



ENJEUX SCIENCES

L'ACIDIFICATION DES OCÉANS

QUELS EFFETS ?
QUELLES SOLUTIONS ?

FABRICE PERNET ET FRÉDÉRIC GAZEAU

éditions
Quæ

L'ACIDIFICATION
DES OCÉANS
QUELS EFFETS ?
QUELLES SOLUTIONS ?

FABRICE PERNET, FRÉDÉRIC GAZEAU

Collection Enjeux sciences

Les grands lacs

À l'épreuve de l'Anthropocène

Jean-Marcel Dorioz, Orlane Anneville, Isabelle Domaizon, Chloé Goulon,

Jean Guillard, Stéphan Jacquet, Bernard Montuelle, Serena Rasconi,

Viet Tran-Khac, Jean-Philippe Jenny

2023, 144 p.

Les virus marins

Simple parasites ou acteurs majeurs des écosystèmes aquatiques ?

Stéphan Jacquet, Anne-Claire Baudoux, Yves Desdevises,

Soizick F. Le Guyader

2023, 110 p.

Le moustique,

Ennemi public n° 1 ?

Sylvie Lecollinet, Didier Fontenille, Nonito Pagès, Anna-Bella Failloux

2022, 168 p.

Feux de végétation

Comprendre leur diversité et leur évolution

Thomas Curt, Christelle Hély, Renaud Barbero, Jean-Luc Dupuy,

Florent Mouillot, Julien Ruffault

2022, 136 p.

L'édition de cet ouvrage a bénéficié du soutien financier de l'Ifremer
pour en permettre une diffusion large et ouverte.

Cet ouvrage est diffusé sous licence CC-by-NC-ND 4.0.

Éditions Quæ

RD 10

78026 Versailles Cedex

www.quae.com

www.quae-open.com

© Éditions Quæ, 2024

ISBN papier : 978-2-7592-3781-4

ISBN PDF : 978-2-7592-3782-1

ISBN epub : 978-2-7592-3783-8

ISSN : 2267-3032

Pour citer cet ouvrage : Pernet F., Gazeau F., 2024. *L'acidification des océans :
quels effets ? quelles solutions ?*, Versailles : Éditions Quæ, 124 p.

*Toutes les références numériques et liens hypertextes mentionnés dans cet
ouvrage ont été vérifiés et étaient actifs à la date du 09 octobre 2023.*

Sommaire

Introduction	
Pourquoi un ouvrage sur l'acidification des océans ?	5
Qu'est-ce que l'acidification des océans ?	7
Des machines, des combustibles fossiles et des hommes	8
L'effet de serre et le CO ₂	8
Chauffe, Marcel !	11
Le devenir du CO ₂	11
Depuis quand parle-t-on d'acidification des océans ?	16
L'acidité, tout court !	16
Comment mesure-t-on le pH ?	17
Comment mesure-t-on les autres paramètres de la chimie des carbonates ?	18
Surveillance du pH et émergence du terme d'acidification des océans	19
La prise de conscience scientifique	20
La prise de conscience publique	21
Comment l'acidité des océans évolue-t-elle ?	22
Quelle est l'ampleur de la baisse du pH depuis la révolution industrielle ?	22
Quelles valeurs de pH attend-on à l'horizon 2100 ?	22
L'océan a-t-il déjà été acidifié ?	25
La période actuelle a-t-elle un équivalent dans le passé géologique ?	31
L'acidification des océans est-elle un phénomène homogène à l'échelle de l'océan global ?	33
Comment le pH et les paramètres des carbonates varient-ils dans l'océan ?	34
Quelles sont les variations du pH dans le temps ?	38
Comment a évolué le pH dans les différentes régions de l'océan ?	39
Comment va évoluer le pH dans les différentes régions de l'océan ?	40
Quels sont les impacts biologiques de l'acidification ?	42
Impacts physiologiques d'un enrichissement en CO ₂	42
Tolérance des animaux à un enrichissement en CO ₂	43
Impacts de l'acidification des océans sur les organismes calcifiants	45
Les stades larvaires plus sensibles que les juvéniles et les adultes	50
Impacts sur le comportement	51
Des réponses contrastées selon les espèces	52
Les organismes photosynthétiques, pas forcément gagnants dans un monde riche en CO ₂	55



Comment les organismes compensent-ils les effets de l'acidification et à quel coût ?	56
Les organismes marins peuvent-ils « s'adapter » à l'acidification ? ..	59
Qu'est-ce que l'adaptation ?	59
Acclimatation <i>versus</i> adaptation	60
L'adaptation est possible ; c'est une question de temps !	62
Comment étudier la plasticité et l'adaptation des organismes marins à l'acidification des océans ?	63
Pouvons-nous « promouvoir » l'adaptation évolutive ?	67
Comment l'acidification des océans nous affecte-t-elle ?	69
Notions de services écosystémiques	69
L'exploitation des ressources marines	70
Aurons-nous des huîtres en 2100 ?	78
Comment l'acidification interagit-elle avec les autres facteurs du dérèglement climatique ?	79
Tout bouge !	79
L'océan en surchauffé	79
La température gouverne la distribution des espèces	80
Courage, fuyons !	82
Les canicules marines	83
Je respire, donc je suis !	85
En quoi le réchauffement et la désoxygénation des océans sont-ils liés ?	87
Quelques effets de l'appauvrissement en oxygène	88
Acidification, réchauffement et désoxygénation : un trio mortel ?	89
Comment agir ?	94
Atténuation <i>versus</i> adaptation	94
Baisser nos émissions de gaz à effet de serre	94
De la main verte à la main bleue : végétaliser les océans	95
Renforcer l'alcalinité des océans	100
Les limites de la connaissance	104
Quelles perspectives ?	105
Renforcer l'observation	105
Élargir les échelles d'expérimentation	107
Évaluer et mettre en œuvre les stratégies d'atténuation et d'adaptation : le chantier du siècle	108
Protection, conservation et restauration : des mesures de lutte sans regret fondée sur la nature	109
Remerciements	110
Sigles et acronymes	111
Références bibliographiques	112

Introduction

Pourquoi un ouvrage sur l'acidification des océans ?

Le dérèglement climatique d'origine humaine est aujourd'hui un fait avéré, qui ne fait plus de doute dans la communauté scientifique. Vagues de chaleur et canicules à répétition, sécheresses et inondations, tempêtes et ouragans de puissance sans précédent, sont des manifestations actuelles de ce changement climatique en cours, où les événements exceptionnels deviennent de plus en plus fréquents. La combustion croissante de composés d'origine fossile, tels que le charbon, le gaz et le pétrole, ainsi que la déforestation au profit de l'agriculture ou de l'urbanisation, ont pour effet d'accroître la concentration en gaz à effet de serre dans l'atmosphère et ainsi de réchauffer la planète. Parmi les gaz à effet de serre issus de cette combustion, le dioxyde de carbone (CO_2) est, de loin, le plus abondant.

Le dérèglement climatique n'est pas l'unique conséquence de l'augmentation de la concentration de CO_2 atmosphérique. En effet, celui-ci est en partie absorbé par les océans où il se transforme en acide carbonique et provoque « l'acidification des océans ». Ce phénomène a véritablement émergé dans la littérature scientifique au début des années 2000, au point de devenir l'un des sujets les plus étudiés des sciences marines ces vingt dernières années. De par ses effets sur la chimie de l'eau, l'acidification des océans a des conséquences multiples sur le monde marin et ses habitants, et, par conséquent, sur les ressources biologiques dont nous dépendons pour vivre.

Toutefois, l'acidification des océans, souvent définie comme « l'autre problème du CO_2 » en référence au réchauffement, reste très peu connue du grand public. Les rares fois où les médias évoquent ce phénomène, c'est pour savoir si nous continuerons à consommer des huîtres en 2100 ! Même si cette question est pertinente car elle suggère que ces animaux sont



sensibles à l'acidification, elle mérite être considérablement élargie. Autrement dit, l'idée est d'appréhender non seulement le monde *dont on vit* mais aussi celui *où l'on vit* afin de faire face avec lucidité et pragmatisme au nouveau régime climatique¹.

L'objectif de cet ouvrage est d'envisager l'acidification des océans dans sa globalité en répondant à dix questions simples. Ainsi seront passés en revue : les fondements biogéochimiques de l'acidification ; les évolutions passées, en cours et à venir ; les impacts sur les organismes, sur les écosystèmes marins et sur l'homme ; enfin seront abordées les possibilités de remédiation et les perspectives scientifiques.

La problématique de l'acidification des océans est transdisciplinaire et trouve ses réponses dans la biogéochimie, la biologie et l'écologie marine, l'évolution, l'aquaculture et l'halieutique, ainsi que dans l'économie et la sociologie. Puisse cet ouvrage rendre accessible au plus grand nombre l'ampleur de ce phénomène méconnu et pourtant essentiel à la compréhension des changements à venir.

1. *Mémo sur la nouvelle classe écologique*, de Bruno Latour et Nikolaj Schultz (La Découverte, coll. Les Empêcheurs de penser en rond, 96 p.).



QU'EST-CE QUE L'ACIDIFICATION DES OCÉANS ?

L'influence de l'homme sur l'environnement est une réalité qui remonte à l'origine des hominidés, il y a près de 3 millions d'années. Les activités de chasse des chasseurs-cueilleurs du Paléolithique ont entraîné la disparition de nombreuses espèces animales. Parmi les exemples les plus emblématiques figurent les extinctions de la mégafaune de la dernière période glaciaire, allant du mammoth laineux du nord de l'Eurasie aux wombats géants d'Australie.

L'avènement de la sédentarisation et de l'agriculture il y a 10 000 à 12 000 ans renforce l'influence de l'homme sur son environnement. Pendant cette période, l'homme intensifie l'exploitation des ressources naturelles et transforme les paysages par le défrichement des forêts et le développement de l'irrigation. Toutefois, les humains préindustriels n'avaient pas la capacité technologique ou organisationnelle nécessaire pour rivaliser ou dominer les grandes forces de la nature. Leurs impacts sont restés largement locaux et transitoires, bien dans les limites de la variabilité naturelle de l'environnement (Steffen *et al.*, 2007).

À partir du XVIII^e siècle, l'industrialisation a fait de l'humanité une véritable force géologique et morphologique, comme l'ont reconnu très tôt un certain nombre de scientifiques. Par exemple, Stoppani en 1873 considérait les activités humaines comme « une nouvelle force tellurique dont la puissance et l'universalité peuvent être comparées aux plus grandes forces de la Terre » (cité par Steffen *et al.*, 2007). Stoppani parlait déjà de l'ère dite « anthropozoïque ». Pourtant, il faudra attendre les années 2000 pour voir apparaître le terme « Anthropocène » en référence à l'époque géologique actuelle marquée par le rôle central de l'humanité sur les grands cycles biogéochimiques des éléments (Crutzen et Stoermer, 2000).

Dans ce chapitre, nous verrons comment la découverte et l'exploitation de vastes quantités d'énergie carbonée enfouies dans le sous-sol terrestre ont induit des transformations profondes au



sein des sociétés humaines, ayant des conséquences majeures sur le cycle du carbone, le climat de la Terre et la chimie de l'océan.

DES MACHINES, DES COMBUSTIBLES FOSSILES ET DES HOMMES

Depuis la révolution industrielle, dont l'origine correspond globalement à l'invention du moteur à explosion par James Watt en 1758, le nombre d'êtres humains peuplant la Terre et leur niveau de richesses a augmenté de façon exponentielle (Steffen *et al.*, 2015). L'utilisation de machines de plus en plus sophistiquées et performantes a décuplé la capacité des êtres humains à produire des biens, à communiquer et à se déplacer, permettant l'émergence de la société de consommation que nous connaissons aujourd'hui.

La prolifération des machines et la généralisation de leur activité à tous les secteurs de production – agriculture, industrie et service – ont été rendues possibles grâce à la découverte de sources d'énergie abondantes et gratuites que sont les combustibles fossiles : charbon, gaz et pétrole. Ces ressources énergétiques naturelles, non renouvelables à nos échelles de temps, ont été formées à partir de plantes et d'animaux ayant vécu il y a plusieurs centaines de millions d'années. Les combustibles fossiles sont des composés riches en carbone qui libèrent une quantité extraordinaire d'énergie lorsqu'ils sont brûlés, en plus du dioxyde de carbone, le fameux « gaz carbonique » ou « CO₂ », que nous connaissons tous.

Ce CO₂ naturellement présent dans l'atmosphère est inerte chimiquement, c'est-à-dire qu'il ne peut pas se dégrader ou réagir avec d'autres composés pour se transformer. Par conséquent, le CO₂ formé par la combustion d'énergies fossiles nécessaire pour soutenir les activités humaines s'accumule dans l'atmosphère ou s'échange avec les autres compartiments de la planète que sont la terre et les océans.

L'EFFET DE SERRE ET LE CO₂

Le soleil émet de l'énergie en permanence sous forme de lumière visible et de rayons ultraviolets. Une partie de cette énergie est

absorbée par la surface terrestre, ce qui produit de la chaleur. La Terre réémet cette chaleur sous forme de rayonnement infrarouge. Certains gaz atmosphériques, appelés gaz à effet de serre, tels que la vapeur d'eau, le CO_2 , le méthane (CH_4), le protoxyde d'azote (N_2O) et l'ozone (O_3), absorbent une partie du rayonnement infrarouge. L'absorption du rayonnement infrarouge par ces gaz atmosphériques a pour effet de piéger la chaleur dans l'atmosphère et d'augmenter la température de la planète : c'est l'effet de serre. Sans effet de serre, la température moyenne du globe serait de $-18\text{ }^\circ\text{C}$ au lieu de $15\text{ }^\circ\text{C}$ aujourd'hui.

Les activités humaines produisent d'importantes quantités de gaz à effet de serre, principalement sous forme CO_2 , ce qui augmente la quantité de chaleur à la surface de la Terre et provoque le dérèglement climatique. Malgré la volonté affichée des gouvernements, les émissions de CO_2 sont en augmentation soutenue depuis des décennies, passant de 2 milliards de tonnes de CO_2 en 1900, à 6 milliards en 1950 et à plus de 37 milliards en 2022, soit une multiplication par 20 en un peu plus d'un siècle². Nos émissions de gaz à effet de serre n'ont jamais diminué d'une année sur l'autre depuis les vingt dernières années, sauf à l'occasion de la crise financière de 2008 et de la pandémie de COVID-19 en 2020.

Avant l'ère industrielle, la concentration de CO_2 dans l'atmosphère était d'environ 280 parties par million (ppm), soit 0,028 % des gaz contenus dans l'atmosphère. Depuis lors, elle a dépassé 400 ppm en 2013. La concentration en CO_2 dans l'atmosphère est actuellement suivie sur de nombreux sites à l'échelle mondiale, mais une série de mesures démarrée dans les années 1950 sur le volcan Mauna Loa à Hawaï aux États-Unis fait office de référence (figure 1). Au moment d'écrire ces quelques lignes (août 2023), la concentration en CO_2 sur ce site est de 419,68 ppm³.

L'analyse de la composition de carottes de glace extraites de la calotte polaire de l'Antarctique fournit des informations sur le climat et la composition de l'atmosphère des temps passés jusqu'à

2. https://robbieandrew.github.io/GCB2022/PNG/s11_2022_FossilFuel_and_Cement_emissions_1990.png

3. <https://keelingcurve.ucsd.edu>

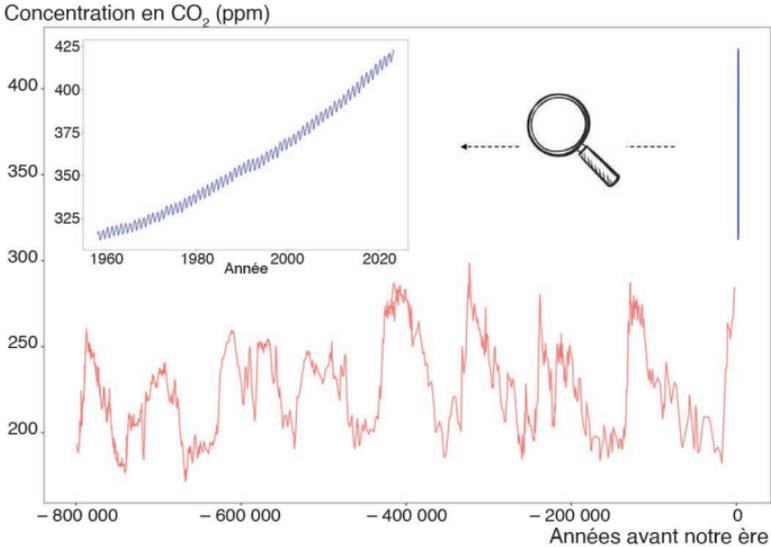


Figure 1. Évolution de la concentration en CO_2 dans l'atmosphère depuis 800 000 ans.

Les concentrations en CO_2 sont soit estimées à partir de l'analyse de bulles d'air emprisonnées dans de la glace prélevée en Antarctique (en rouge ; <https://www.ncei.noaa.gov/access/paleo-search/study/17975>), soit mesurées depuis la fin des années 1950 au volcan Mauna Loa à Hawaï (en bleu, sur la droite et agrandies sur le graphique inséré à gauche : <https://keelingcurve.ucsd.edu>).

environ 800 000 ans (figure 1 ; Lüthi *et al.*, 2008). L'analyse de la concentration en CO_2 dans les bulles d'air emprisonnées dans ces carottes de glace à différentes profondeurs (jusqu'à 3 600 m) permet en effet d'évaluer la concentration atmosphérique au moment de la formation de ces glaces plus ou moins vieilles, et de remonter ainsi dans le temps (figure 1). Ces archives glaciaires du climat indiquent que les concentrations de CO_2 ont varié périodiquement entre environ 180 et 280 ppm, correspondant respectivement à des épisodes glaciaires et interglaciaires. Ces analyses montrent, par ailleurs, que les concentrations de CO_2 atmosphérique actuelles et leur taux d'augmentation depuis 1950 sont sans précédent historique.

CHAUFFE, MARCEL !

L'augmentation de la température de surface du globe observée depuis des décennies ne laisse plus véritablement de place au doute. Selon l'Organisation météorologique mondiale, chaque décennie est plus chaude que la précédente depuis les années 1980. La température moyenne sur la planète en 2022 était supérieure d'environ 1,15 °C à sa valeur préindustrielle (période comprise entre 1850 et 1900), et les huit dernières années (2015-2022) sont les plus chaudes jamais enregistrées dans le monde⁴. Bien qu'il soit toujours difficile d'établir des liens de causes à effets, le Groupe intergouvernemental d'experts sur le climat (GIEC, IPCC en anglais) réitère de manière univoque dans son dernier rapport de synthèse que le réchauffement climatique est bien causé par les émissions de gaz à effet de serre liées aux activités humaines (IPCC, 2023). Les médias s'étant largement approprié le sujet ces dernières années, il en résulte une prise de conscience collective du phénomène et de ses conséquences.

LE DEVENIR DU CO₂

Plus de la moitié du CO₂ émis dans l'atmosphère par les activités humaines est captée par les compartiments terrestres et océaniques, ce qui limite considérablement l'augmentation de l'effet de serre et le réchauffement planétaire. Les végétaux terrestres consomment du CO₂ pour former de la matière organique à partir de l'énergie fournie par le rayonnement solaire et libèrent de l'oxygène. C'est le processus de photosynthèse. Le Global Carbon Project⁵, qui évalue chaque année les émissions anthropiques de CO₂ et leur redistribution, estime que la biosphère terrestre a capté environ 12,8 milliards de tonnes de CO₂, soit 31,4 % des émissions liées aux activités humaines en 2021 (Friedlingstein *et al.*, 2022).

D'autre part, environ 25 % du CO₂ atmosphérique se dissout dans l'eau de mer et se retrouve exporté vers les profondeurs grâce à

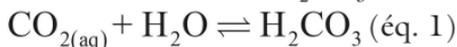
4. Communiqué de presse du 12 janvier 2023, disponible sur le site de l'OMM.

5. <https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/>

des processus biologiques et physiques. À la surface de l'océan, le CO_2 dissous est capté par le phytoplancton et transformé en matière organique qui finit par couler vers les couches profondes, loin de l'atmosphère. D'autre part, le CO_2 dissous est transporté par les courants de la surface vers le fond grâce à la circulation thermohaline, qui brasse les eaux à l'échelle du globe, à la surface et dans les grandes profondeurs. La circulation thermohaline est engendrée par les différences de densité de l'eau de mer dépendant de la température et de la salinité, d'où le terme de « *thermo* » pour température et « *halin* » pour salinité. Aux hautes latitudes de l'hémisphère Nord, l'eau de surface se refroidit, ce qui augmente sa densité. Cette eau devenue plus dense, donc plus lourde que les couches inférieures, plonge vers les profondeurs, entraînant avec elle le CO_2 qu'elle a échangé avec l'atmosphère en surface. Le CO_2 ainsi exporté vers le fond poursuit sa route dans les couches profondes de l'océan vers le Sud suivant la circulation thermohaline, et se retrouve temporairement soustrait des échanges avec l'atmosphère. On estime qu'il faut environ 1 000 à 1 500 ans pour qu'une molécule d'eau boucle ce circuit en entier. Par conséquent, ces eaux finissent par remonter en surface et échanger le CO_2 avec l'atmosphère. En attendant, la pompe à carbone océanique a ainsi permis de stocker environ 10,5 milliards de tonnes de CO_2 , soit 26,2 % de nos émissions en 2021 (Friedlingstein *et al.*, 2022).

Lorsque le CO_2 se dissout dans l'eau de mer, c'est toute la chimie du carbone inorganique dissous qui est altérée. Le carbone inorganique dissous, ou DIC pour « *dissolved inorganic carbon* » comprend le CO_2 , les ions bicarbonate (HCO_3^-) et les ions carbonate (CO_3^{2-}). Les réactions chimiques qui découlent de la dissolution du CO_2 sont relativement complexes et seront seulement brièvement décrites ici (pour plus d'information, voir Zeebe et Wolf-Gladrow, 2001).

Une partie du CO_2 absorbé par l'océan réagit avec l'eau (H_2O) pour former de l'acide carbonique (H_2CO_3), suivant la réaction :



L'acide carbonique est instable dans l'eau et se dissocie rapidement en ions hydrogène (ou protons H^+) et en ions bicarbonate (HCO_3^-) :



Une partie des protons libérés par l'acide carbonique peut réagir avec les ions carbonate (CO_3^{2-}) pour former à nouveau des ions bicarbonate :



Comme la production d'ions hydrogène entraîne une augmentation de l'acidité, la conséquence de l'absorption du CO_2 anthropogénique par les océans a été nommée « acidification des océans ».

Le pH, ou potentiel hydrogène, est la mesure de l'acidité sur une échelle comprise entre 0 et 14, calculée à partir de la concentration en protons ($\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$). L'échelle de mesure du pH est logarithmique, c'est-à-dire qu'un écart d'une unité indique une division ou une multiplication de la concentration en protons par dix. Un liquide est qualifié d'acide ou de basique lorsque le pH est respectivement inférieur ou supérieur à 7, la valeur de pH dite neutre qui caractérise l'eau pure. L'océan de surface est légèrement basique avec un pH moyen de 8,1. La diminution projetée dans les siècles à venir n'entraînera pas l'océan de surface en dessous de la neutralité. L'océan ne deviendra pas acide à proprement parler, il ne se transformera pas en jus de citron ! L'acidification des océans consiste en un déplacement du pH vers le pôle acide sans pour autant l'atteindre.

Les équations précédentes montrent bien que l'absorption du CO_2 par les océans ne se résume pas à une simple augmentation de son acidité. Tout d'abord, l'ajout de CO_2 conduit à une augmentation de la concentration de carbone inorganique dissous. D'autre part, il s'ensuit une augmentation des ions bicarbonate et une baisse des ions carbonate. Ces changements sont illustrés sur la figure 2 qui représente les proportions relatives de chaque espèce moléculaire de carbone inorganique dissous en fonction du pH. À la surface de l'océan, le carbone inorganique dissous est composé à 87,6 % d'ions bicarbonate, 11,9 % d'ions carbonate et 0,5 % de CO_2 à une température de 25 °C, une salinité de 35 et un niveau de pH de 8,1. Lorsque le pH diminue – l'acidité augmente –, cet équilibre se déplace vers la gauche du graphique, avec plus d'ions bicarbonate, plus de CO_2 , et moins d'ions carbonate.

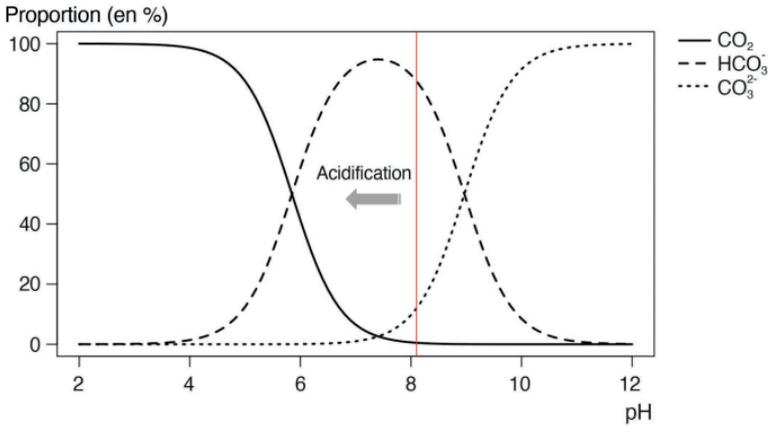


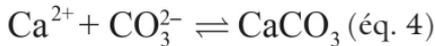
Figure 2. Graphique Bjerrum montrant la contribution relative du dioxyde de carbone (CO_2), des ions bicarbonate (HCO_3^-) et des ions carbonate (CO_3^{2-}) au carbone inorganique dissous (DIC) contenu dans l'eau de mer, en fonction du pH.

La ligne verticale rouge représente le pH moyen de l'océan de surface actuel.

Dans cet exemple, la température est fixée à 15 °C et la salinité à 35.

Le graphique a été réalisé à partir de la fonction Bjerrum du package R « seacarb » (Gattuso et al., 2023).

Toutes ces modifications de la chimie de l'eau de mer ont des répercussions sur les organismes marins que nous détaillerons dans le chapitre 5. En particulier, la baisse des ions carbonate est problématique pour les organismes calcifiants, tels que les coraux et les mollusques qui utilisent ce composé avec le calcium (Ca^{2+}) pour produire le carbonate de calcium (CaCO_3 ou calcaire), l'élément constitutif de leur coquille ou squelette. Ce processus appelé « calcification » ou « biominéralisation » se résume à l'équation chimique suivante :



Compte tenu de l'équilibre existant entre les différentes espèces de carbone inorganique dissous dans l'eau de mer, l'équation bilan de la calcification et de son inverse, la dissolution, s'écrit de la manière suivante :



Ainsi, la calcification consomme des ions bicarbonate et produit du CO_2 alors que la dissolution du calcaire produit des ions bicarbonate et consomme du CO_2 . Ces modifications engendrées impliquent donc une diminution de pH lorsque la calcification est privilégiée et une augmentation lorsque la dissolution domine.

La capacité des organismes à précipiter du calcaire est dépendante du degré de saturation de l'eau de mer au regard du carbonate de calcium, appelé « taux de saturation » et exprimé par la lettre grecque oméga (Ω). Lorsque celui-ci est supérieur à 1, le carbonate de calcium a tendance à précipiter, c'est-à-dire à former une molécule solide. À l'inverse, lorsque le taux de saturation de l'eau est inférieur à 1, le carbonate de calcium tend à se dissoudre. L'état de saturation de l'eau de mer (Ω) se calcule à partir de l'équation suivante :

$$\Omega = \frac{[Ca^{2+}][CO_3^{2-}]}{[Ca^{2+}]_{sat}[CO_3^{2-}]_{sat}} \quad (\text{éq. 6})$$

L'état de saturation est donc défini comme le rapport entre les concentrations de calcium et d'ions carbonate observées et celles attendues lorsque la solution est à saturation (*sat*). Par conséquent, l'acidification des océans conduit à une baisse des taux de saturation, au point de favoriser dans certaines régions la dissolution des structures calcaires plutôt que leur précipitation.

Ainsi, l'absorption du CO_2 atmosphérique d'origine humaine par les océans entraîne une série de modifications chimiques englobées sous le terme d'« acidification des océans » avec des conséquences potentielles pour la vie marine. La prise de conscience de cet « autre problème du CO_2 » a été plus tardive que pour le réchauffement climatique.



DEPUIS QUAND PARLE-T-ON D'ACIDIFICATION DES OCÉANS ?

La découverte de l'acidification des océans est étroitement liée à la récente compréhension des principes chimiques de l'acidité et à la mise au point d'outils de mesure précis de ce paramètre.

L'ACIDITÉ, TOUT COURT !

La première théorie de l'acidité est à attribuer au chimiste français Antoine Lavoisier, qui à la fin du XVIII^e siècle définit un acide comme un composé contenant de l'oxygène. Cette théorie inexacte sera corrigée un siècle plus tard par Svante August Arrhenius, selon lequel un acide est une substance qui, lorsque mise en solution aqueuse, libère des ions hydrogène ou proton (H^+), alors qu'une base est une substance qui, lorsque mise en solution aqueuse, libère des ions hydroxyde (OH^-). Le chimiste suédois, récipiendaire du prix Nobel et par ailleurs précurseur de la compréhension de l'effet de serre, étendra le concept d'acidité au dioxyde de carbone (CO_2) qui forme de l'acide carbonique (H_2CO_3) en réagissant avec les molécules d'eau (éq. 1, chapitre 1, p. 12). Les travaux d'Arrhenius ont établi les bases de la compréhension du CO_2 en tant qu'acide et de son impact sur les équilibres chimiques dans divers systèmes aqueux, y compris l'eau de mer.

La notion de pH ou « potentiel hydrogène » a été introduite comme une mesure quantitative de l'acidité d'une solution en 1909 par le biochimiste Søren Peter Lauritz Sørensen. Les premières mesures du pH de l'eau de mer remontent à cette période. Néanmoins, ces mesures anciennes ne sont pas utilisables pour étudier des tendances d'acidification car elles sont trop rares et pas toujours fiables.

COMMENT MESURE-T-ON LE PH ?

Depuis le début du xx^e siècle, le pH de l'eau de mer est mesuré à l'aide d'électrodes en verre. Leur principe de fonctionnement repose sur la différence de concentration en ions oxonium (H_3O^+) existant de part et d'autre d'une membrane de verre très fine (environ 0,1 mm), qui génère un potentiel électrique, appelé « potentiel de membrane ». Celui-ci est proportionnel au pH de la solution aqueuse dans laquelle l'électrode est plongée. Cette technique de mesure, toujours utilisée de nos jours, plutôt dans le cadre d'études expérimentales en laboratoire, est associée à des incertitudes trop importantes (0,02 unité pH) pour permettre d'estimer des variations interannuelles de pH dans les océans qui sont de l'ordre de quelques millièmes d'unités pH.

Une méthode par spectrophotométrie⁶ utilisant un colorant spécifique, le pourpre de m-crésol, a été proposée pour la première fois en 1988 (Byrne *et al.*, 1988). La couleur de l'échantillon mélangé au m-crésol passe du jaune au violet lorsque le pH varie entre 7,4 et 9,0. La mesure du pH par spectrophotométrie est beaucoup plus précise que celle obtenue par les électrodes de verre et permet d'atteindre des incertitudes de l'ordre de 0,003 unité pH, rendant ainsi possible la quantification de la diminution du pH de l'océan en cours.

À partir des années 2000, des capteurs autonomes ont été développés pour être installés sur des bouées instrumentées dans l'océan et mesurer le pH à haute fréquence sans nécessiter de se rendre sur place et de prendre des échantillons à mesurer au laboratoire. Les capteurs ISFET (pour « *Ion-Sensitive Field Effect Transistor* ») utilisent un transistor à effet de champ sensible aux ions. Lorsque les protons H^+ se lient à la surface du transistor, ils modifient sa conductivité et génèrent un signal de pH. Une autre technique consiste à combiner un préleveur d'eau à une mesure

6. Un spectrophotomètre permet de déterminer la concentration d'une espèce chimique dans une solution (dans le cas du pH, les protons H^+). Pour ce faire, l'appareil mesure l'intensité de la lumière qui passe à travers un échantillon à une longueur d'onde donnée. Plus précisément, le spectrophotomètre mesure une absorbance, c'est-à-dire la part du rayonnement lumineux qui a été absorbée par l'échantillon. Plus l'absorbance est élevée, plus la concentration est forte.