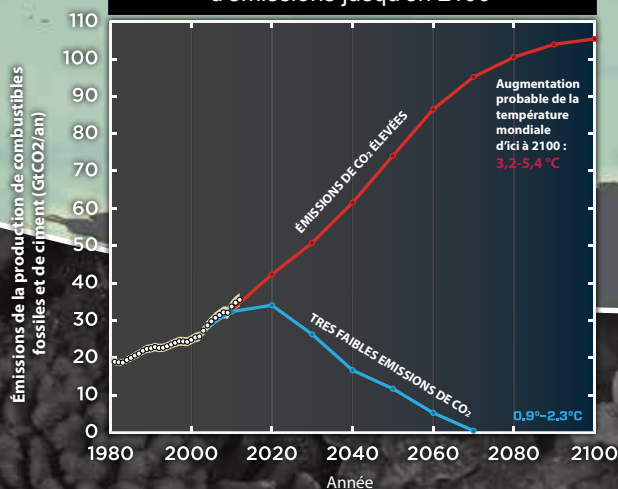
Certaines espèces, comme les plantes marines, peuvent prospérer dans des eaux acidifiées. D'autres peuvent lutter pour s'adapter. Toute disparition d'espèces résultant de l'acidification pourrait entraîner un appauvrissement de la biodiversité, laquelle constitue un indicateur de la santé des écosystèmes.



CO₂ atmosphérique et pH de l'océan



Émissions de CO₂ observées et scénarios d'émissions jusqu'en 2100



Observations du CO₂ (parties par million) dans l'atmosphère et du pH des eaux marines de surface à partir des séries chronologiques de Mauna Loa et des séries chronologiques océaniques de Hawaii (HOT), Station Aloha, Hawaii, Pacifique Nord.
Source : Adapté de Richard Feely (NOAA), Pieter Tans, NOAA/ESRL (www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends) et Ralph Keeling, Scripps Institution of Oceanography (scrippsco2.ucsd.edu)

* Scénarios d'émissions du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat - Profils représentatifs d'évolution de concentration (Representative Concentration Pathways) (référence 1).

Les émissions mondiales de CO₂ (points blancs, incertitude en gris) découlant de l'utilisation des combustibles fossiles suivent la trajectoire d'émissions élevées (ligne rouge, RCP* 8,5) qui conduira, selon les prévisions, à un réchauffement climatique mondial significatif. Des réductions d'émissions importantes et soutenues (ligne bleue, RCP* 2,6) sont nécessaires pour accroître la probabilité de rester dans les limites de l'objectif de 2 °C convenu au niveau international.

Source : Glen Peters et Robbie Andrew (CICERO) et le Projet mondial sur le carbone, adapté de Peters *et al.*, 2013 (référence 8). Données historiques fournies par Carbon Dioxide Information Analysis Centre.



L'ACIDIFICATION DES OCÉANS EN CHIFFRES

40%

L'augmentation des niveaux de dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère depuis le début de la révolution industrielle.

26%

L'augmentation de l'acidité des océans des niveaux préindustriels à aujourd'hui.

Environ 170%

L'augmentation prévue de l'acidité des océans d'ici à 2100 par rapport aux niveaux préindustriels si les émissions de CO₂ se poursuivent (RCP* 8,5).

10 fois

Le rythme actuel de l'acidification est plus de 10 fois plus rapide qu'à aucun autre moment au cours des derniers 55 millions d'années.

24 millions

Le nombre de tonnes de CO₂ que l'océan absorbe chaque jour.

STRESS OCÉANIQUE

L'acidification des océans est l'un des nombreux changements majeurs à l'œuvre dans les océans. Les autres incluent le réchauffement de l'eau, la baisse de la concentration en oxygène, la surpêche et l'eutrophisation.



REMONTÉES D'EAU FROIDE DU COURANT DE CALIFORNIE

CORAU

Si les émissions de CO₂ continuent d'être élevées, les modifications de la chimie des carbonates et le réchauffement des océans tropicaux peuvent gêner ou empêcher la croissance des récifs coralliens d'ici quelques décennies. Les coraux des eaux chaudes apparaissent en bleu.



COQUILLAGES

Les mollusques d'une grande valeur économique, tels que les moules et les huîtres, sont très sensibles à l'acidification des océans. Certains bassins conchylicoles ont déjà dû s'adapter à des niveaux de pH inférieurs ou même s'implanter ailleurs, du fait de causes naturelles et humaines.



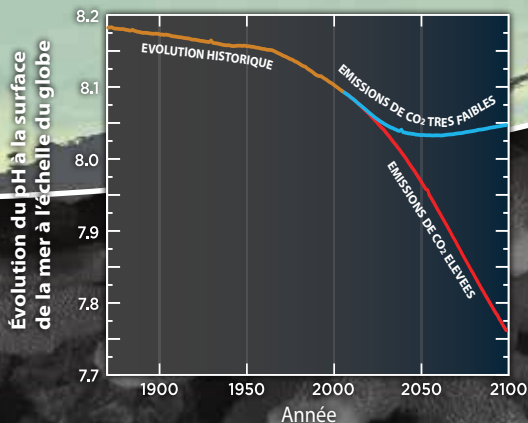
REMONTÉES D'EAU FROIDE DU COURANT DE HUMBOLDT

RÉGIONS DE REMONTÉES D'EAU FROIDE

D'importants changements sont attendus dans les régions de remontées d'eau froide, importantes sur le plan économique, qui présentent déjà des niveaux de pH naturels plus bas. Dans ces régions, l'acidification, le réchauffement et une faible teneur en oxygène se conjuguent (voir les lignes orange).

2100

Projections concernant le pH à la surface de l'océan jusqu'en 2100



Modélisation du pH à la surface de la mer à l'échelle du globe entre 1870 et 2100. La ligne bleue reflète l'évolution du pH estimée en cas de très faibles émissions de CO₂ dans l'atmosphère (profil représentatif d'évolution de concentration du GIEC, RCP* 2,6). La ligne rouge reflète l'évolution du pH en cas d'émissions de CO₂ élevées (la trajectoire d'émissions actuelle, RCP* 8,5). Source : Adapté de Bopp *et al.*, 2013 (référence 9).

1850



ACIDIFICATION DES OCÉANS (pH)

7.1

7.7

8.3

ACIDIFICATION DES OCÉANS

Saturation d'aragonite en 2100

Scénario reposant sur des émissions de CO₂ élevées (RCP* 8,5)

Arctique

Certaines régions de l'Arctique sont déjà corrosives pour les coquilles d'organismes marins, et la plupart des eaux superficielles de l'Arctique le seront d'ici à quelques décennies. Cela nuira aux écosystèmes et aux populations humaines qui dépendent d'eux.

Coraux

Selon les estimations, des émissions de CO₂ très élevées entraîneront des conditions hydrologiques de surface défavorables à la croissance des récifs coralliens tropicaux d'ici à 2100. D'importantes réductions des émissions pourraient garantir que 50 % des eaux de surface restent favorables à la croissance des récifs coralliens***.

État de saturation

« L'état de saturation », Oméga (Ω), décrit le niveau de saturation de l'eau de mer en carbonate de calcium. C'est la forme minérale du carbonate de calcium, appelée aragonite, qui apparaît ici.

Si Ω est inférieur à 1 ($\Omega < 1$), les conditions sont corrosives (eaux sous-saturées) pour les coquilles et les squelettes constitués d'aragonite.

Lorsque $\Omega > 1$, les eaux sont sursaturées en carbonate de calcium, et les conditions sont favorables à la formation des coquilles. La croissance des coraux profite d'un état $\Omega \geq 3$.

D'ici à 2100, les projections de modèles informatiques montrent que Ω sera inférieur à 3 dans les eaux de surface autour des récifs tropicaux si les émissions de CO₂ maintiennent leur trajectoire actuelle***.

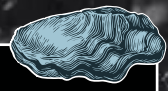
Antarctique

Si les émissions de CO₂ maintiennent leur trajectoire actuelle (RCP* 8,5), 60 % des eaux superficielles de l'océan Austral (en moyenne annuelle) devraient devenir corrosives pour les organismes dont la coquille est constituée d'aragonite, par exemple les ptéropodes, qui font partie du réseau trophique marin. D'importantes réductions des émissions (RCP* 2,6) pourraient empêcher que la plupart des eaux de surface de l'océan Austral deviennent corrosives pour les coquilles des organismes aragonitiques**.

* Scénarios d'émissions du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat - Profils représentatifs d'évolution de concentration (référence 1).

** Communication personnelle : Joos et Steinacher, d'après Steinacher *et al.*, 2013 (référence 10).

*** Ricke *et al.*, 2013 (référence 11).



Coquilles et squelettes

Les coquilles et les squelettes de nombreux organismes marins sont constitués soit de calcite, soit d'aragonite ; deux formes du carbonate de calcium. Les scientifiques s'intéressent particulièrement à l'aragonite, qui est produite par de nombreux coraux et quelques mollusques, parce qu'elle est plus soluble que la calcite. Les coquilles et les squelettes des organismes se développent plus facilement lorsque les ions carbonate sont nombreux dans l'eau – « eau sursaturée ». Les coquilles et les squelettes non protégés se dissolvent lorsque les ions carbonate sont rares dans l'eau – « eau sous-saturée ».

2100



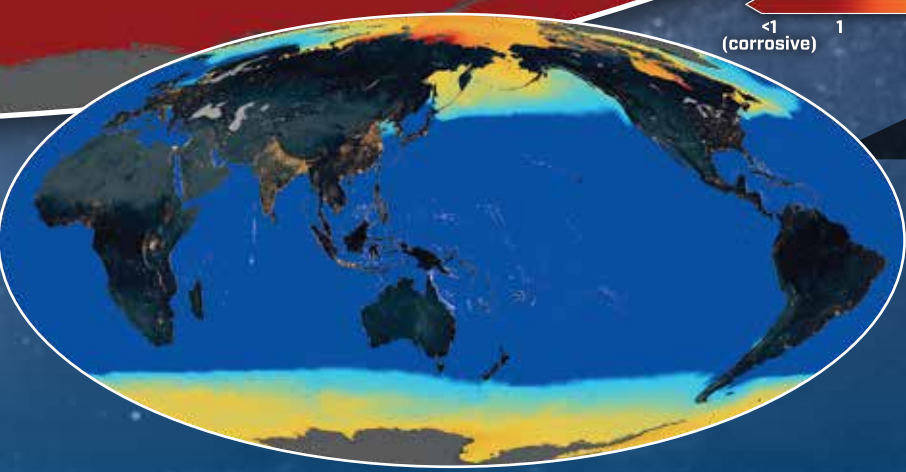
Phytoplancton

Les coquilles dures des coccolithophores – de minuscules organismes marins flottants – produisent une grande partie du carbonate de calcium marin. Lorsqu'ils meurent, ces organismes coulent et entraînent le carbone au fond de l'océan. Ils constituent une source de nourriture importante pour d'autres formes de vie marine, en plus d'être une source majeure de sulfure de diméthyle (DMS), un gaz permettant de refroidir le climat. La question de savoir comment les coccolithophores réagissent à l'acidification des océans fait l'objet de recherches approfondies. Si certaines espèces semblent tolérer cette acidification, d'autres montrent une calcification et des taux de croissance en baisse dans des eaux acidifiées.

État de saturation d'aragonite (Ω)



1850



COORDINATION DE LA RECHERCHE INTERNATIONALE



- ▶ Il est urgent de mener des recherches pour réduire les incertitudes. La mise en place d'un réseau coordonné à l'échelle mondiale pour la recherche expérimentale, l'observation et la modélisation dans le domaine maritime est essentielle. Les domaines de recherche prioritaires sont les réactions des espèces clés et des écosystèmes entiers, en particulier sur des périodes plus longues ; la possibilité pour les organismes de s'adapter ; les impacts socioéconomiques ; et les rétroactions biogéochimiques sur le système climatique.
- ▶ En juin 2012, lors de la Conférence des Nations Unies Rio + 20, la création du Centre de coordination de l'action internationale relative à l'acidification des océans a été annoncée. Le centre, basé dans les locaux du Laboratoire d'étude du milieu marin de l'Agence internationale de l'énergie atomique à Monaco, facilitera les activités internationales de recherche et d'observation dans le domaine de l'acidification des océans, communiquera au sujet de ces activités et les soutiendra. En outre, il établira un lien entre science et politique.
- ▶ Un réseau mondial d'observation de l'acidification des océans¹² a été mis en place en juin 2012, et coopère étroitement avec le Centre de coordination de l'action internationale. À l'échelle mondiale, relativement peu de sites disposent d'outils de mesure sur plusieurs décennies et les régions isolées sont mal couvertes. Le réseau mesurera les variables chimiques et écosystémiques nécessaires pour fournir une base de référence afin d'évaluer les effets futurs de l'acidification des océans. Il veillera à la qualité et à la comparabilité des données, et synthétisera les informations au profit de la société.
- ▶ L'investissement de sommes importantes pour surveiller les impacts sur les écosystèmes constituera un aspect essentiel des futures activités de coordination de la recherche internationale.
- ▶ L'initiative Future Earth, nouvelle initiative décennale de recherche internationale sur la durabilité mondiale mise en place par le Conseil international pour la science, fournira un mécanisme pour l'élaboration d'un programme de recherche coordonné au niveau international, qui inclura des questions telles que l'acidification des océans.






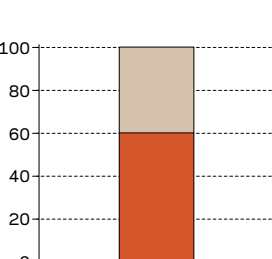
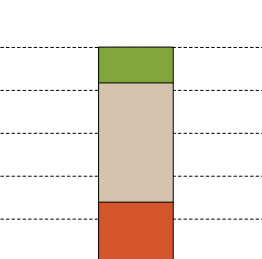
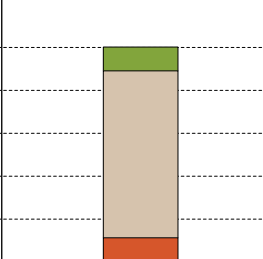
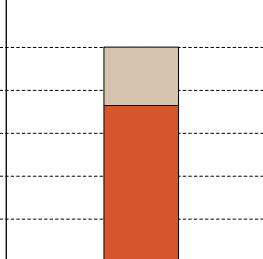
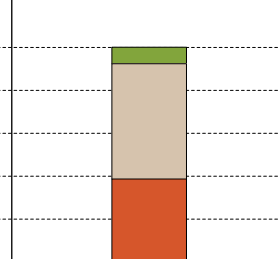
MOBILISATION DES PARTIES PRENANTES

Il est essentiel de mettre en place un échange de connaissances effectif entre les secteurs de la science, de la politique et de l'industrie pour une adaptation et une atténuation efficaces de cette acidification. Un espace de dialogue entre la communauté des chercheurs et les parties prenantes – le Groupe d'utilisateurs référent travaillant sur l'acidification des océans – a été créé, sur la base d'une initiative européenne précédente. Il rapprochera une grande variété d'utilisateurs finals et d'éminents scientifiques afin de faciliter un transfert plus rapide de connaissances.

En outre, l'initiative Future Earth (voir ci-dessus) vise à fournir un outil de dialogue axé sur la recherche de solutions aux problèmes mondiaux dont fait partie l'acidification des océans.

LES ORGANISMES IMPORTANTS DU POINT DE VUE COMMERCIAL ET ÉCOLOGIQUE

La recherche scientifique montre la vulnérabilité et la sensibilité d'espèces marines commercialement et écologiquement importantes à l'acidification des océans avec des niveaux élevés de CO₂ (adapté de Turley et Boot, 2011¹³, et de Wittmann et Pörtner, 2013¹⁴).

GROUPES				
Mollusques	Échinodermes	Crustacés	Poissons à nageoires	Coraux
				
Palourdes, coquilles Saint-Jacques, moules, huîtres, ptéropodes, ormeaux, conques et céphalopodes (encomers, seiches et poulpes)	Oursins, concombres de mer, étoiles de mer	Crevettes grises, crevettes roses, crabes, homard, copépodes (zooplancton), etc.	Poissons de petite taille (harengs, sardines, anchois), de grande taille (thons, bonites, marlins), poissons démersaux (flets, flétans, cabillauds, églefins), etc.	Corail d'eaux chaudes et d'eaux froides
Rôle des écosystèmes				
Les moules et les ptéropodes constituent une source de nourriture importante pour les poissons, notamment les saumons (ptéropodes). Les moules et les huîtres fournissent des habitats pour d'autres organismes.	Espèces clés et source de nourriture pour les poissons. Les étoiles de mer sont d'importants prédateurs.	Les organismes constituant le zooplancton, tels que les copépodes, jouent un rôle central dans les réseaux trophiques, en reliant le phytoplancton (qu'ils mangent) et les prédateurs (poissons et mammifères).	Rôle majeur dans l'équilibre des écosystèmes en tant que prédateurs de niveau trophique supérieur ou en reliant des niveaux trophiques importants.	Importants ingénieurs écologiques, fournissant un habitat pour une grande variété d'espèces marines, la plupart vivant spécifiquement dans les récifs coralliens.
Valeur commerciale actuellement estimée à l'échelle mondiale*				
24 milliards de dollars Important au niveau local. Source de protéines directe dans certains États insulaires.	0,7 milliard de dollars Important au niveau local. Aliment de « luxe » ; les concombres de mer sont beaucoup utilisés dans la médecine traditionnelle chinoise.	37 milliards de dollars	65 milliards de dollars Part importante de l'alimentation humaine, fabrication d'huile et de farine de poisson. Important au niveau local : dépendance à son égard pour la nourriture et les revenus dans certaines régions.	30-375 milliards de dollars [◇] Ces zones de grande diversité biologique marine assurent la protection des côtes, attirent les touristes et soutiennent la pêche.
Vulnérabilité				
Adultes et juvéniles ont montré des taux de calcification, de croissance et de survie en baisse. Certaines espèces peuvent disparaître au niveau local.	Peu d'espèces étudiées. Vulnérabilité aux premiers stades de la vie. Certaines espèces peuvent disparaître au niveau local.	Moins touché que d'autres groupes. La tolérance thermique de certains crabes diminue avec l'acidification.	Probabilité d'effets indirects dus aux changements touchant les proies et à la perte d'habitats tels que les coraux. Effets directs possibles sur le comportement, la santé et la survie des larves.	Réduction de la calcification, augmentation de la bioérosion, effets synergiques du réchauffement et de l'acidification.
Sensibilité (pourcentage de espèces affectées) [△]				
				

Images: © iStockphoto.com

Effets

- Positif
- Aucun
- Négatif

- ◆ La valeur commerciale pour la pêche représente la somme des méthodes traditionnelles de capture et de l'aquaculture en 2010 en dollars des États-Unis¹⁵.
- ◇ La valeur estimée aujourd'hui des biens et des services fournis à l'échelle mondiale par les récifs coralliens, tels que la protection des littoraux, le tourisme, la biodiversité et la nourriture^{16,17}.
- △ Adapté de Wittmann et Pörtner, 2013¹⁴. Ces données correspondent à des trajectoires d'émissions de CO₂ maintenues au rythme actuel.

SOCIÉTÉS ET ÉCONOMIES

Les sociétés dépendent des océans pour divers services écosystémiques :

- des services d'approvisionnement, notamment en nourriture ;
- des services de régulation, tels que l'absorption du carbone de l'atmosphère ;
- des services culturels, tels que les activités de loisirs ;
- des services de soutien, tels que le cycle des nutriments.

Si l'on en sait beaucoup sur les effets de l'acidification des océans sur les organismes isolés, les réactions possibles d'écosystèmes entiers sont largement méconnues. Ainsi, même si des conséquences néfastes sont attendues pour les coquillages et les coraux des eaux chaudes (certitude élevée) et pour la pêche (certitude faible), il est difficile de quantifier dans quelle mesure les écosystèmes et les pêches évolueront, et comment les sociétés s'adapteront à ces changements et les géreront.

Niveaux de certitude

Dans le présent document, nous utilisons ces niveaux de certitude (à droite). Pour en savoir plus sur la façon dont ces niveaux sont déterminés, voir la partie « Contexte scientifique ».

- T** TRÈS HAUT DEGRÉ DE CERTITUDE
- E** CERTITUDE ÉLEVÉE
- M** CERTITUDE MOYENNE
- F** CERTITUDE FAIBLE

T La capacité de l'océan à agir en tant que puits de carbone diminue à mesure qu'il s'acidifie [TRÈS HAUT DEGRÉ DE CERTITUDE]

L'océan constitue un vaste puits pour les émissions anthropiques de CO₂. Environ un quart des émissions annuelles de CO₂ découlant des activités humaines finissent actuellement dans l'océan¹⁸. Il ne sera plus possible de compter sur ce service à l'avenir. Le CO₂ atmosphérique augmente trop vite pour que l'océan puisse réagir. La capacité d'absorption du CO₂ par l'océan diminue à mesure que le pH océanique diminue ; autrement dit, le pouvoir tampon de l'eau de mer diminue¹⁹. Cette baisse de capacité est préoccupante pour ce qui est de stabiliser les concentrations de CO₂ atmosphériques, et elle implique de réduire davantage les émissions à l'avenir pour atteindre les objectifs en vue d'atténuer le changement climatique.

M Le déclin de la conchyliculture entraînera des pertes économiques [CERTITUDE MOYENNE], mais l'ampleur de ces pertes est incertaine

D'ici à 2100, selon une estimation²⁰, les pertes économiques annuelles au niveau mondial provoquées par le déclin de la production de mollusques dû à l'acidification des océans pourrait s'élever à plus de 130 milliards de dollars (aux niveaux de prix de 2010) si la tendance actuelle d'augmentation des émissions de CO₂ se maintient [CERTITUDE FAIBLE]. Aux États-Unis, on estime à 13 % la baisse de revenus d'ici à 2060 due au déclin des récoltes de mollusques du fait de l'acidification²¹ [CERTITUDE FAIBLE]. Des espèces de coquillages importantes d'un point de vue économique peuvent réagir de différentes manières à l'acidification des océans (voir tableau p. 9), mais nous n'en savons pas encore suffisamment pour faire des prévisions économiques quantitatives pour toutes les pêches.

Les mollusques semblent être l'un des groupes d'organismes parmi les plus sensibles de ceux étudiés dans le cadre de l'acidification des océans. En effet, les larves d'huîtres des éclosiers de la région nord-est de l'océan Pacifique sont très sensibles à l'acidification des océans et sont déjà affectées par le faible niveau de pH des eaux^{22,23}.

Les conséquences sociales

Les exemples illustrés ici mettent en évidence la possibilité d'importantes baisses de revenus, de perte d'emplois et de moyens de subsistance, et de coûts économiques indirects si l'acidification des océans endommage les habitats marins, modifie la disponibilité des ressources marines et bouleverse d'autres services écosystémiques.

Les estimations actuelles des impacts socioéconomiques se limitent largement aux services des écosystèmes faisant l'objet d'une commercialisation tels que la pêche et le tourisme. Une évaluation complète doit tenir compte des services écosystémiques autres que ceux qui reposent directement sur le marché, tels que les services



SEUILS

Les scientifiques peuvent-ils définir un niveau d'acidification des océans « sûr » ou « tolérable » qui ne doit pas être dépassé ?

Certains décideurs demandent à des scientifiques s'il est possible de commencer à définir des seuils au-delà desquels les écosystèmes ne se rétabliront pas. Il s'agit d'un défi complexe. Les effets conjugués de la modification de la physique, de la chimie et de la biologie de l'océan varient d'un écosystème à l'autre. Les impacts dépendent aussi de la zone géographique et de caractéristiques locales variables.

Les impacts sur les écosystèmes dépendent des décisions politiques qui sont prises maintenant en lien avec les futures émissions de dioxyde de carbone, et des politiques concernant d'autres problèmes pour le domaine maritime. En outre, les questions relatives à la définition de niveaux d'acidification des océans « sûrs » ou « tolérables » revêtent des aspects éthiques et économiques complexes.

La science ne peut pas répondre à ces questions mais peut fournir des informations sur les conséquences possibles des choix politiques. Il est nécessaire d'établir un dialogue entre les scientifiques, les responsables politiques et les parties prenantes pour déterminer quelles questions exigent des réponses et quelles options sont disponibles.

La première étape dans la définition de seuils et d'indicateurs sera la mise en place d'activités de recherches concertées à l'échelle mondiale. Ces activités devraient combiner des expériences, des modèles et des observations pour tenter de démêler la complexité de la réaction des écosystèmes marins à l'acidification des océans et aux autres facteurs de stress, et seront dirigées par le Centre de coordination de l'action internationale récemment créé.

M Des impacts socioéconomiques négatifs sont attendus de la dégradation des récifs coralliens [CERTITUDE MOYENNE], mais l'ampleur de ces coûts est incertaine

D'importantes pertes économiques risquent de se produire en raison du recul des récifs coralliens tropicaux provoqué par l'acidification des océans (d'ici à 2100, la rareté des coraux fera passer la valeur de leur perte à plus de 1 000 milliards de dollars par an, aux niveaux de prix de 2010, selon une estimation²⁴) [CERTITUDE FAIBLE]. Une grande partie de ces pertes surviendra dans des sociétés vulnérables et de petits États insulaires dont l'économie repose sur les récifs coralliens. La perte de ces récifs aura des effets négatifs sur le tourisme, la sécurité alimentaire, la protection des littoraux et la biodiversité. Mais l'acidification des océans n'est pas le seul facteur de stress. Les récifs subissent déjà des pressions dues aux températures plus élevées (qui entraînent le blanchissement des coraux), à la destruction d'habitats, à la surpêche, à la sédimentation et à la pollution.

Les mesures qui ralentiront le rythme de l'acidification des océans réduiront les impacts et maximiseront les possibilités pour les récifs coralliens de se rétablir, voire de s'adapter à d'autres facteurs de stress. Ainsi, les facteurs de stress anthropiques supplémentaires, tels que les pratiques de pêche destructrices, la pollution et la sédimentation, auront non seulement des effets écologiques immédiats, mais ils réduiront aussi la possibilité pour les récifs coralliens de s'adapter à des conditions plus chaudes et plus acides.

En plus de l'adoption d'une politique climatique à l'échelle mondiale, des stratégies locales de gestion des récifs coralliens – mises en œuvre à l'aide d'outils tels que les zones marines protégées, la gestion des pêches, et l'aménagement de l'espace marin – augmentent les possibilités pour les récifs coralliens de faire face à l'acidification des océans^{4,25}.

F Les impacts de l'acidification des océans sur les écosystèmes peuvent nuire aux prédateurs de niveau trophique supérieur et aux pêches [CERTITUDE FAIBLE]

Nous ignorons comment les changements dans l'abondance et la répartition du phytoplancton et du zooplancton se propageront à travers les écosystèmes marins et nuiront aux poissons et aux pêches, dont dépendent de nombreuses sociétés. En outre, nous savons très peu de choses au sujet des effets directs de l'acidification des océans sur les poissons qui sont la cible de la pêche commerciale et de la pêche de subsistance, ce qui donne lieu à de fortes incertitudes s'agissant de prévoir l'évolution des pêches à l'avenir. Néanmoins, ce domaine est essentiel pour la recherche, la pêche permettant de faire vivre environ 540 millions de personnes, soit 8 % de la population mondiale²⁶.

culturels, les services de régulation (tels que la protection des côtes) et un ensemble plus large de services de soutien (tels que la production de médicaments dérivés de la mer).

Dans une large mesure, les sociétés qui sont très vulnérables à l'acidification des océans se situent dans les pays en développement ou les petits États insulaires²⁷. Leurs

habitants dépendent du poisson et d'autres ressources marines comme principale source de protéines. En outre, les populations et les cultures autochtones de l'Arctique – où l'océan s'acidifie plus vite qu'ailleurs – dépendent également des ressources naturelles, par conséquent, ces sociétés peuvent être vulnérables.



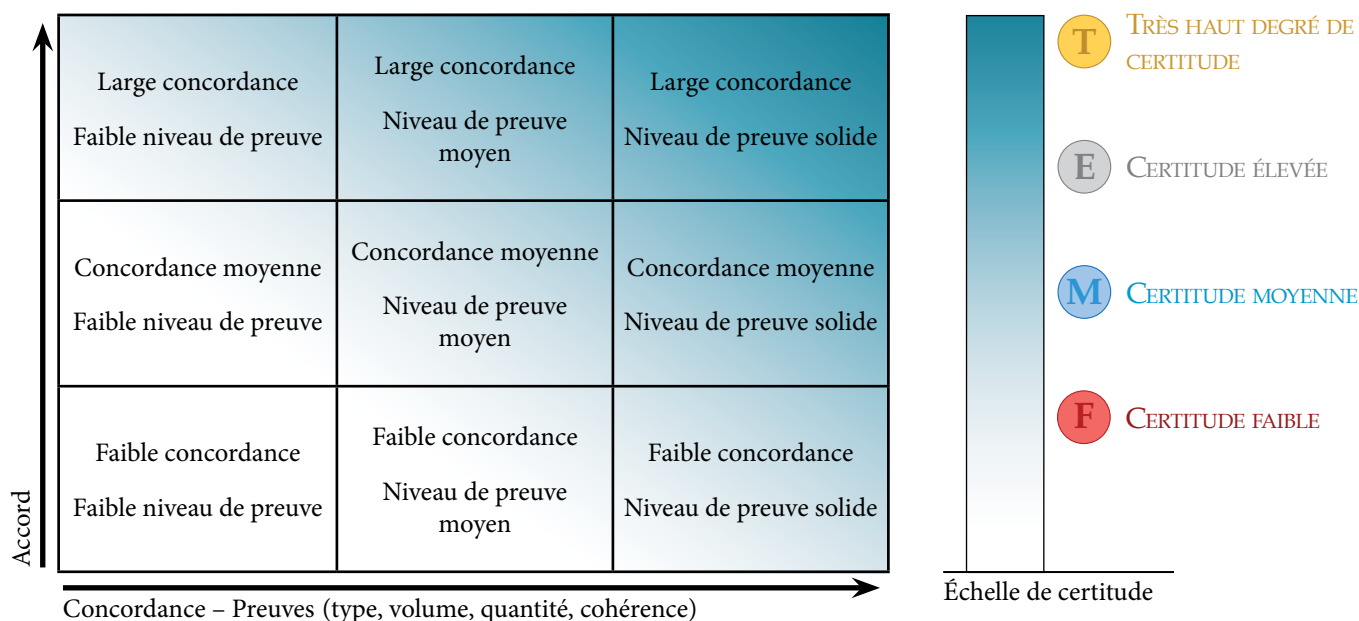
© iStockphoto.com

Contexte scientifique

La recherche sur l'acidification des océans est relativement récente. Le nombre de chercheurs y participant et de documents de recherche publiés augmente rapidement. Les nouvelles découvertes sont fréquentes et notre compréhension s'affine continuellement.

Définition des niveaux de certitude

Dans le présent document, le niveau de certitude est qualifié de « faible », « moyen », « élevé » ou « très haut ». Ces qualificatifs résument les avis des auteurs concernant la validité des conclusions telles qu'établies à l'issue de l'évaluation des éléments probants et du degré de concordance. L'analyse s'appuie sur des déclarations de confiance issues de synthèses examinées par les pairs, telles que l'ouvrage de synthèse du Projet européen sur l'acidification des océans²⁸ et le cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Les méta-analyses les plus récentes, de 228 études des impacts de l'acidification des océans sur les organismes marins²⁹ et de 167 études sur les animaux marins¹⁴, ont fourni d'autres éléments qui ont aidé les auteurs à analyser et à résumer les conclusions des expériences. L'augmentation des niveaux de preuve et des degrés de concordance sont liés à l'augmentation du niveau de certitude (voir schéma), comme l'explique la note d'orientation du GIEC sur le traitement des incertitudes³⁰ contenue dans le cinquième Rapport d'évaluation.



L'OCÉAN S'ACIDIFIE RAPIDEMENT ET À UN RYTHME SANS PRÉCÉDENT DANS L'HISTOIRE DE LA TERRE

La chimie de l'acidification des océans est bien connue, et les chercheurs disposent de modèles bien délimités capables de prédire les modifications de la composition chimique de l'océan de surface à mesure qu'augmente la concentration en CO₂ dans l'atmosphère. Lorsque le gaz carbonique se dissout dans l'eau de mer, de l'acide carbonique se forme, modifiant la composition chimique de l'océan : on appelle cette réaction l'« acidification des océans ».

T L'acidification des océans résulte du fait que les émissions de CO₂ dans l'atmosphère par les activités humaines se retrouvent dans l'océan [TRÈS HAUT DEGRÉ DE CERTITUDE]

L'océan absorbe actuellement environ un quart du CO₂ émis chaque année dans l'atmosphère par les activités humaines¹⁸, réduisant fortement l'impact de ce gaz à effet de serre sur le climat.

T L'acidification anthropogénique des océans est en cours, et elle est mesurable [TRÈS HAUT DEGRÉ DE CERTITUDE]

Les émissions de CO₂ anthropogéniques entraînent des modifications chimiques de l'océan qu'on peut observer aujourd'hui et qui sont hautement prévisibles à long terme à l'échelle mondiale.

L'acidité de l'océan de surface a augmenté d'environ 26 % depuis le début de la révolution industrielle¹. Avec l'augmentation de la teneur en CO₂ dissous, les organismes calcifiants auront plus de difficultés à construire leurs coquilles.

E L'océan s'acidifie plus rapidement qu'il ne l'a fait pendant des millions d'années [CERTITUDE ÉLEVÉE]

L'acidification actuelle induite par l'homme est un phénomène unique dans l'histoire géologique de notre planète, en raison de son rythme d'évolution rapide.

Une analyse de l'acidification de l'océan durant les 300 derniers millions d'années souligne le rythme d'évolution sans précédent de l'acidification en cours³¹. Le phénomène le plus comparable, survenu il y a 55 millions d'années, a été associé à l'extinction massive d'organismes calcaires des grands fonds marins et à des modifications importantes de l'écosystème de l'océan de surface³¹. À cette époque, bien que le rythme d'évolution du pH de l'océan ait été rapide, il semble avoir été 10 fois plus lent que le changement actuel³².

T Les effets des émissions des combustibles fossiles sur l'acidification des océans seront ressentis pendant des siècles [TRÈS HAUT DEGRÉ DE CERTITUDE]

L'augmentation du CO₂ atmosphérique est trop rapide pour être stabilisée par des réactions naturelles telles que la dissolution des carbonates en eaux profondes, qui se produit sur des échelles temporelles de milliers d'années, ou l'érosion des roches terrestres carbonatées et silicatées, qui se produit sur des échelles temporelles allant de dizaines à des centaines de milliers d'années.

Des projections à l'échelle mondiale concernant la modification de la composition chimique de l'eau de mer peuvent être établies avec une grande précision à partir des scénarios des niveaux de CO₂ atmosphérique. Même si les émissions de CO₂ anthropogéniques s'arrêtaient aujourd'hui, le pH des océans ne pourrait pas revenir à son niveau pré-industriel avant des siècles³³.

T La réduction des émissions de CO₂ freinera la progression de l'acidification des océans [TRÈS HAUT DEGRÉ DE CERTITUDE]

La concentration en CO₂ atmosphérique est d'environ 395 parties par million (ppm ; moyenne mondiale, en 2013), soit plus de 40 % supérieure au niveau pré-industriel de 280 ppm. La moitié de cette augmentation s'est produite au cours des 33 dernières années³⁴. Si l'on réduit les émissions de CO₂, un volume moins important de CO₂ entrera dans l'océan, limitant ainsi l'ampleur des impacts de l'acidification de l'océan³³.

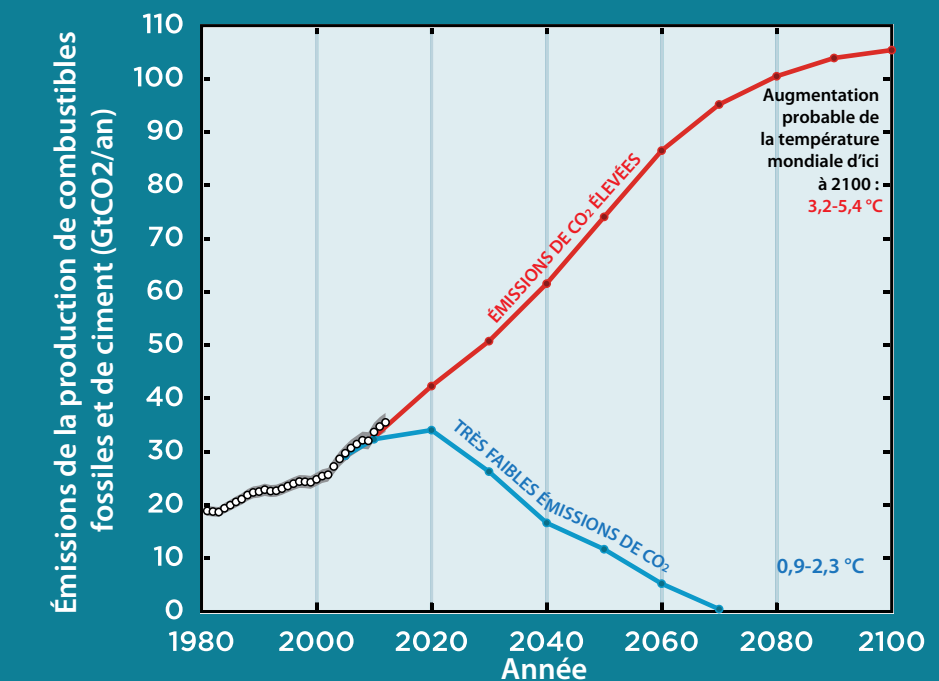
La réduction des émissions de CO₂ est possible grâce aux technologies existantes et au développement de nouvelles technologies. Actuellement, il existe des accords visant à stabiliser les émissions de CO₂ afin de limiter l'augmentation de la température moyenne mondiale à 2 °C au-dessus des niveaux pré-industriels. Ces niveaux peuvent encore mettre en péril la stabilité de certains écosystèmes marins. Les émissions actuelles suivent une tendance à la hausse bien plus importante de la température mondiale (voir encadré).

Futures émissions de CO₂ : Profils représentatifs d'évolution de concentration

Les profils représentatifs d'évolution de concentration (RCP) sont les profils d'émissions futures utilisés dans le cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat¹. De nombreux scénarios pourraient mener à tel ou tel profil. Le RCP le plus élevé (forçage radiatif de 8,5 Wm⁻²) représente un volume d'émissions élevé (statu quo). Ce scénario entraîne un réchauffement climatique moyen d'ici à 2100 de 4,3 °C environ (fourchette probable comprise entre 3,2 et 5,4 °C) au-dessus des températures pré-industrielles. Le RCP le plus bas (forçage radiatif de 2,6 Wm⁻²) nécessite des mesures considérables d'atténuation et de réduction des émissions, ayant pour effet une augmentation de la température mondiale moyenne de 1,6 °C environ (fourchette probable comprise entre 0,9 et 2,3 °C) au-dessus des niveaux pré-industriels.

Conséquences sur le milieu marin mondial

D'ici à 2100, l'augmentation des émissions au rythme actuel (RCP 8,5) pourraient provoquer une acidification des océans conduisant à la disparition de 100 % des eaux de surface tropicales aux conditions propices à la croissance des récifs coralliens. Des réductions significatives (RCP 2,6) permettraient de réduire ces pertes



de plus de moitié (communication personnelle, Joos et Steinacher^{10,11}).

D'ici à 2100, 60 % des eaux de surface de l'océan Austral (en moyenne) pourraient devenir corrosives pour les coquilles des organismes aragonitiques, maillon de la chaîne alimentaire marine, si les émissions se poursuivent selon leur trajectoire actuelle (RCP 8,5). Avec des mesures d'atténuation solides (RCP 2,6), les conditions corrosives pourraient être évitées dans la majeure partie de l'océan Austral (communication personnelle, Joos et Steinacher¹⁰).

Les émissions mondiales de CO₂ (points blancs, incertitude en gris) découlant de l'utilisation des combustibles fossiles suivent la trajectoire d'émissions élevées (ligne rouge, RCP 8,5) qui conduira, selon les prévisions, à un réchauffement climatique mondial significatif. Des réductions d'émissions importantes et soutenues (ligne bleue, RCP 2,6) sont nécessaires pour accroître la probabilité de rester dans les limites de l'objectif de 2 °C convenu au niveau international.

Source : Glen Peters et Robbie Andrew (CICERO) et le Projet mondial sur le carbone, adapté de Peters et al., 2013⁸. Données historiques fournies par le Carbon Dioxide Information Analysis Centre.

COMMENT LES ORGANISMES MARINS RÉAGIRONT-ILS ?

La plupart de ce que l'on sait des réactions des organismes à l'acidification des océans provient d'expériences menées en laboratoire à relativement court terme sur des espèces isolées.

Ces expériences utilisent des versions simplifiées de l'environnement naturel, mais donnent un aperçu des réactions potentielles dans l'océan²⁸.

De plus en plus d'expériences en laboratoire et sur le terrain étudient ensemble de multiples organismes, par exemple, en ce qui concerne les gradients de pH dans les écosystèmes acidifiés naturellement et les mésocosmes formés de communautés naturelles contenant de nombreuses espèces.

Les résultats obtenus à partir d'un large éventail d'organismes marins montrent des réactions diverses, notamment une diminution du taux de survie, de la calcification, de la croissance, du développement et de l'abondance. La sensibilité et la tolérance des organismes marins vis-à-vis de l'acidification des océans sont très variables, parfois même au sein d'une seule espèce. D'autres organismes réagissent positivement à l'augmentation de la disponibilité en CO₂. Les organismes plus actifs, tels que les crustacés mobiles et les poissons, semblent être moins sensibles à l'acidification des océans. Une augmentation de la disponibilité en carbone peut être bénéfique aux algues molles (non calcaires), à certains phytoplanctons et à certaines plantes marines. Les effets sur les espèces individuelles – qu'elles déclinent ou qu'elles profitent de l'acidification de l'océan – peuvent entraîner des perturbations en cascade dans d'autres maillons de la chaîne alimentaire.

M L'acidification anthropogénique des océans aura des effets négatifs sur de nombreux organismes calcifiants [CERTITUDE MOYENNE]

La plupart des études démontrent que la calcification – la capacité de certains organismes à produire des coquilles ou des squelettes – diminue du fait de l'acidification des océans²⁹. Parmi ces organismes, on trouve notamment les espèces planctoniques calcifiantes (telles que les foraminifères, les coccolithophoridés et les ptéropodes), les coraux et les mollusques, ainsi que les échinodermes (par exemple les oursins) et dans une moindre mesure les crustacés (par exemple les crabes).

Une analyse des études sur l'acidification des océans démontre que de nombreux organismes calcifiants présentent également une diminution de leur taux de survie, de leur croissance, de leur développement et de leur abondance²⁹. Dans la plupart des groupes d'organismes calcifiants, les individus aux stades précoces de leur développement sont plus sensibles aux modifications de la composition chimique de l'eau de mer induites par le CO₂. Les crustacés sont moins affectés que les coraux, les mollusques ou les échinodermes¹⁴.

E Les mollusques (tels que les moules, les huîtres et les ptéropodes) sont l'un des groupes les plus sensibles à l'acidification des océans [CERTITUDE ÉLEVÉE]

De nombreux mollusques aux premiers stades de vie (larves et juvéniles) ainsi que des individus adultes ont présenté une diminution de leur calcification, de leur croissance et de leur taux de survie, ce qui fait des mollusques l'un des groupes les plus sensibles à l'acidification des océans¹⁴.

M Les coquilles des ptéropodes (escargots marins) se dissolvent déjà [CERTITUDE MOYENNE]

Les océans de hautes latitudes deviennent déjà corrosifs pour certaines espèces. Les coquilles des ptéropodes, de petits escargots marins qui sont des espèces indispensables de la chaîne alimentaire, se dissolvent déjà dans certaines parties de l'océan Austral, qui entoure l'Antarctique³⁵. Ils occupent une place particulièrement importante dans la chaîne alimentaire dans les régions polaires, en constituant par exemple une source de nourriture essentielle pour le saumon rose³⁶.

E Si les émissions de CO₂ poursuivent leur trajectoire actuelle, dans le courant de ce siècle, le rythme d'érosion des récifs coralliens risque de devenir plus rapide que celui de leur construction [CERTITUDE ÉLEVÉE]

L'acidification des océans risque à elle seule de faire cesser la construction des récifs d'ici à la fin du XXI^e siècle, dans le cas où les émissions de CO₂ poursuivraient leur trajectoire actuelle³⁷. Si l'on tient compte également du blanchissement des coraux dû au réchauffement de l'océan, alors le rythme d'érosion de la plupart des récifs pourrait dépasser leur rythme global de construction par les coraux et d'autres organismes, dès lors que les niveaux de CO₂ atteindront 560 ppm (d'ici au milieu du siècle si les émissions suivent la trajectoire actuelle). Si cela se produit, la dégradation et la disparition des récifs coralliens affecteront des écosystèmes entiers dépendants de cet habitat, avec des conséquences pour la biodiversité, la pêche et la protection côtière. Des réductions massives des émissions de CO₂ sont nécessaires pour maintenir le plus grand nombre de récifs coralliens tropicaux dans des eaux favorables à leur croissance¹¹.

E Les communautés coralliennes d'eaux froides sont en danger [CERTITUDE ÉLEVÉE] et pourraient disparaître

D'ici à 2100, on estime que 70 % des coraux d'eaux froides seront exposés à des eaux corrosives, bien que certains connaîtront des eaux sous-saturées dès 2020³⁹. Les conditions sous-saturées augmenteront la vitesse de dissolution des squelettes morts (la base de ces communautés coralliennes en eaux profondes), ce qui entraînera une désintégration des écosystèmes coralliens d'eaux froides^{40,41}. Leur disparition pourrait avoir des conséquences sur les réseaux trophiques⁴², dans la mesure où ils fournissent des habitats, des sites d'alimentation et des zones de reproduction à de nombreux organismes d'eaux profondes.

Composition chimique de l'océan et formation des coquilles et squelettes

Dans l'océan, le CO₂ réagit avec l'eau et les ions carbonate pour former de l'acide carbonique. Des taux de CO₂ élevés réduisent la concentration en ions carbonate. Les coquilles de nombreux organismes marins sont constituées de carbonate de calcium, qui existe sous deux formes : la calcite et l'aragonite. Les deux minéraux se dissolvent en cas de faibles concentrations en ions carbonate – appelées « conditions sous-saturées » – à moins que les organismes calcifiants n'aient élaboré des mécanismes pour prévenir la dissolution, tels que des couches protectrices ou d'autres moyens de protéger leurs structures de carbonates de l'exposition à l'eau corrosive⁴³. L'aragonite, qui est formée par les coraux, dans les premiers stades larvaires de nombreux mollusques, et par certains mollusques adultes (notamment les ptéropodes), est plus soluble que la calcite, qui est produite par les coccolithophoridés, les foraminifères, les échinodermes et les crustacés.

L'échelle utilisée pour définir le niveau de saturation de l'eau de mer en carbonate de calcium est l'« état de saturation », oméga (Ω), où $\Omega < 1$ indique des eaux sous-saturées (corrosives) et $\Omega > 1$, des eaux sursaturées.

Généralement, dans un océan qui s'acidifie, la croissance des squelettes et des coquilles ralentit de manière significative à mesure que l'état de saturation diminue. Par exemple, les états de saturation élevés en aragonite, supérieurs à 3 ($\Omega \geq 3$) sont bénéfiques à la croissance des coraux⁴⁴.

Conditions en eaux profondes

Les eaux profondes contiennent naturellement plus de CO₂ et présentent un pH plus faible que l'océan de surface. En outre, la saturation en calcite et en aragonite diminue avec l'augmentation de la pression. On appelle la frontière entre ces eaux sous-saturées plus profondes et les eaux saturées moins profondes « horizon de saturation ».

L'horizon de saturation en aragonite est de moins en moins profond, et les conditions corrosives pour les organismes

calcifiants se rapprochent donc de la surface.

Ce processus est bien compris et bien documenté à l'échelle mondiale. L'horizon de saturation atteindra la surface de l'océan d'ici à la fin de ce siècle dans le Pacifique Nord, les mers arctiques et l'océan Austral, dans un scénario de RCP 8,5 (voir page 15).

Dans les zones de remontée d'eau profonde, comme dans le nord-est de l'océan Pacifique et le long des côtes occidentales de l'Amérique du Sud et de l'Afrique, les eaux profondes naturellement plus acides remontent sur les plateaux continentaux. L'absorption du CO₂ anthropogénique par les océans a élargi la surface des zones d'acidité plus forte⁴⁵, qui comprennent d'importantes zones de pêches.



M L'acidification des océans peut avoir certains effets directs sur la physiologie, le comportement et la santé des poissons [CERTITUDE MOYENNE]

L'accumulation de CO₂ dans le corps des animaux peut perturber les processus vitaux, entraînant des modifications globales de leur santé et de leur physiologie^{46,47}. En général, les poissons semblent être moins sensibles à l'acidification des océans que les organismes moins mobiles. L'acidification des océans a entraîné une diminution du rythme de croissance des larves de poisson⁴⁸.

Des données montrent que le poisson-clown (qui vit dans les récifs coralliens) modifie son comportement (odorat, ouïe, danger visuel, etc.) et perd ses capacités à détecter les prédateurs et les proies⁴⁹. Les impacts à long terme sont incertains, dans la mesure où les données géologiques n'indiquent pas que les poissons sont sensibles à l'acidification des océans, comme elles le font pour d'autres organismes.

Dans l'ensemble, les modifications de l'approvisionnement en nourriture des poissons risquent d'avoir des conséquences plus importantes sur leur abondance que les effets physiologiques directs.

E L'acidification des océans peut être bénéfique pour certaines espèces d'herbes marines et de phytoplanctons [CERTITUDE ÉLEVÉE]

Les niveaux élevés de CO₂ semblent stimuler la photosynthèse et la croissance chez certains groupes d'organismes, parmi lesquels certaines plantes marines et algues molles et certains groupes de phytoplancton (par exemple, les cyanobactéries et les picoeucaryotes)⁵⁰. Les observations menées dans des zones océaniques présentant des taux élevés de CO₂ (par exemple, l'île d'Ischia, en Italie) montrent que les plantes marines prospèrent dans les eaux acidifiées⁵¹.

E La combinaison de l'acidification des océans et de l'augmentation des températures a des effets néfastes sur de nombreux organismes [CERTITUDE ÉLEVÉE]

L'acidification des océans semble réduire la tolérance thermique de certains organismes⁵⁶, et d'autres y sont plus vulnérables dans les eaux plus chaudes. La réaction aux deux changements combinés est souvent plus importante que la réaction à ces changements pris séparément⁵². Des études indiquent une tendance à la baisse du taux de survie, de la croissance et du développement lorsque l'augmentation des températures et l'acidification des océans se produisent en même temps. La combinaison de l'acidification des océans et du réchauffement peut entraîner des modifications de la biodiversité des espèces et de la composition de l'écosystème, en réduisant les aires d'habitat.

Les coraux d'eaux chaudes sont également vulnérables au blanchissement pendant les périodes de chaleur inhabituelle. Plusieurs phénomènes de blanchissement massif de coraux se sont produits depuis 1979, qui ont entraîné une hausse de la mortalité des coraux d'eaux chaudes dans le monde⁵³. Les récifs coralliens tropicaux sont particulièrement menacés par les effets combinés du réchauffement et de l'acidification des océans.

COMMENT LES ÉCOSYSTÈMES MARINS RÉAGIRONT-ILS ?

E Les différentes réactions des espèces à l'acidification des océans et autres facteurs de stress risquent d'entraîner des modifications des écosystèmes marins [CERTITUDE ÉLEVÉE], mais l'ampleur de l'impact est difficile à prévoir

Nous savons que certains organismes, tels que les plantes marines et certaines espèces phytoplanctoniques, semblent prospérer dans un environnement plus acide, tandis que d'autres, tels que les coraux et les mollusques, souffrent de ces conditions. Ces sensibilités – associées à d'autres facteurs de stress, tels que le réchauffement global – risquent d'entraîner des changements dans la composition des espèces, modifiant ainsi les sources d'alimentation des prédateurs. Les incertitudes sont nombreuses quant à notre capacité à prédire ces changements et leurs conséquences, mais les scientifiques s'accordent largement pour dire que ces changements risquent d'être importants⁵⁴.

Les lacunes qui doivent être comblées sont les suivantes : Par quoi les espèces qui disparaissent seront-elles remplacées ? Le rôle des espèces de remplacement dans l'écosystème sera-t-il le même ? Quelles seront les conséquences pour les écosystèmes ? Comment cette situation affectera-t-elle les cycles biogéochimiques dont la vie dépend ? Certaines espèces seront-elles capables de s'adapter à temps ? (voir l'encadré « Adaptation »). Y aura-t-il des répercussions de génération en génération ?

Malgré les progrès rapides réalisés dans la recherche sur l'acidification des océans, nous sommes toujours incapables d'établir des projections fiables des impacts sur les écosystèmes marins et les ressources halieutiques. La façon dont les écosystèmes dans leur ensemble réagissent à l'acidification des océans est donc un domaine de recherche prioritaire. Les études en laboratoire et les études où l'on utilise un organisme isolé ne peuvent être simplement extrapolées aux écosystèmes dans leur ensemble. Toutefois, des données suffisantes existent pour permettre aux scientifiques de tirer certaines conclusions préliminaires avec différents degrés de certitude.

Adaptation

L'acclimatation est la capacité d'un organisme individuel à s'adapter au changement de son environnement. L'acclimatation peut avoir lieu à différentes échelles de temps au cours de la vie de l'organisme. Les réactions, qui sont généralement réversibles, permettent à l'organisme d'évoluer dans un large éventail de conditions environnementales.

L'adaptation est la réaction évolutive d'une population – sur de multiples générations – à la modification de son environnement. Le potentiel d'adaptation évolutive est plus élevé chez les espèces qui se reproduisent rapidement et dont les populations sont abondantes.

Des données expérimentales démontrent l'adaptation évolutive à l'acidification des océans chez certains organismes ayant des cycles de vie courts, notamment les microalgues calcaires (coccolithophoridés)⁵⁵. Les membres de ce groupe présentent une grande diversité génétique, un cycle de reproduction court d'un jour ou moins, et des populations très abondantes allant jusqu'à un million de cellules par litre d'eau de mer. En revanche, les organismes qui se reproduisent plus lentement, tels que les coraux, devront peut-être lutter pour s'adapter à l'ampleur et au rythme de l'acidification des océans qui aura lieu durant ce siècle.

Les études expérimentales à court terme sur la réaction d'une espèce aux changements environnementaux ne prennent généralement pas en compte les processus adaptatifs. Les réactions observées peuvent ainsi surestimer la sensibilité à long terme des populations naturelles aux changements environnementaux. Toutefois, les extinctions massives révélées par les données géologiques, à des époques où le rythme de modification des océans était beaucoup plus lent qu'il ne l'est aujourd'hui, semblent indiquer que la vitesse d'évolution de certaines espèces pourrait être trop lente pour leur permettre de s'adapter aux multiples changements environnementaux qui devraient affecter les océans dans le futur [CERTITUDE ÉLEVÉE].



E Des facteurs de stress multiples aggravent les effets de l'acidification des océans [CERTITUDE ÉLEVÉE]

Les problèmes auxquels les organismes sont confrontés du fait de l'acidification des océans sont souvent aggravés par d'autres facteurs de stress, tels que l'augmentation de la température⁵⁶, le manque d'oxygène (désoxygénation), la stratification de l'océan^{9,57}, la surexploitation, la pollution, les phénomènes extrêmes, l'augmentation des radiations UV-B (en raison de l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique)⁵⁸ et les variations de la salinité. Certains de ces facteurs de stress résultent également d'un excès de CO₂ dans l'atmosphère.

À l'échelle mondiale, l'augmentation de la stratification entraîne une diminution de la productivité aux basses latitudes – près de l'équateur – où la quantité de nutriments est limitée. En outre, de vastes étendues océaniques aux basses latitudes sont vulnérables à la désoxygénation à mesure que la température augmente. L'effet conjugué de l'acidification des océans et de la désoxygénation pourrait avoir de graves conséquences sur la biogéochimie de l'océan, telles que l'apparition de vastes « zones mortes » et l'augmentation de la dénitrification de l'eau de mer et de l'oxydation anaérobie de l'ammonium, qui affectent le cycle de l'azote marin^{9,57}. Les changements en eaux profondes résultant de l'acidification des océans sont peu étudiés.

F L'acidification des océans modifiera les cycles biogéochimiques à l'échelle mondiale [CERTITUDE FAIBLE]

L'évolution de la composition des écosystèmes et la chimie des carbonates océaniques affectent les cycles biogéochimiques de manière complexe. Certains organismes prospéreront dans des conditions d'acidification de l'océan tandis que d'autres en souffriront. Les modifications du phytoplancton et du zooplancton affecteront à leur tour les prédateurs qui dépendent de ces organismes pour s'alimenter. L'acidification des océans peut également avoir des conséquences sur la production d'oxyde d'azote, un puissant gaz à effet de serre, et de sulfure de diméthyle, un composé pouvant refroidir le climat. Nous devons comprendre les réactions des écosystèmes aux effets de l'acidification des océans sur le cycle des nutriments essentiels, afin d'améliorer la façon dont les modèles globaux simulent et prédisent les changements biogéochimiques⁵⁹.

M L'acidification des océans peut stimuler la fixation de l'azote chez certaines cyanobactéries [CERTITUDE MOYENNE]

Des données ont démontré que la fixation de l'azote chez certaines cyanobactéries sera stimulée par l'acidification des océans⁵⁴. Ce processus transforme l'azote sous une forme biologiquement disponible, apportant aux océans d'importantes quantités de nutriments. Cela pourrait avoir des conséquences sur le cycle de l'azote et la productivité des océans, dans la mesure où de vastes étendues océaniques sont pauvres en azote.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- GIEC, 2013. *Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Changements climatiques 2013 : Les éléments scientifiques, Résumé à l'intention des décideurs*, http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_SPM_brochure_fr.pdf
- The Royal Society, 2005. *Ocean Acidification Due to Increasing Atmospheric Carbon Dioxide*. The Royal Society, Londres.
- Billé, R., Kelly, R., Biastoch, A., Harrould-Kolieb, E., Herr, D., Joos, F., Kroeker, K., Laffoley, D., Oschlies, A., Gattuso, J.-P., 2013. Taking action against ocean acidification: a review of management and policy options. *Environmental Management* 52:761-779, doi:10.1007/s00267-013-0132-7.
- Pandolfi, J.M., Connolly, S.R., Marshall, D.J., Cohen, A.L., 2011. Projecting coral reef futures under global warming and ocean acidification. *Science* 333(6041):418-422, doi:10.1126/science.1204794.
- Rau, G.H., McLeod, E.L., Hoegh-Guldberg, O., 2012. The need for new ocean conservation strategies in a high-carbon dioxide world. *Nature Climate Change* 2:720-724, doi:10.1038/nclimate1555.
- Conseil national de la recherche des États-Unis, 2001. *Marine Protected Areas: Tools for Sustaining Ocean Ecosystems*. The National Academies Press, Washington, D.C.
- Hassellöv, I.-M., Turner, D.R., Lauer, A., Corbett, J.J., 2013. Shipping contributes to ocean acidification. *Geophysical Research Letters* 40:2731-2736, doi:10.1002/grl.50521.
- Peters, G.P., Andrew, R.M., Boden, T., Canadell, J.G., Ciais, P., Le Quéré, C., Marland, G., Raupach, M.R., Wilson, C., 2013. The challenge to keep global warming below 2 °C. *Nature Climate Change* 3:4-6, doi:10.1038/nclimate1783.
- Bopp, L., Resplandy, L., Orr, J.C., Doney, S.C., Dunne, J.P., Gehlen, M., Halloran, P., Heinze, C., Ilyina, T., Seferian, R., Tjiputra, J., Vichi, M., 2013. Multiple stressors of ocean ecosystems in the 21st century: projections with CMIP5 models. *Biogeosciences* 10:6225-6245.
- Steinacher, M., Joos, F., Stocker, T.F., 2013. Allowable carbon emissions lowered by multiple climate targets. *Nature* 499(7457):197-201, doi:10.1038/nature12269.
- Ricke, K.L., Orr, J.C., Schneider, K., Caldeira, K., 2013. Risks to coral reefs from ocean carbonate chemistry changes in recent earth system model projections. *Environmental Research Letters* 8:034003, doi:10.1088/1748-9326/8/3/034003.
- www.pmel.noaa.gov/co2/story/International+OA+Observing+Network
- Turley, C., Boot, K., 2011. The ocean acidification challenges facing science and society. In Gattuso, J.-P., Hansson, L. (eds.), *Ocean Acidification*. Oxford University Press, 326 p.
- Wittmann, A.C., Pörtner, H.-O., 2013. Sensitivities of extant animal taxa to ocean acidification. *Nature Climate Change* doi:10.1038/nclimate1982.
- FAO, 2012. *Statistiques des pêches et de l'aquaculture 2010*. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome.
- Cesar, H.J.S., Burke, L., Pet-Soede, L., 2003. *The Economics of Worldwide Coral Reef Degradation*. Cesar Environmental Economics Consulting, Arnhem, et WWF-Pays-Bas, Zeist, Pays-Bas. 23 p. Disponible en ligne : <http://assets.panda.org/downloads/cesardegradationreport100203.pdf>.
- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neil, R.V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutton, P., van den Belt, M., 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387:253-260.
- Le Quéré, C., Raupach, M.R., Canadell, J.G., Marland, G., Bopp, L., Ciais, P., Conway, T.J., Doney, S.C., Feely, R.A., Foster, P., Friedlingstein, P., Gurney, K., Houghton, R.A., House, J.I., Huntingford, C., Levy, P.E., Lomas, M.P., Majkut, J., Metzler, N., Ometto, J.P., Peters, G.P., Prentice, I.C., Randerson, J.T., Running, S.W., Sarmiento, J.L., Schuster, U., Sitch, S., Takahashi, T., Viovy, N., van der Werf, G.R., Woodward, F.I., 2009. Trends in the sources and sinks of carbon dioxide. *Nature Geoscience* 2:831-836, doi:10.1038/ngeo689.
- Sabine, C.L., Feely, R.A., Gruber, N., Key, R.M., Lee, K., Bullister, J.L., Wanninkhof, R., Wong, C.S., Wallace, D.W.R., Tilbrook, B., Millero, F.J., Peng, T.-H., Kozyr, A., Ono, T., Rios, A.F., 2004. The oceanic sink for anthropogenic CO₂. *Science* 305(5682):367-371, doi:10.1126/science.1097403.
- Narita, D., Rehdanz, R., Tol, R.S.J., 2012. Economic costs of ocean acidification: a look into the impacts on global shellfish production. *Climatic Change* 113:1049-1063, doi: 10.1007/s10584-011-0383-3.
- Cooley, S.R., Doney, S.C., 2009. Anticipating ocean acidification's economic consequences for commercial fisheries. *Environmental Resource Letters* 4:024007, doi:10.1088/1748-9326/4/2/024007.
- Barton, A., Hales, B., Waldbusser, G.G., Langdon, C., Feely, R.A., 2012. The Pacific oyster, *Crassostrea gigas*, shows negative correlation to naturally elevated carbon dioxide levels: Implications for near-term ocean acidification effects. *Limnology and Oceanography* 57(3):698-710, doi:10.4319/lo.2012.57.3.0698.
- Waldbusser, G.G., Brunner, E.L., Haley, B.A., Hales, B., Langdon, C.J., Prah, F.G., 2013. A developmental and energetic basis linking larval oyster shell formation to acidification sensitivity. *Geophysical Research Letters* 40:2171-2176, doi:10.1002/grl.50449.
- Brander, L.M., Rehdanz, K., Tol, R.S.J., Van Beukering, P.J.H., 2012. The economic impact of ocean acidification on coral reefs. *Climate Change Economics* 3(1):1250002, doi:10.1142/S2010007812500029.
- Ateweberhan, M., Feary, D.A., Keshavmurthy, S., Chen, A., Schleyer, M.H., Sheppard, C.R., 2013. Climate change impacts on coral reefs: Synergies with local effects, possibilities for acclimation, and management implications. *Marine Pollution Bulletin* 74:526-539, doi:10.1016/j.marpolbul.2013.06.011.
- FAO, 2010. *La situation mondiale des pêches et de l'aquaculture, 2010*. Département des pêches et de l'aquaculture de la FAO, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome.
- Cooley, S.R., Lucey, N., Kite-Powell, H., Doney, S.C., 2012. Nutrition and income from molluscs today imply vulnerability to ocean acidification tomorrow. *Fish and Fisheries* 13:182-215, doi:10.1111/j.1467-2979.2011.00424.x.
- Gattuso, J.-P., Hansson, L. (eds.), 2011. *Ocean Acidification*. Oxford University Press, 326 p.
- Kroeker, K.J., Kordas, R.L., Crim, R., Hendriks, I.E., Ramajo, L., Singh, G.S., Duarte, C.M., Gattuso, J.-P., 2013. Impacts of ocean acidification on marine organisms: quantifying sensitivities and interaction with warming. *Global Change Biology* 19:1884-1896, doi: 10.1111/gcb.12179.
- Mastrandrea, M.D., Field, C.B., Stocker, T.F., Edenhofer, O., Ebi, K.L., Frame, D.J., Held, H., Kriegler, E., Mach, K.J., Matschoss, P.R., Plattner, G.-K., Yohe, G.W., Zwiers, F.W., 2010. *Guidance Note for Lead Authors of the IPCC Fifth Assessment Report on Consistent Treatment of Uncertainties*. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Disponible à l'adresse suivante : www.ipcc.ch.
- Hönisch, B., Ridgwell, A., Schmidt, D.N., Thomas, E., Gibbs, S.J., Sluijs, A., Zeebe, R., Martindale, R.C., Greene, S.E., Kiessling, W., Ries, J., Zachos, J.C., Royer, D.L., Barker, S., Marchitto Jr., T.M., Moyer, R., Pelejero, C., Ziveri, P., Foster, G.L., Williams, B., 2012. The geological record of ocean acidification. *Science* 335(6072):1058-1063, doi:10.1126/science.1208277.

32. Ridgwell, A., Schmidt, D.N., 2010. Past constraints on the vulnerability of marine calcifiers to massive carbon dioxide release. *Nature Geoscience* 3:196–200, doi:10.1038/ngeo755.
33. Joos, F., Frölicher, T.L., Steinacher, M., Plattner, G.-K., 2011. Impact of climate change on ocean acidification projections. In Gattuso, J.-P., Hansson, L. (eds.), *Ocean Acidification*. Oxford University Press, 326 pp.
34. GLOBALVIEW-CO₂: Projet coopératif d'intégration de données atmosphériques - Dioxyde de carbone. NOAA ESRL, Boulder, Colorado [Disponible à l'adresse suivante : www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/globalview/], 2012.
35. Bednarsek, N., Tarling, G.A., Bakker, D.C.E., Fielding, S., Jones, E.M., Venables, H.J., Ward, P., Kuzirian, A., Leze, B., Feely, R.A., Murphy, E.J., 2012. Extensive dissolution of live pteropods in the Southern Ocean. *Nature Geoscience* 5(12):881–885, doi:10.1038/ngeo1635.
36. Armstrong, J.L., Boldt, J.L., Cross, A.D., Moss, J.H., Davis, N.D., Myers, K.W., Walker, R.V., Beauchamp, D.A., Haldorson, L.J., 2005. Distribution, size, and interannual, seasonal and diel food habits of northern Gulf of Alaska juvenile pink salmon, *Oncorhynchus gorbuscha*. *Deep-Sea Research (Part II, Topical Studies in Oceanography)* 52:247–265.
37. Fabricius, K.E., Langdon, C., Uthicke, S., Humphrey, C., Noonan, S., De'ath, G., Okazaki, R., Muehllehner, N., Glas, M.S., Lough, J.M., 2011. Losers and winners in coral reefs acclimatized to elevated carbon dioxide concentrations. *Nature Climate Change* 1(3):165–169, doi:10.1038/nclimate1122.
38. Silverman, J., Lazar, B., Cao, L., Caldeira, K., Erez, J., 2009. Coral reefs may start dissolving when atmospheric CO₂ doubles. *Geophysical Research Letters* 36:L05606, doi:10.1029/2008GL036282.
39. Guinotte, J.M., Orr, J., Cairns, S., Freiwald, A., Morgan, L., George R., 2006. Will human-induced changes in seawater chemistry alter the distribution of deep-sea scleractinian corals? *Frontiers in Ecology and the Environment* 4:141–146.
40. Form, A., Riebesell, U., 2012. Acclimation to ocean acidification during long-term CO₂ exposure in the cold-water coral *Lophelia pertusa*. *Global Change Biology* 18:843–853.
41. Lunden, J., Georgian, S.E., Cordes, E.E., 2013. Aragonite saturation states at coldwater coral reefs structured by *Lophelia pertusa* in the northern Gulf of Mexico. *Limnology and Oceanography* 58(1):354–362.
42. Roberts, J.M., Wheeler, A.J., Freiwald, A., 2006. Reefs of the deep: The biology and geology of cold-water coral ecosystems. *Science* 213:543–547.
43. McCulloch, M., Falter, J., Trotter, J., Montagna, P., 2012. Coral resilience to ocean acidification and global warming through pH up-regulation. *Nature Climate Change* 2:623–627, doi:10.1038/nclimate1473.
44. Kleypas, J.A., McManus, J.W., Meñez, L.A.B., 1999. Environmental limits to coral reef development: where do we draw the line? *American Zoologist* 39(1):146–159.
45. Feely, R.A., Sabine, C.L., Hernandez-Ayon, J.M., Ianson, D., Hales, B., 2008. Evidence for upwelling of corrosive "acidified" water onto the Continental Shelf. *Science* 320(5882):1490–1492, doi:10.1126/science.1155676.
46. Fabry, V.J., Seibel, B.A., Feely, R.A., Orr, J.C., 2008. Impacts of ocean acidification on marine fauna and ecosystem processes. *ICES Journal of Marine Science* 65:414–432.
47. Pörtner, H.-O., 2012. Integrating climate-related stressor effects on marine organisms: unifying principles linking molecule to ecosystem-level changes. *Marine Ecology Progress Series* 470:273–290.
48. Baumann, H., Talmage, S.C., Gobler, C.J., 2012. Reduced early life growth and survival in a fish in direct response to increased carbon dioxide. *Nature Climate Change* 2(1):38–41.
49. Munday, P.L., Dixson, D.L., Donelson, J.M., Jones, G.P., Pratchett, M.S., Devitsina, G.V., Døving, K.B., 2009. Ocean acidification impairs olfactory discrimination and homing ability of a marine fish. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106(6):1848–1852.
50. Riebesell, U., Tortell, P.D., 2011. Effects of ocean acidification on pelagic organisms and ecosystems. In Gattuso, J.-P., Hansson, L. (eds.), *Ocean Acidification*. Oxford University Press, p. 99–121.
51. Hall-Spencer, J.M., Rodolfo-Metalpa, R., Martin, S., Ransome, E., Fine, M., Turner, S.M., Rowley, S.J., Tedesco, D., Buia, M.-C., 2008. Volcanic carbon dioxide vents show ecosystem effects of ocean acidification. *Nature* 454:96–99.
52. Harvey, B.P., Gwynn-Jones, D., Moore, P.J., 2013. Meta-analysis reveals complex marine biological responses to the interactive effects of ocean acidification and warming. *Ecology and Evolution* 3:1016–1030.
53. Hoegh-Guldberg, O., 1999. Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs. *Marine and Freshwater Research* 50:839–866.
54. Gattuso, J.-P., Bijma, J., Gehlen, M., Riebesell, U., Turley, C., 2011. Ocean acidification: knowns, unknowns and perspectives. In Gattuso, J.-P., Hansson, L. (eds.), *Ocean Acidification*. Oxford University Press, 326 pp.
55. Lohbeck, K.T., Riebesell, U., Reusch, T.B.H., 2012. Adaptive evolution of a key phytoplankton species to ocean acidification. *Nature Geoscience* 5:346–351, doi:10.1038/NNGEO1441aa.
56. Pörtner, H.O., Farrell, A.P., 2008. Physiology and climate change. *Science* 322:690–692.
57. Gruber, N., 2011. Warming up, turning sour, losing breath: ocean biogeochemistry under global change. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 369(1943):1980–1996, doi:10.1098/rsta.2011.0003.
58. Gao, K., Helbling, E.W., Häder, D.-P., Hutchins, D.A., 2012. Response of marine primary producers to interactions between ocean acidification, solar radiation and warming. *Marine Ecology Progress Series* 470:167–189, doi:10.3354/meps10043.
59. Riebesell, U., Gattuso, J.-P., Thingstad, T.F., Middelburg, J.J., 2013. Arctic ocean acidification: pelagic ecosystem and biogeochemical responses during a mesocosm study. *Biogeosciences* 10:5619–5626.



L'Océan dans un monde avec un taux élevé de CO₂

Nous tenons à remercier les organismes suivants pour leur soutien financier et en nature au symposium :

L'U.S. National Science Foundation

La Fondation Prince Albert II de Monaco

L'Institut de recherche de l'aquarium de la Baie de Monterey

L'aquarium de la Baie de Monterey

La Fondation du sanctuaire marin national de la Baie de Monterey

La Naval Postgraduate School

L'Union internationale pour la conservation de la nature

La Commission mondiale des aires protégées

COMPASS

Le Programme de recherche sur l'acidification des océans du Royaume-Uni

La Fondation Gordon et Betty Moore

La National Oceanic and Atmospheric Administration des États-Unis d'Amérique

Les sanctuaires marins nationaux des États-Unis d'Amérique

Le Festival du film Blue Ocean

Google

X-Prize

Parrains du symposium



Comité scientifique de
la recherche océanique



Commission
océanographique
intergouvernementale
de l'UNESCO

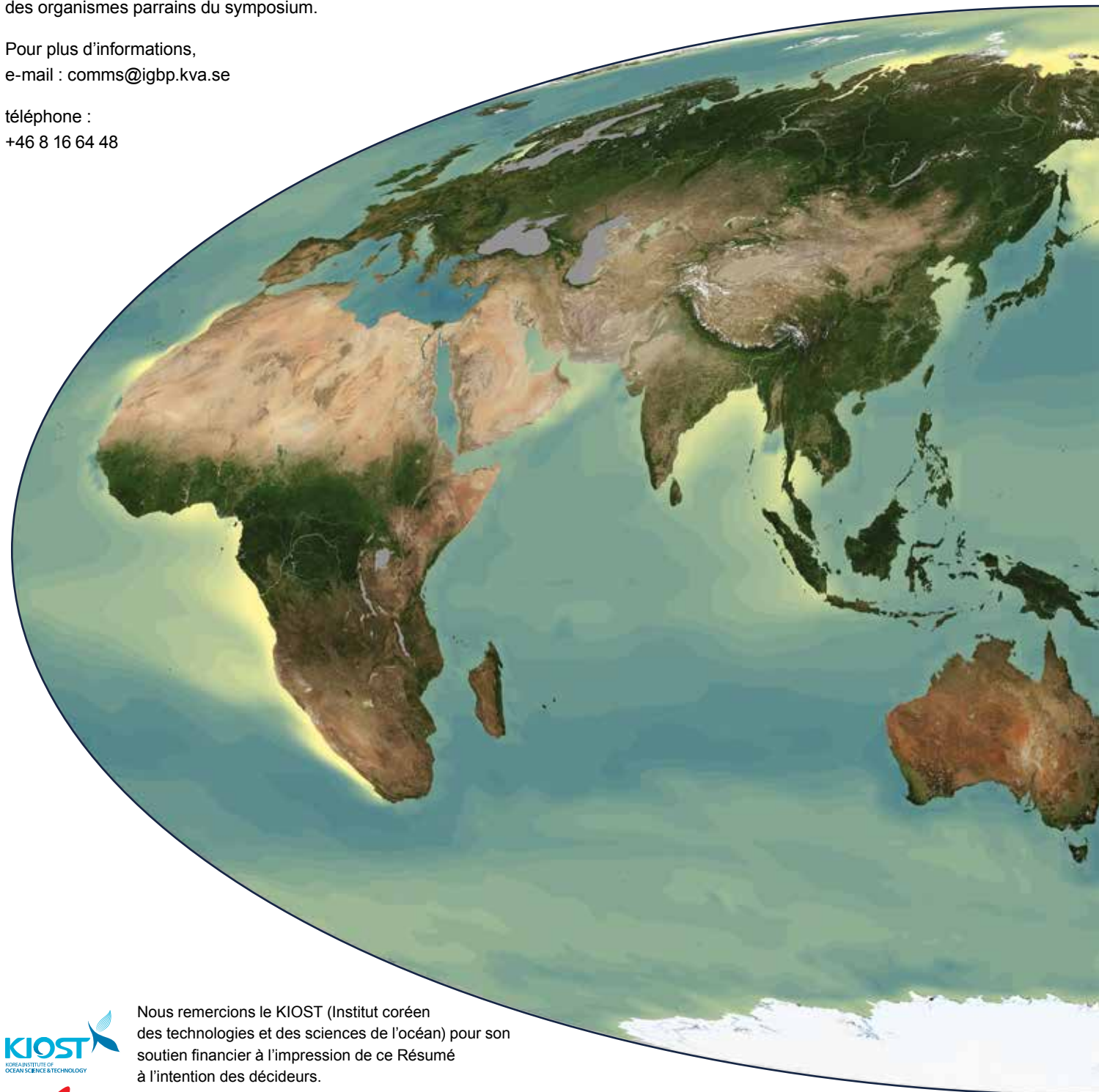


Programme international
sur la géosphère
et la biosphère

Cette version longue du résumé à l'intention des décideurs est disponible à l'adresse www.ocean-acidification.net et sur les sites Web respectifs des organismes parrains du symposium.

Pour plus d'informations,
e-mail : comms@igbp.kva.se

téléphone :
+46 8 16 64 48



Nous remercions le KIOST (Institut coréen des technologies et des sciences de l'océan) pour son soutien financier à l'impression de ce Résumé à l'intention des décideurs.



Ce document a été produit avec le soutien financier de la Fondation Prince Albert II de Monaco. Le contenu de ce document relève de la seule responsabilité du PIGB, du SCOR et de la COI et ne peut en aucun cas être considéré comme reflétant la position de la Fondation Prince Albert II de Monaco.