



# L'océan

- **L'acidification des océans** **p. 2**
- **Les aspects physiques** – *Influence sur le climat, circulation et niveau de la mer* **p. 17**
- **L'exploitation de la biomasse** **p. 29**

## L'acidification des océans

Lina Hansson et Jean-Pierre Gattuso

Le programme américain *Ocean Carbon and Biogeochemistry* (OCB ; [www.us-ocb.org](http://www.us-ocb.org)), soutenu par le projet européen sur l'acidification des océans (EPOCA; <http://www.epoca-project.eu/>) et le programme anglais de recherche sur l'acidification des océans (<http://www.nerc.ac.uk/research/programmes/oceanacidification/>), ont dressé en 2010 une liste des questions les plus fréquemment posées (Foire Aux Questions, FAQ) sur le thème de l'acidification des océans. Ces questions ont été largement diffusées à la communauté scientifique afin d'apporter des réponses concises résumant les connaissances actuelles, tout en évitant le jargon scientifique. Les réponses ont ensuite été soumises à une procédure d'examen publique et à une révision par des pairs afin d'assurer une bonne lisibilité et limiter les pertes au niveau de la précision scientifique. La réponse de la communauté a été enthousiaste. Au total, 27 scientifiques de 19 institutions et 5 pays ont contribué à l'ensemble du processus.

FAQ originale : <http://www.epoca-project.eu/index.php/what-is-ocean-acidification/faq.html>

La présente fiche a été rédigée à partir de cette FAQ par Lina Hansson, l'Agence internationale de l'énergie atomique, et Jean-Pierre Gattuso, CNRS et université Paris VI. Une mise à jour a été effectuée en juin 2018.

### 1. Le phénomène d'acidification des océans

#### Qu'est-ce que l'acidification des océans ?

Les scientifiques ont observé, grâce à des enregistrements semi-continus, une augmentation de la concentration relative du CO<sub>2</sub> dans l'eau de mer au cours des 20-30 dernières années dans les océans Pacifique et Atlantique (en particulier à Hawaï, aux Bermudes et aux îles Canaries). Cette augmentation du dioxyde de carbone dissous entraîne une diminution du pH des océans (correspondant à une augmentation de la concentration en ions hydrogène). L'échelle de pH est logarithmique (pour chaque baisse d'1 unité pH, les concentrations en ions hydrogène augmentent d'un facteur 10). La diminution observée de 0,1 unité pH depuis le début de l'ère industrielle correspond à une augmentation d'environ 26% de la concentration des ions hydrogène dans l'océan. La valeur actuelle du pH océanique reste de l'ordre de 8, c'est-à-dire très supérieure à 7, valeur en dessous de laquelle l'océan ne peut être qualifié d'acide.

#### L'océan n'est donc pas acide, alors pourquoi parle-t-on d'acidification des océans ?

Le mot «acidification» fait référence à l'abaissement du pH à partir de n'importe quel point de départ vers tout point final sur l'échelle de pH. Ce terme est utilisé dans de nombreux autres

domaines scientifiques (dont la médecine et la science des aliments) pour se référer à l'ajout d'un acide dans une solution, indépendamment de la valeur du pH de la solution.

### **Qu'est-ce qui provoque ce phénomène d'acidification des océans ?**

L'acidification des océans est provoquée par la dissolution dans l'eau de mer d'une fraction du dioxyde de carbone relâché dans l'atmosphère, lors de l'utilisation des combustibles fossiles : charbon, pétrole et gaz et du brûlage des arbres abattus lors de déforestations.

### **Le terme acidification des océans n'est-il pas juste un autre nom pour le changement climatique ?**

Non. Il s'agit de deux phénomènes distincts ; bien que l'acidification des océans et le changement climatique partagent une origine commune. L'augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique qui provoque l'acidification des océans est également le principal responsable de « l'effet de serre » anthropique, cette absorption du rayonnement infrarouge par certains gaz émis par l'humanité, qui est la cause principale du changement climatique présent et futur. Les deux phénomènes interagissent : si une partie du CO<sub>2</sub> émis n'était pas absorbée par l'océan, sa concentration dans l'atmosphère serait plus forte et le changement climatique plus important. Cependant, cet effet diminue au fur et à mesure que la température et l'acidité de l'océan croissent.

### **Est-ce que le dégazage en CO<sub>2</sub> des océans, du fait de leur réchauffement, ne supprimera-t-il pas le problème ?**

La teneur en CO<sub>2</sub> des eaux de surface des océans répond à la fois aux variations de la teneur en CO<sub>2</sub> atmosphérique et aux changements de température. Par exemple, si la température des océans ne variait pas, un doublement du niveau préindustriel de CO<sub>2</sub> (de 280 à 560 ppm) entraînerait une augmentation de la quantité totale de carbone dissous dans l'océan de surface d'environ 2 002 à 2 131 micromoles/kg (en supposant que la salinité est de 35, la température de 15°C, et l'alcalinité de 2 300 micromoles/kg). En revanche, si la température des océans augmente de 2°C sur cette même période, alors moins de carbone est absorbé (l'augmentation de 2 002 à 2 117 micromoles/kg). Ainsi, une hausse de 2 °C des températures entrainera une baisse d'environ 10% de l'absorption du carbone par les eaux de surface. Le réchauffement des océans envisagé devrait également modifier la circulation océanique, réduisant encore davantage leur capacité à absorber le CO<sub>2</sub> atmosphérique, mais l'excès de CO<sub>2</sub> restera dans l'atmosphère et continuera d'acidifier les océans. Pour le pH, les effets nets du réchauffement climatique sur le CO<sub>2</sub> atmosphérique, la solubilité du CO<sub>2</sub> et la spéciation chimique s'annuleront pratiquement.

### **Est-ce que le CO<sub>2</sub> va vraiment faire diminuer le pH des océans tant que cela ?**

Si nous continuons selon les scénarios envisagés pour l'utilisation des combustibles fossiles et l'augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique, le pH sera susceptible de diminuer de 0,3 à 0,4 unités d'ici la fin du XXI<sup>e</sup> siècle et la concentration en ions hydrogène (ou l'acidité) d'augmenter de 100 à 150% par rapport à sa valeur à l'époque préindustrielle.

### **Si les calottes glaciaires fondent et que de l'eau douce est ajoutée à l'océan, cela ne diluera-t-il pas simplement l'acidité ?**

L'eau douce provenant de la fonte des calottes glaciaires dilue les concentrations des différents composants du système des carbonates dans l'eau de mer (comme décrit ci-dessus), ainsi que

l'alcalinité totale et la salinité (affectant toutes deux le pH). Par exemple, un litre d'eau de mer Arctique « typique » (température, 5°C ; salinité, 35; alcalinité totale, 2 244 micromoles/kg) qui est exposée à un niveau de CO<sub>2</sub> atmosphérique actuel de 390 ppm, a une teneur en carbone total de 2 100 micromoles/kg et un pH de 8,04 (échelle totale). L'ajout d'un kilogramme d'eau douce au kilogramme d'eau de mer entraînerait une dilution de la salinité, de l'alcalinité et de la teneur en carbone de la moitié de ce qu'ils étaient, et le pH initial augmenterait à 8,21. Toutefois, cette eau de mer n'est pas en équilibre avec l'atmosphère (elle a maintenant une pCO<sub>2</sub> de 151 ppm, tandis que le niveau de la pCO<sub>2</sub> de l'atmosphère est de 390 ppm), et par conséquent elle absorbera du CO<sub>2</sub> jusqu'à ce que la pCO<sub>2</sub> de l'eau de mer soit aussi égale à 390 ppm, ce qui a pour conséquence de diminuer le pH qui est alors de 7,83.

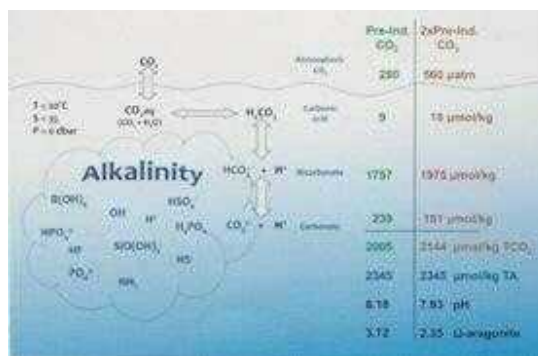
**Si la fonte des glaces et les apports détritiques aux océans augmentent, cela peut-il leur apporter de l'alcalinité et ainsi compenser l'acidification ?**

L'altération des roches continentales augmente l'alcalinité de l'eau de mer ainsi que sa capacité à compenser la baisse du pH. La neutralisation de tout le CO<sub>2</sub> lié à l'activité humaine qui pénètre dans les océans par ce mécanisme nécessiterait plusieurs centaines de milliers d'années. Par conséquent, à l'échelle de temps intéressant l'humanité (de la décennie à quelques siècles), ce processus n'est pas assez rapide pour atténuer de manière significative l'acidification des océans.

**Est-ce que la dissolution de tout le CO<sub>2</sub> produit en brûlant la totalité des réserves mondiales de combustibles fossiles, peut rendre les océans acides ?**

Non. La chimie fondamentale du système des carbonates océanique, incluant les minéraux de carbonate de calcium présents sur le plancher océanique qui peuvent se dissoudre lentement et aider à neutraliser une partie du CO<sub>2</sub>, empêche les océans de devenir acides à l'échelle globale. Cependant, les échelles de temps de ces phénomènes se mesurent en milliers d'années.

**2. Chimie du carbone et du pH océanique**

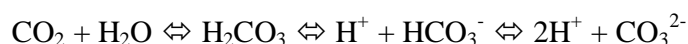


(gauche) Schéma des différentes espèces du système des carbonates dans l'eau de mer et quelques réactions d'équilibre qui les relient. L'alcalinité totale de l'eau de mer (TA) est communément définie comme « l'excès de base », ou la somme des accepteurs de protons en excès, et ses composantes ioniques sont illustrées en bleu clair.

(droite) Concentration des espèces du système des carbonates dans l'eau de mer pour une concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique préindustrielle de 280 ppm (vert) et de deux fois cette valeur (marron). La somme des concentrations de l'acide carbonique, du bicarbonate et du carbonate donne la concentration totale de CO<sub>2</sub> (TCO<sub>2</sub>). Les valeurs de pH et du taux de saturation de l'aragonite (Ω-aragonite) sont également indiquées. Ces valeurs ont été calculées en utilisant les constantes du système des carbonates « Mehrbach refit » et l'échelle totale de pH.

**Les équations montrant le CO<sub>2</sub> réagissant avec l'eau semblent générer plus et non pas moins de carbonates. Comment l'acidification des océans diminue-t-elle la quantité d'ions carbonates dans l'eau de mer ?**

Ce point est souvent mal compris, car les équations d'équilibres décrivant étape par étape le système des carbonates dans l'eau de mer ne permettent pas de représenter la dynamique de la chimie de l'eau de mer. Plusieurs réactions qui peuvent se produire entre le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), l'eau (H<sub>2</sub>O), l'acide carbonique (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), l'ion bicarbonate (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) et l'ion carbonate (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>). L'une des réactions possibles crée des ions carbonate et diminue le pH :



Toutefois, au pH actuel des océans, il se produit également une autre réaction qui consomme des ions carbonates et ne modifie pas le pH :



La deuxième équation décrit la réaction qui se produit le plus souvent dans les océans, mais la première réaction se produit également, de sorte que le changement global qui en résulte est une diminution des carbonates et une diminution du pH.

**Il semble impossible d'acidifier les océans, étant donné leur salinité. Comment le CO<sub>2</sub> pourrait-il surmonter tout ce sel ?**

Lorsque des acides et des bases se neutralisent mutuellement au cours d'expériences en laboratoire, il y a formation de sel et d'eau. Mais dans l'océan, les principaux ions qui font que l'eau de mer est « salée » (comme le sodium, le chlore et le magnésium) proviennent de l'altération des roches, qui fournit à la mer une quantité équilibrée d'ions positifs et négatifs depuis plusieurs millénaires. Les variations de pH des océans sur des échelles de temps plus courtes allant de la décennie au siècle sont contrôlées par des acides et des bases faibles, comme le bicarbonate ou le borate. De ces acides et bases faibles, les formes dissoutes du CO<sub>2</sub>, l'acide carbonique, le bicarbonate et le carbonate, ont le plus grand impact sur les variations du pH de l'océan global, car leurs concentrations évoluent rapidement par rapport à celles des autres ions.

**Comme les océans deviennent plus acides, plus de carbonate de calcium va se dissoudre. Cela peut-il compenser l'acidification des océans ?**

La dissolution des minéraux en carbonate de calcium dans la colonne d'eau et dans les sédiments augmente l'alcalinité de l'eau de mer, ce qui compense la diminution du pH et de la concentration d'ion carbonate engendrés par l'acidification des océans. Cependant, comme pour l'altération des roches, ce processus est lent et nécessiterait des milliers à des dizaines de milliers d'années pour neutraliser tout le CO<sub>2</sub> résultant des activités humaines qui pénètre dans les océans. La société étant affectée pour les décennies et siècles à venir, ce processus n'est pas assez rapide pour compenser l'invasion de CO<sub>2</sub> dans l'océan. Les modifications chimiques provoquées par l'acidification des océans vont donc perdurer pendant encore plusieurs siècles.

### **3. Mesures et observations**

**Comment pouvons-nous connaître le pH des océans dans le passé, alors que l'échelle de pH n'a été introduite qu'en 1909 ?**

Lorsque les calottes glaciaires se forment, des bulles d'air sont emprisonnées dans la glace. Les

scientifiques ont analysé la concentration de CO<sub>2</sub> de l'air dans ces bulles et ont développé un enregistrement de la concentration du CO<sub>2</sub> atmosphérique pour le passé récent. Parce qu'une grande partie de la concentration du CO<sub>2</sub> à la surface des océans reste à peu près en équilibre avec la concentration du CO<sub>2</sub> atmosphérique, la teneur en CO<sub>2</sub> de l'océan peut être calculée à partir de ces bulles d'air, et on peut ainsi déterminer le pH des océans. En fait, l'enregistrement des carottes de glace indique que la concentration du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère n'a jamais été supérieure à environ 280 ppm pendant les 800 000 dernières années, créant des conditions conduisant à un pH préindustriel moyen des eaux de surface des océans d'environ 8,2.

### **Comment savons-nous ce qu'était le pH des océans il y a plusieurs dizaines de millions d'années?**

Pour estimer les paramètres physiques ou chimiques tels que la température ou le pH pour les périodes où les instruments de mesures n'étaient pas disponibles, les scientifiques utilisent des paramètres dits proxy ou « proxies », qui sont des paramètres que l'on peut mesurer et qui sont liés au paramètre recherché mais qui ne peut pas être mesuré. Par exemple, les organismes marins qui calcifient incorporent, en plus du calcium, du carbone et de l'oxygène du carbonate de calcium, un grand nombre d'éléments dans leur coquille ou leur squelette. Lorsque les parties dures de ces organismes, qui sont conservées dans les sédiments, sont analysées, ces éléments supplémentaires peuvent fournir des informations sur les conditions environnementales pendant la durée de vie de l'animal. L'historique des valeurs du pH océanique et leurs variations peuvent être étudiés en utilisant la concentration du bore et le rapport de ses isotopes stables ( $\delta^{10}\text{B}$  et  $\delta^{11}\text{B}$ ) dans les carbonates marins. La modélisation ainsi que des observations géochimiques supplémentaires fournissent des preuves solides sur le pH moyen de l'océan de surface qui n'a pas été inférieur à environ 8,2 sur plusieurs millions d'années.

### **Comment les effets de l'acidification des océans sont-ils reliés à ceux des autres activités humaines ?**

De nombreuses activités humaines affectent la chimie de l'eau de mer et la balance acide-base de l'océan, mais pas autant que l'acidification liée au CO<sub>2</sub> atmosphérique. Les pluies acides, qui contiennent de l'acide sulfurique et nitrique dérivés de l'utilisation de combustibles fossiles, tombent sur les océans côtiers. L'impact de ces pluies acides sur la chimie des eaux de surfaces océaniques peut être important à un niveau local et régional, mais il reste faible au niveau mondial et l'ensemble de ses effets n'équivaut qu'à quelques pour cent des changements liés à l'augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique. Les eaux côtières sont également influencées par un excès d'apports de nutriments, principalement l'azote provenant de l'agriculture, des engrais et des eaux usées. Les changements chimiques qui en résultent conduisent à des efflorescences massives de plancton. Lorsque ces efflorescences s'interrompent, la matière organique se dépose sous la couche de surface. Cela stimule la respiration bactérienne qui conduit à une diminution de l'oxygène et une augmentation du CO<sub>2</sub>, qui à son tour va faire diminuer le pH, et ce d'autant plus dans les eaux côtières de subsurface.

L'une des différences majeures entre l'acidification des océans et ces types d'effets humains est que l'influence de l'acidification des océans se produit à l'échelle globale, affectant les organismes qui calcifient et sont sensibles au pH dans tous les bassins océaniques de l'équateur jusqu'aux pôles. À l'heure actuelle, les effets sont limités essentiellement aux 200-500 premiers mètres de l'océan, mais chaque année ils se font ressentir un peu plus profondément. Un grand nombre des autres effets des activités humaines sont de nature plus locale.

#### **4. Acidification des océans et photosynthèse**

**La photosynthèse est supposée augmenter avec l'augmentation du CO<sub>2</sub> océanique, comme les coraux contiennent des algues photosynthétiques, ne vont-ils pas bénéficier de cette hausse du CO<sub>2</sub> ?**

La photosynthèse de certaines algues, mais pas de toutes les algues, va s'accroître si le taux de CO<sub>2</sub> atteint les niveaux prédits pour la fin de ce siècle (700 à 800 ppm). Les algues unicellulaires appelées zooxanthelles qui vivent dans les cellules animales du corail font parties des algues dont la photosynthèse n'augmentera pas de manière significative avec l'augmentation du CO<sub>2</sub>. Les zooxanthelles et les coraux maintiennent une symbiose délicatement équilibrée, dans laquelle les zooxanthelles transfèrent à leur hôte corallien des composés carbonés formés par la photosynthèse, fournissant ainsi une source importante de carbone pour le corail et pour la calcification de ce dernier (formation du squelette). Si les algues présentent dans les cellules du corail se développent trop bien et que leur nombre augmente fortement, le transfert de substances nutritives à l'hôte corallien peut être perturbé. Donc, même si la photosynthèse des zooxanthelles venait à augmenter sous une élévation du CO<sub>2</sub>, cela ne profiterait pas nécessairement aux coraux. Dans la grande majorité des expériences, le taux de calcification des coraux diminue lorsque le niveau de CO<sub>2</sub> augmente, il est donc clair que l'augmentation des émissions de CO<sub>2</sub> diminue la capacité des coraux à construire leur squelette plutôt que de les protéger, en altérant la photosynthèse des zooxanthelles.

**Si la photosynthèse augmente avec l'augmentation du CO<sub>2</sub> océanique, est-ce que le phytoplancton et les herbiers ne se développeront-ils pas mieux ?**

Des communautés d'organismes trouvées près de sources volcaniques côtières naturelles de CO<sub>2</sub> démontrent que certaines micro-algues, algues et herbiers marins poussent très bien dans ces zones soumises à un taux élevé de CO<sub>2</sub> pendant de longues périodes. Toutefois, ce travail montre également que les écosystèmes côtiers sont dégradés en raison des effets à long terme de l'acidification des océans. La biodiversité diminue : des groupes d'organismes tels que les algues calcaires disparaissent progressivement lorsque le pH baisse et ils sont remplacés par des algues envahissantes. Ceci laisse craindre que l'acidification des océans permette la prolifération d'algues envahissantes et perturbe les habitats côtiers.

**Une augmentation du CO<sub>2</sub> dans l'eau de mer augmente la croissance des algues photosynthétiques – n'est-ce pas une bonne chose ?**

La croissance et la photosynthèse de certaines espèces de plantes, d'algues et de phytoplanctons marins peuvent augmenter avec des niveaux de CO<sub>2</sub> élevés, mais ce n'est en aucun cas une règle générale. Pour d'autres espèces, l'augmentation du CO<sub>2</sub> et de l'acidité auront des effets négatifs ou neutres sur leur physiologie. Par conséquent, certaines plantes et algues seront des «gagnants», tandis que d'autres seront des «perdants». Cela signifie qu'au lieu de bénéficier à tous de manière impartiale, l'acidification future provoquera probablement des changements majeurs dans la composition spécifique des communautés de phytoplancton. Certaines des expériences qui ont été faites jusqu'à présent indiquent que les nouvelles espèces dominantes du phytoplancton, dans un océan futur acidifié, seront moins à même de supporter une chaîne alimentaire productive sur laquelle nous comptons actuellement pour maintenir un écosystème océanique sain et de bonnes ressources halieutiques.

## **5. Acidification des océans et calcification**

### **Pourquoi l'ajout de CO<sub>2</sub> dans les aquariums domestiques est-il bénéfique pour les animaux, alors que dans l'océan, l'ajout de CO<sub>2</sub> entraîne une acidification nocive ?**

Les poissons et plantes d'eau douce ont tendance à être plus tolérants aux faibles et fortes variations de pH en général car l'eau douce possède une faible alcalinité, ce qui signifie que la chimie de ces eaux ne tamponne pas les changements de pH (c'est-à-dire qu'elle n'a pas d'effet tampon) comme c'est le cas dans l'eau de mer. La variabilité naturelle du pH des lacs et des rivières est également plus élevée que dans l'océan. Les organismes d'eau douce ont développé des mécanismes spéciaux qui leur permettent de vivre dans ces conditions plus acides et variables ; par exemple, les plantes d'eau douce peuvent bénéficier d'une hausse du CO<sub>2</sub>.

Dans les aquariums d'eau de mer, les poissons et coraux ont besoin d'un pH plus équilibré et les propriétaires ajoutent souvent du carbonate « durcisseur » pour augmenter l'alcalinité de l'eau et maintenir le pH entre 8,0 et 8,4. Des dispositifs appelés « réacteurs de calcium » permettent d'injecter du gaz carbonique par le biais de carbonate de calcium broyé (le plus souvent du corail broyé), qui libère des ions carbonates et calcium dans l'eau de mer, fournissant des eaux riches en calcium et d'une forte alcalinité dont les coraux d'aquarium et les autres organismes calcifiants ont besoin pour continuer à se développer sainement. Malheureusement, ces types d'appareils ne peuvent être utilisés pour résoudre l'acidification des océans sur une échelle globale, en raison de l'énorme quantité de carbonate de calcium broyé qui serait nécessaire à l'échelle de l'océan mondial.

### **Les coquillages peuvent survivre en eau douce lorsque le pH descend jusqu'à 5, alors quel est le problème ?**

Les organismes qui vivent en eau douce ou en eau salée avec un pH plus bas ont développé des mécanismes d'adaptation qui leur permettent de survivre dans ces conditions. En revanche, les coquillages marins, qui ont évolué dans de l'eau de mer avec un pH plus élevé et moins variable, sont plus sensibles aux variations de pH. Un bon exemple est le remplacement naturel d'organismes marins par des organismes d'eau douce au sein des estuaires. Un coquillage vivant dans les estuaires a tendance à avoir un taux de dissolution plus élevé vers l'amont où l'eau est plus douce, le pH plus faible et plus variable, qu'à l'embouchure (eau de mer) où le pH est plus élevé et varie moins. En outre, même pour les organismes vivants à un pH naturellement bas ou variable, les mécanismes d'adaptation développés ne seront pas forcément suffisants pour les protéger car l'acidification risque d'amplifier ces conditions déjà défavorables.

### **Pourquoi l'augmentation de la concentration de CO<sub>2</sub> dissous dans l'eau de mer affecte la formation des coquilles des organismes marins ?**

La dissolution du CO<sub>2</sub> dans l'eau de mer provoque une série de changements dans le système des carbonates de l'eau de mer : les concentrations en CO<sub>2</sub> dissous, en carbone inorganique total dissous et en ion bicarbonate augmentent, tandis que le pH, la concentration en ion carbonate et le degré de saturation du carbonate de calcium diminuent. Un ou plusieurs de ces changements peuvent affecter la formation des coquilles des organismes marins. La formation de squelettes ou de coquilles chez la plupart des organismes marins est un processus interne, où le bicarbonate est transformé en carbonate pour former du carbonate de calcium. Mais comme cette conversion crée



des protons (des ions hydrogène), les organismes doivent générer de l'énergie pour expulser ces ions hydrogène vers l'environnement extérieur (eau de mer). Une des hypothèses expliquant pourquoi l'acidification des océans peut ralentir le taux de calcification (et il y en a plusieurs) est que lorsque le pH de l'eau de mer diminue, les organismes doivent produire plus d'énergie pour se débarrasser des protons produits par la calcification. Ceci explique pourquoi de nombreux organismes calcifiants ont des taux de calcification plus faibles lorsqu'ils doivent faire face à d'autres stress physiologiques (par exemple le manque de nourriture) qui laissent les organismes avec moins d'énergie disponible pour la calcification. L'acidification des océans peut aussi affecter indirectement la formation des coquilles en raison des répercussions physiologiques, comme des changements dans le taux de respiration qui peut influencer sur les bilans énergétiques et ainsi modifier la capacité de l'animal à produire sa coquille. Alors que certains organismes ont un taux de croissance de leur coquille normal malgré l'acidification des océans, les parties exposées de la coquille peuvent se dissoudre plus rapidement, de sorte que l'organisme aura besoin de dépenser plus d'énergie pour entretenir sa coquille, et pourra investir moins d'énergie dans la reproduction ou dans d'autres fonctions vitales.

**Les scientifiques ont montré que les carapaces de homard (et les coquilles d'autres animaux comestibles) s'épaississent quand ils vivent dans des eaux à forte concentration en CO<sub>2</sub>, alors pourquoi devrions-nous être préoccupés par l'acidification des océans ?**

Au moins une étude expérimentale a montré que la masse de la carapace de plusieurs crustacés, incluant les homards, élevés en culture pendant 60 jours, augmente avec l'augmentation du CO<sub>2</sub>. La formation de la carapace nécessite de l'énergie, par conséquent l'augmentation de la masse de la carapace se produit presque certainement conjointement à une réduction de l'énergie allouée à d'autres fonctions comme la croissance et la reproduction. En outre, les homards et autres crustacés, utilisent pour fabriquer leur carapace à la fois du carbonate de calcium et de la chitine dans un mécanisme différent de celui des autres organismes marins. Ils muevent périodiquement au lieu d'avoir une croissance constante de leur carapace tout au long de leur vie, et l'on pense qu'ils conservent la plupart des minéraux de leur ancienne carapace pour les utiliser dans leur nouvelle carapace. Les budgets énergétiques et minéraux n'ont pas été contrôlés dans cette étude, ainsi la manière dont les effets de l'acidification des océans affecte la santé et la longévité de ces organismes est encore méconnue.

## **6. Acidification et écosystèmes**

**Est-ce que les organismes et les écosystèmes s'adapteront si certaines espèces calcifiantes disparaissent ?**

L'acidification des océans liée aux activités humaines est d'environ 100 fois plus rapide dans l'océan de surface qu'au cours des dernières dizaines de millions d'années. Les écosystèmes répondront de manière différente. Dans certains, comme les récifs coralliens, les organismes calcifiants forment l'architecture fondamentale de l'écosystème ainsi, s'ils disparaissent, l'écosystème pourrait disparaître également. Dans d'autres écosystèmes où les organismes calcifiants jouent un rôle moins important, l'impact que pourrait avoir la perte d'espèces calcifiantes sur l'écosystème est moins évident. Dans les changements extrêmes et rapides de la chimie des océans, comme c'est le cas pour l'acidification, les organismes peuvent répondre de trois manières : acclimatation, adaptation ou extinction. Si la plupart des espèces s'acclimentent rapidement, la biodiversité et la fonction des écosystèmes marins peuvent rester relativement inchangées. L'adaptation évolutive est-elle liée au temps de génération : les espèces à longue

durée de vie qui arrivent à maturité lentement auront moins de possibilités de donner naissance à une progéniture plus résistante à l'évolution rapide des conditions environnementales. Même les espèces qui se reproduisent plus rapidement peuvent ne pas être capables de s'adapter. Par exemple, à la frontière des régions où la température et la chimie des eaux leur sont favorables, les coraux ont essayé de s'adapter à des concentrations en ion carbonate plus faibles depuis plusieurs millions d'années, mais ils n'ont pas été capables de s'imposer face à des algues et autres espèces non calcifiantes. Il semble donc peu probable que les coraux parviendront à s'adapter aux nouvelles conditions de température et de chimie des eaux en quelques décennies pour répondre à l'acidification des océans. Si l'acidification des océans conduit à d'importantes modifications de l'abondance d'organismes clés de la chaîne alimentaire, ou à des extinctions significatives, nous pouvons nous attendre à d'importants changements dans le fonctionnement des écosystèmes – comme les flux d'énergie et de matières des producteurs primaires (par exemple le plancton) vers les grands prédateurs (les poissons et les mammifères).

Les écosystèmes sont des réseaux complexes d'interactions entre les organismes biologiques et l'environnement, et il est difficile de prévoir la totalité des impacts écologiques d'une perturbation. Nous savons à partir d'études sur des sources volcaniques naturelles de CO<sub>2</sub> que l'acidification des océans affecte les espèces de manière différente et que la composition des communautés est modifiée, conduisant à une réduction la biodiversité et un changement dans le fonctionnement global des écosystèmes. Nous dépendons de toute une gamme de services de l'écosystème marin, notamment la nourriture provenant des produits de la pêche, des revenus du tourisme et des loisirs, et du recyclage de l'oxygène et des éléments nutritifs provenant des processus biogéochimiques. Tous ces services peuvent être modifiés, et dans de nombreux cas, dégradés par l'acidification des océans. Imaginez, par exemple, les conséquences économiques de la disparition des oursins sur la pêche au Japon ou les conséquences du déclin des larves de poissons d'espèces commercialement importantes. En outre, la diminution ou la disparition des organismes calcifiants aura une incidence (1) sur l'environnement chimique, (2) sur d'autres organismes calcifiants et non calcifiants qui en dépendent (par exemple, de nombreux organismes et des centaines de millions de personnes dépendent des récifs coralliens), et (3) sur le réservoir de carbone sur la Terre (la « roche » produite par les organismes calcifiants sédimentant sur le plancher océanique pour former des dépôts « crayeux » massifs qui enferment un peu de carbone dans des structures géologiques). Tout comme un aquarium négligé où les poissons et les coquillages cèdent la place aux algues, les écosystèmes marins peuvent s'adapter, mais ils pourraient alors être peuplés par des espèces qui sont moins utiles ou désirables pour l'homme, rendant les ressources traditionnelles et les services fournis par les écosystèmes modifiés indisponibles, différents d'avant, ou imprévisibles.

### **Est-ce que l'acidification des océans va supprimer toute vie dans les océans ?**

Non. Cependant, de nombreux scientifiques pensent que l'acidification des océans entraînera des changements importants dans les écosystèmes marins. Cette prévision repose largement sur l'histoire géologique: il y a des millions d'années, les écosystèmes marins ont connu des changements rapides au cours d'épisodes d'acidification des océans, incluant certaines extinctions d'espèces (voir « Histoire géologique » ci-dessous). Aujourd'hui, certaines espèces et les écosystèmes qu'elles constituent sont menacés par l'acidification des océans, ce qui est particulièrement vrai en combinaison avec d'autres changements comme le réchauffement des océans. Les exemples incluent les coraux tropicaux, les coraux d'eaux profondes et les escargots marins. Ces espèces jouent des rôles clés dans les océans, soit parce qu'elles construisent des structures tridimensionnelles, qui

abritent une biodiversité considérable, soit parce qu'elles sont des composantes clés de la chaîne alimentaire. Certaines espèces qui construisent des structures en carbonate de calcium, tels que les récifs coralliens, assurent également des services fondamentaux aux humains en fournissant de la nourriture, en protégeant les côtes, et en engendrant du tourisme. Une preuve des effets écologiques de l'acidification des océans peut être trouvée actuellement aux sites « champagne », où des sources volcaniques naturelles de CO<sub>2</sub> acidifient naturellement l'eau et où de petites bulles de CO<sub>2</sub> s'élèvent vers la surface. À l'un de ces sites autour de l'île d'Ischia (Italie) par exemple, la biodiversité est réduite de 30% pour un niveau d'acidité qui correspond au niveau attendu en 2100.

### **Est-ce que le réchauffement et l'acidification vont contrebalancer la réponse des organismes?**

En principe, il devrait y avoir quelques bénéfices au réchauffement pour le processus de calcification, car la précipitation du carbonate de calcium s'accroît avec l'augmentation de la température jusqu'à un certain seuil. Toutefois, les organismes sont habitués à vivre dans une gamme de température limitée et sont moins performants à des températures situées en dehors de cette gamme. Dans de nombreuses zones marines, des organismes (calcifiants et non-calcifiants) sont déjà exposés à des températures atteignant la limite supérieure de leur tolérance. Des études menées sur des crabes et des poissons ont démontré que l'exposition aux niveaux de CO<sub>2</sub> attendus si les émissions de CO<sub>2</sub> continuent à augmenter réduit leur capacité à tolérer des températures extrêmes. Des études sur les coraux ont également montré que le CO<sub>2</sub> augmente leur sensibilité thermique. Dans ce cas, cela augmente le risque d'événements de blanchissement déclenchés par le réchauffement. Globalement, il apparaît que l'acidification des océans pourrait accroître la sensibilité des organismes au réchauffement climatique.

### **Est-ce que les organismes adultes seront en sécurité s'ils sont capables de survivre aux effets de l'acidification des océans quand ils sont très jeunes et vulnérables ?**

Pour les organismes marins communs, les gamètes, les œufs, les différents stades larvaires, les juvéniles et les adultes peuvent être affectés différemment par l'acidification des océans, car ils ont des tolérances et des stratégies différentes pour faire face au stress environnemental. Dans certains cas, les premiers stades de vie peuvent être plus vulnérables au stress, tandis que dans d'autres cas, les adultes seront les plus vulnérables. Des expériences sont nécessaires sur tous les stades de vie pour comprendre tous les effets sur un organisme et pour mettre en évidence les stades qui constituent les maillons faibles. Il est également important de prendre en compte les répercussions que pourraient avoir l'acidification des océans sur la survie et la reproduction des organismes tout au long de leur vie. En général, les premières phases de la vie (gamètes, larves, juvéniles) sont supposées être plus sensibles à l'acidification des océans que les adultes. Si peu de jeunes organismes survivent jusqu'à l'âge adulte, la taille de la population sera réduite. Un stress permanent limite généralement la viabilité des organismes. Par exemple, les organismes stressés sont plus petits et se développent plus lentement, des prédateurs stressés seront moins efficaces et des proies stressées auront moins de chance d'échapper aux prédateurs. Enfin, ce stress diminuera le taux de survie, ce qui affectera la taille de la population. Pour les adultes, le stress causé par l'acidification des océans n'affectera pas forcément les activités quotidiennes, mais il finira par réduire la croissance de ces organismes et leur taux de reproduction. La diminution de la reproduction peut également modifier la taille de toute la population. Les impacts à n'importe quels stades de vie peuvent réduire le potentiel d'une population à se développer ou de se remettre des pertes provoquées par des perturbations ou des stress.

## **7. L'acidification des océans dans l'histoire géologique**

**Pourquoi les coraux disparaissent-ils à cause de l'acidification des océans, quand certaines espèces de coraux ont déjà survécu à d'autres changements de la chimie des océans au cours de l'histoire géologique ?**

Le danger de l'acidification des océans est lié à sa rapidité, à la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère attendue et à l'ampleur prédite du changement du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère si nous continuons à émettre du CO<sub>2</sub> à la même vitesse. La hausse actuelle du CO<sub>2</sub> atmosphérique est d'environ 2 ppm par an et le CO<sub>2</sub> atmosphérique a augmenté de plus de 100 ppm depuis le début de la révolution industrielle. Dans la transition entre la fin du dernier âge glaciaire à la période chaude actuelle, les concentrations de CO<sub>2</sub> ont augmenté de 80 ppm en plus de 10 000 ans. Aujourd'hui, l'accroissement du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère est donc environ 100 fois plus rapide que la plupart des grands changements observés au cours des temps géologiques. À l'exception des périodes de grandes extinctions de masse, il n'y a pas de preuve dans les enregistrements géologiques de changements de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère aussi ou plus importants qu'aujourd'hui. Même au cours de changements extrêmes de la chimie des océans, par exemple pendant le maximum thermique du Paléocène-Eocène il y a 55 millions d'années lorsque les minéraux carbonatés se sont dissous dans la plupart des océans intermédiaires et profonds, ces changements se sont probablement produits sur plusieurs milliers d'années. Les coraux ont en effet survécu à de multiples épisodes d'extinction dans l'histoire de la Terre, mais à chaque fois leur « rebond » a pris des millions d'années et leur capacité à former des récifs a demandé encore plus de temps. En général, la vie dans les océans récupère après des épisodes d'extinction par l'adaptation et l'évolution en de nouvelles espèces, mais il faut environ 10 millions d'années pour atteindre les niveaux de biodiversité précédant l'extinction.

**En quoi le changement actuel de la chimie des océans est-il différent des précédentes périodes géologiques ?**

Les conditions actuelles diffèrent largement de celles du passé parce que l'augmentation du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère ne correspond pas à la diminution engendrée par les processus géologiques naturels. Si le CO<sub>2</sub> est ajouté lentement sur des centaines de milliers d'années, comme ce fut le cas durant l'Ordovicien par l'activité volcanique et des plaques tectoniques, le CO<sub>2</sub> qui pénètre dans l'océan a le temps de se mélanger dans toute la colonne d'eau. En conséquence, même si la quantité de CO<sub>2</sub> qui est absorbée par l'océan est grande, elle est répartie dans un très grand volume d'eau et la diminution du pH qui en résulte est faible. Dans le même temps, comme le niveau de CO<sub>2</sub> au fond des océans augmente au fil des millénaires, les sédiments carbonatés gisant sur les fonds marins commencent à se dissoudre et à libérer des ions carbonates qui neutralisent une partie de l'acidité, ce qui réduit encore la diminution du pH. Les océans du passé contenaient également de plus grandes concentrations en ions calcium et magnésium, ce qui a contribué à stabiliser les minéraux de carbonate de calcium dans les squelettes d'animaux marins.

Aujourd'hui, le CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère augmente beaucoup plus vite que l'océan ne se mélange. Pendant les rejets de CO<sub>2</sub> sur des échelles de temps courtes (< 10 000 ans), la capacité des sédiments à réguler la chimie des océans est insuffisante, entraînant une diminution du pH et des taux de saturation. Même si la quantité de CO<sub>2</sub> qui est entrée dans l'océan au cours des 200 dernières années est plus faible que celle ajoutée au cours de l'Ordovicien, le CO<sub>2</sub> s'est accumulé à une concentration beaucoup plus élevée dans l'océan de surface. En conséquence, le pH de

l'océan supérieur a diminué plus rapidement et plus fortement que dans le passé géologique. À la fois le taux de changement du pH et l'ampleur de ce changement présentent des problèmes pour les organismes qui se sont développés dans un océan qui a connu de faibles et lents changements de pH par le passé.

## **8. Géoingénierie et atténuation de l'acidification**

**Si nous augmentons l'aquaculture et élevons plus de coquillages, est-ce que les coquilles pourraient aider à piéger le dioxyde de carbone (comme les arbres) ?**

Le processus de calcification ne piège pas le CO<sub>2</sub>, mais il provoque des changements dans le système du carbone dans l'eau de mer qui se traduisent par un abaissement du pH et une *augmentation*, plutôt qu'une diminution du CO<sub>2</sub>. Beaucoup d'organismes convertissent le bicarbonate en carbonate afin de construire leurs coquilles, produisant des ions hydrogène et augmentant ainsi l'acidification. La plupart des récifs coralliens, par exemple, sur les échelles de temps qui nous concernent, sont de petites sources de CO<sub>2</sub> vers l'atmosphère plutôt que des puits. Du point de vue des écosystèmes, même l'aquaculture, aussi bien intentionnée soit-elle, pourrait causer des dommages involontaires en modifiant les paysages côtiers, en augmentant la pollution et les maladies, ou par l'introduction d'espèces génétiquement modifiées ou étrangères dans l'environnement. Toute activité visant à réduire l'acidification des océans doit être considérée dans un contexte plus large pour éviter de remplacer un stress environnemental par un autre.

**Est-ce que la géoingénierie climatique peut aussi aider à résoudre l'acidification des océans ?**

Les approches de géoingénierie proposées pour limiter le changement climatique ne contribuent à la réduction de l'acidification que si elles réduisent la teneur en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère sans stocker le CO<sub>2</sub> dans l'océan (ce qui est le cas de la fertilisation de l'océan par des sels nutritifs ou des éléments traces). Aucun effet bénéfique sur l'acidification des océans n'est à attendre des techniques de géoingénierie qui tentent d'apporter un traitement symptomatique sans s'attaquer à la racine du problème : l'excès de gaz carbonique dans l'environnement. Ces dernières s'adressent aux conséquences climatiques de nos émissions de gaz carbonique, mais ne se préoccupent pas des conséquences chimiques de ces émissions sur les océans. Par exemple, les stratégies qui cherchent à refroidir la Terre en réfléchissant du rayonnement solaire vers l'espace auraient peu d'effet direct sur la chimie des océans et donc ne diminueraient pas significativement leur acidification.

Certaines approches visent à limiter les modifications de la chimie des océans par ajout de substances qui neutraliseraient l'augmentation d'acidité. Toutefois, pour éviter l'acidification des océans, il faudrait ajouter une quantité de substance beaucoup plus importante que la quantité de gaz carbonique que nous émettons dans l'atmosphère. Par conséquent, ces solutions nécessiteraient de nouvelles ressources minières et des infrastructures de traitement chimique aussi développées que notre système énergétique actuel. Il semble raisonnable de penser qu'il serait préférable d'investir la même énergie et le même financement pour transformer notre système énergétique afin de nous libérer de la dépendance à un réservoir limité de ressources en combustibles fossiles et d'accroître l'utilisation des énergies renouvelables, ressources infinies. Cela permettrait également d'éviter au dioxyde de carbone d'être rejeté dans l'environnement dans un premier temps, plutôt que d'envisager de neutraliser ses effets une fois qu'il s'est déjà propagé à travers l'atmosphère et les océans.

## **La limitation du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère à 350 ou 400 ppm, pourrait-elle arrêter l'acidification des océans ?**

Le CO<sub>2</sub> atmosphérique est déjà à 403 ppm (2016) et augmente d'environ 2 ppm par an. Sans réduction spectaculaire des émissions de CO<sub>2</sub>, le CO<sub>2</sub> atmosphérique continuera d'augmenter. La plupart des prévisions concernant les émissions dans un futur proche indiquent une augmentation probable (plutôt qu'une diminution) des taux de croissance de CO<sub>2</sub> atmosphérique. La première étape pour lutter contre l'acidification des océans est, par conséquent, de stabiliser et éventuellement de réduire les émissions de CO<sub>2</sub>. Les impacts sur la vie marine au niveau du pic de CO<sub>2</sub> pourraient être substantiels. Sur le long terme, il sera possible de réduire le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère grâce à des mécanismes naturels et artificiels d'absorption. La chimie de l'eau de mer est réversible, et en revenant à 350-400 ppm, le pH et les niveaux de saturation des carbonates pourraient être approximativement rétablis à leurs niveaux actuels. Toutefois, certains travaux suggèrent que même les conditions actuelles peuvent être délétères pour certains organismes et il n'est ainsi pas évident que les futurs impacts biologiques dus aux pics de CO<sub>2</sub> seront réversibles. Même si nous stabilisons les émissions de CO<sub>2</sub>, le CO<sub>2</sub> atmosphérique issu des combustibles fossiles continuera à pénétrer dans l'océan profond pour les siècles à venir, ce qui pourrait avoir un impact sur les organismes vivant en eaux profondes comme les coraux d'eau froide.

## **9. Décisions pouvant limiter l'acidification**

### **N'est-il pas préférable de sacrifier les océans et de les laisser absorber le CO<sub>2</sub> afin de stabiliser le climat ?**

L'acidification des océans et le changement climatique sont les deux faces d'une même pièce. Tous deux sont les conséquences directes des émissions de CO<sub>2</sub> anthropique et ne peuvent pas être séparés l'une de l'autre. L'absorption actuelle d'environ un quart des émissions anthropiques de CO<sub>2</sub> par l'océan sert, en effet, de tampon contre l'augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique, et ainsi ce «service» pourrait être envisagé pour diminuer, mais pas empêcher, le changement climatique. À long terme, sur des échelles de dizaines de milliers d'années, la majeure partie des émissions anthropiques de CO<sub>2</sub> (80 à 90%) se retrouvera dans l'océan. Toutefois, cela ne protégera pas le système climatique du réchauffement global au cours de la période intermédiaire. Il est également important de souligner que l'absorption du CO<sub>2</sub> par les océans aura de profondes répercussions sur le fonctionnement des écosystèmes de la Planète. Les océans jouent un rôle essentiel dans les cycles biogéochimiques, non seulement dans la régulation du CO<sub>2</sub>, mais aussi dans la production d'oxygène, dans le cycle de l'azote et d'autres nutriments importants, ainsi que dans la production de gaz qui modifient la formation des nuages. De nombreuses espèces utilisent à la fois la Terre et l'océan comme habitat, et beaucoup d'êtres humains dépendent de la santé des océans pour leur subsistance. Les océans sont une partie intégrante et interconnectée du système Terre, et ne peuvent être considérés de manière réaliste comme une entité séparée.

### **Est-il trop tard pour faire quoi que ce soit ?**

Il est parfaitement possible d'un point de vue technique et économique de modifier nos systèmes énergétiques, nos systèmes de transports et nos pratiques d'utilisation des terres pour éliminer en grande partie les émissions de dioxyde de carbone de nos économies d'ici le milieu du siècle. On pense que le coût de cette opération serait limité, peut-être 2% de la production économique mondiale. Il s'avère pourtant difficile pour les sociétés de se décider à procéder à cette conversion, même si des événements récents laissent espérer qu'un changement est en train de se produire aux niveaux global et régional (par exemple la signature en décembre 2016 de l'accord de Paris et des actions de plus en plus vigoureuses dans plusieurs pays). Il existe aussi des techniques d'adaptation plus ou moins efficaces qui peuvent être

misent en place localement pour atténuer les effets sur une activité particulière, par exemple la plantation de certaines algues et plantes à proximité des sites d'aquacultures de mollusques afin de créer des conditions de chimie de l'eau de mer plus favorables. Toutefois, ce type d'action ne peut qu'apporter un secours très local et une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> reste la seule option viable pour aborder le problème à l'échelle globale.

### **Pourquoi est-il important d'effectuer des recherches sur l'acidification des océans ? Et que peuvent faire les scientifiques ?**

Par rapport aux environnements terrestres, les océans et leurs écosystèmes sont mal compris. Avec les progrès technologiques récents, notre connaissance croît rapidement, cependant nous avons encore beaucoup à apprendre. Si les décideurs politiques doivent prendre des décisions éclairées en matière de changement climatique et d'acidification des océans, les scientifiques doivent leur fournir la meilleure information possible. Ceci nécessite des recherches. Tout le monde doit reconnaître que l'obtention et la distribution de ces connaissances exige beaucoup d'efforts, et maintenir une communication claire et ouverte entre les chercheurs, les dirigeants et les citoyens est essentielle.

Les scientifiques ont répondu « oui » à la question « Est-ce que l'acidification des océans est réelle ? ». Nous sommes maintenant confrontés à des questions telles que « À quel point l'acidification des océans sera néfaste ? » et « Que pouvons-nous faire ? ». La plupart des scientifiques conviennent que la réduction des émissions de gaz à effet de serre est la meilleure réponse à « Que pouvons-nous faire ? ». Il est plus difficile et encore plus important de fournir une réponse à la question restante, car nous sommes parfaitement conscients que les niveaux de CO<sub>2</sub> continueront à augmenter dans un avenir proche. Beaucoup de scientifiques se focalisent désormais sur la concentration de CO<sub>2</sub> qui est considérée comme « dangereuse » pour la planète et pour la société. La question « Que pouvons-nous faire ? » est passée de qu'est-ce qui peut être fait sur la cause du problème (le CO<sub>2</sub>) à qu'est-ce qui peut être fait pour prévenir ses conséquences. Nous cherchons essentiellement à répondre à la question « À quoi ressembleront les écosystèmes marins futurs et quels services fourniront-ils à la planète et à l'humanité ? » C'est un énorme défi. Comme en témoignent plusieurs de ces questions, l'acidification des océans est un problème simple mais qui a des conséquences complexes.

### **Si l'acidification des océans est tellement potentiellement grave, pourquoi n'est-elle pas incluse dans la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) à la Conférence des Parties (CdP) sur les négociations d'atténuation du changement climatique?**

Bien que les scientifiques sachent depuis des décennies que l'acidification des océans se produira en raison de l'augmentation du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, la prise de conscience sur les conséquences sur la vie marine s'est faite il y a à peine une dizaine d'années. À cette époque, les biologistes ont découvert que l'acidification des océans affectait la capacité des organismes marins à former leur coquille ou squelette. Depuis il a été montré que de nombreux autres effets de l'acidification des océans influencent un large éventail d'organismes et de processus marins. Parce que la démarche scientifique repose sur des protocoles formels de recherche, sur la révision par des pairs et sur la publication, il faut un certain temps pour qu'une nouvelle découverte soit vérifiée et acceptée par la communauté scientifique.

Toutefois, des évidences suffisantes existent sur l'acidification des océans depuis 2007, date à laquelle le quatrième rapport d'évaluation du GIEC sur les changements climatiques indiquait, dans le résumé pour les décideurs, « l'acidification progressive des océans due à l'augmentation du dioxyde de carbone atmosphérique devrait avoir des impacts négatifs sur les organismes marins formant des coquilles (comme les coraux) et les espèces qui en dépendent ». L'acidification des océans et ses effets ont été décrits au point qu'ils sont aujourd'hui largement acceptés par la communauté scientifique. Ils ont été sérieusement abordés dans le cinquième rapport d'évaluation du GIEC paru en 2013 et 2014. L'acidification des océans et le rôle clé des océans dans la régulation du climat a été un sujet de discussion majeur lors des Conférence des Parties (CdP) depuis 2009. Suite à ces efforts de communication et de sensibilisation des décideurs en amont et lors de ces CdP, les océans sont mentionnés dans l'accord de Paris de 2015. En reconnaissance de l'importance des océans pour le climat et suite à une demande de la part de plusieurs pays, le GIEC publiera en 2020 un rapport spécial sur le changement climatique, les océans et cryosphère dans lequel sera traité de manière significative l'acidification des océans.



# Les aspects physiques

## *Influence sur le climat, circulation et niveau de la mer*

Bruno Voituriez et Anny Cazenave

### 1. Le rôle de l'océan dans le système climatique

#### 1.1. L'océan est le principal régulateur du climat global. Son interaction avec l'atmosphère et ses conséquences sont au cœur du système climatique

C'est tout d'abord la grande inertie thermique de l'océan, par rapport à l'atmosphère, qui lui permet d'emmagasiner le rayonnement solaire en été et de restituer cette énergie thermique vers l'atmosphère en hiver. Cet effet modère fortement les extrêmes climatiques et contribue à la douceur des régions océaniques. Mais l'océan intervient aussi dans la régulation énergétique globale de manière dynamique, par l'intermédiaire d'une circulation complexe. Le bilan énergétique terrestre est excédentaire dans les régions tropicales où l'énergie reçue du Soleil est supérieure à celle réémise vers l'espace par la Terre, alors que l'inverse se produit aux hautes latitudes. La régulation de ce déséquilibre se fait à parts égales par l'océan et l'atmosphère, avec des mécanismes et des temps de réaction différents. Globalement, l'océan évacue la chaleur des régions équatoriales vers les pôles et ramène du froid des pôles vers l'équateur. Cependant la distribution irrégulière des continents donne lieu pour chaque bassin océanique à un fonctionnement spécifique. Dans l'océan Pacifique, la chaleur est transportée symétriquement de l'équateur vers les pôles, par les courants de surface entraînés par le vent. Les courants profonds y contribuent peu. Dans l'océan Indien, la barrière continentale bloque les eaux océaniques au sud de 20° N ; en conséquence l'océan Indien transporte essentiellement la chaleur vers l'hémisphère sud. C'est le contraire pour l'océan Atlantique qui transporte en surface la chaleur vers le nord à toutes les latitudes. La raison en est que dans les mers froides du nord de l'Atlantique les eaux de surface denses plongent jusque 2 000 m-4 000 m de profondeur et se propagent vers le sud. C'est une sorte de « pompe aspirante » qui accroît d'autant les courants marins et donc la quantité de chaleur qu'ils transportent (voir section 2.3 sur la circulation thermohaline). Cette boucle de circulation (eaux de surface chaudes vers le nord et eaux profondes froides vers le sud) est une caractéristique majeure de la circulation actuelle à grande échelle.

#### 1.2. L'océan se réchauffe depuis quelques décennies

Le réchauffement récent causé par l'émission de gaz à effet de serre par les activités humaines n'affecte pas que les basses couches de l'atmosphère et la surface des continents. Grâce à des mesures de température de la mer collectées au cours des 5-6 dernières décennies sur les 1 000-2 000 premiers mètres de l'océan, à partir de navires, de bouées océanographiques, de mouillages et plus récemment par des flotteurs automatiques (le projet Argo), les océanographes ont observé que l'océan s'est réchauffé de façon importante sur cette période. La température de la couche 0-300 m a augmenté d'environ 0,3°C depuis 1950. C'est environ deux fois moins que la température de surface de l'océan. Mais cela confère à l'océan le rôle de plus grand réservoir de chaleur du système climatique. En effet, en raison de sa masse et de la valeur élevée de la chaleur spécifique de l'eau, l'océan est environ 1 200 fois plus efficace que l'atmosphère pour stocker la chaleur. Il

s'est moins réchauffé en moyenne que l'atmosphère, mais il est facile de montrer que 90% de la chaleur excédentaire accumulée dans le système climatique depuis 50 ans à cause du réchauffement anthropique est stockée dans l'océan (15 à 20 fois plus que dans la basse atmosphère et sur les terres émergées). Le réchauffement récent de l'océan n'affecte pas seulement les couches superficielles : sur la dernière décennie 15-20% du réchauffement océanique concerne les couches profondes en dessous de 700 mètres. Les courants océaniques comme les courants atmosphériques transportent la chaleur d'une région à une autre. Mais les échelles temporelles de variabilité caractéristiques de la dynamique océanique sont beaucoup plus longues que celles de l'atmosphère (voir section 2.4 sur les tourbillons). C'est pour cette raison que l'océan joue un rôle majeur de régulateur thermique du système climatique. Le réchauffement de l'océan contribue aussi à la hausse actuelle du niveau de la mer (voir section 3). Les observations de température de la mer montrent aussi que la chaleur de l'océan n'est pas distribuée de façon uniforme. La variabilité régionale du contenu thermique de l'océan apparaît très similaire à celle des vitesses de variation du niveau de la mer cartographiées par les satellites altimétriques depuis le début des années 1990. Mais ces structures régionales ne sont pas stationnaires : elles varient dans le temps et dans l'espace. Des études récentes montrent que la distribution régionale du contenu thermique de l'océan à des échelles de temps interannuelles et décennales est principalement pilotée par les grandes perturbations naturelles du système climatique telles qu'ENSO (El Niño-Southern Oscillation) dans l'océan Pacifique, ou la NAO (Oscillation Nord-Atlantique) dans l'Atlantique nord. À cette variabilité interannuelle/décennale des structures régionales du contenu thermique régional de l'océan se superpose la composante à plus long terme causée par le réchauffement anthropique. Celle-ci devrait devenir visible au cours des prochaines décennies et sera une des causes majeure de la hausse non uniforme future du niveau de la mer.

## **2. La circulation générale océanique**

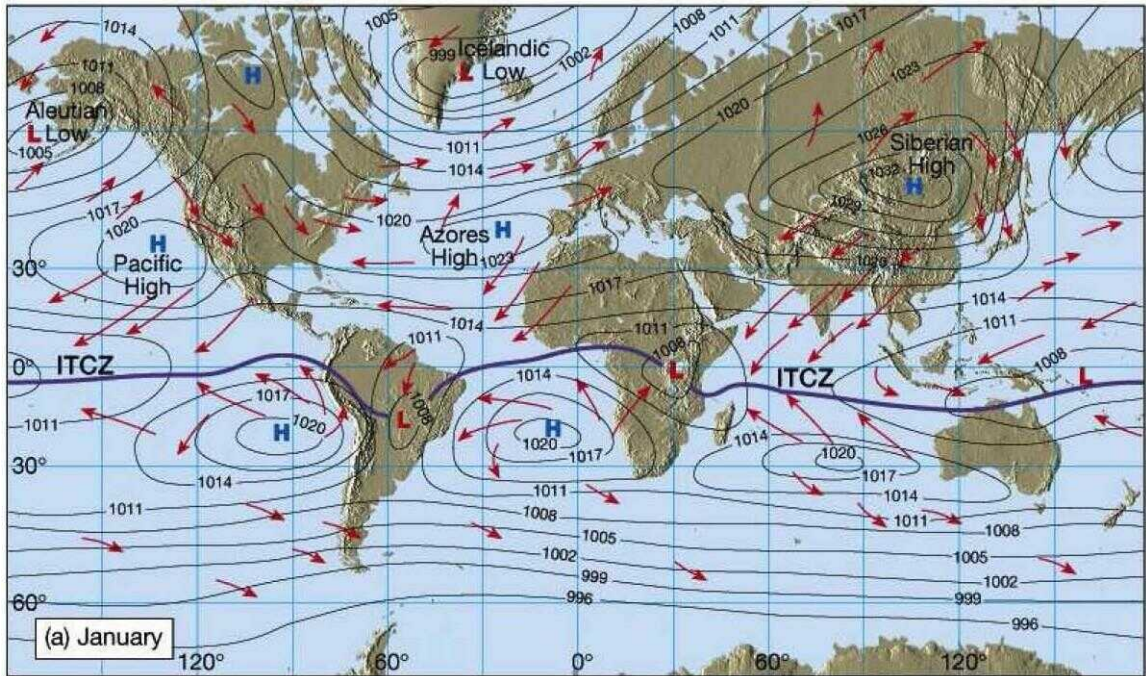
### **2.1. Les causes**

À l'origine des courants marins et de leur configuration, on trouve (1) une source d'énergie : le soleil ; (2) le couplage de l'océan et de l'atmosphère ; (3) la rotation de la Terre. De l'énergie solaire qui entre dans le système Terre, 56% sont absorbés par l'océan, deux fois plus que par l'atmosphère.

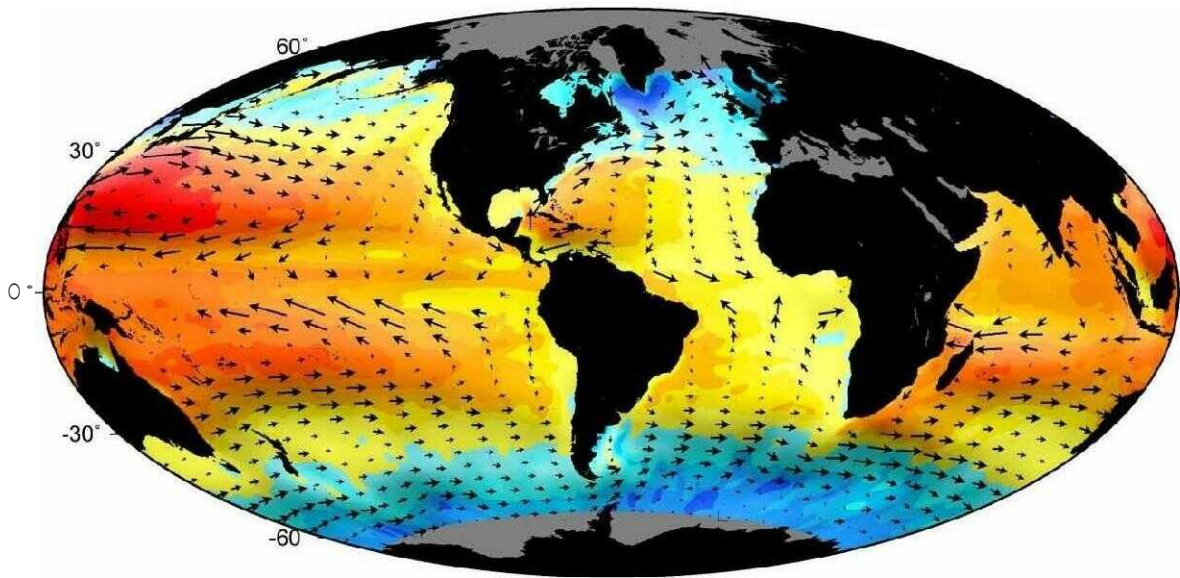
L'océan est ainsi le principal réservoir d'énergie solaire. Il en rétrocède une part à l'atmosphère par rayonnement, conduction et évaporation. Si bien que c'est l'océan (45%) et non le rayonnement solaire direct (34%) qui est le principal fournisseur d'énergie de l'atmosphère. L'apport des continents et de la biosphère terrestre représente 21%. Ce transfert de chaleur et d'énergie de l'océan vers l'atmosphère se fait principalement dans les régions intertropicales qui sont les principales bénéficiaires du rayonnement solaire et où les températures de l'océan sont les plus élevées, notamment dans la zone intertropicale de convergence des alizés de l'hémisphère nord et de l'hémisphère sud (le pot au noir). Les océans équatoriaux sont la chaudière qui, par convection, met en mouvement l'atmosphère. Le vent ainsi créé grâce aux apports énergétiques de l'océan à l'atmosphère va en retour, par frottement à la surface de l'océan, lui transmettre de l'énergie mécanique et générer les courants de surface. Ainsi circulations atmosphérique et océanique sont-elles indissolublement liées : on parle de couplage entre l'océan et l'atmosphère. Le système climatique est une machine thermique à convertir et distribuer l'énergie que la Terre reçoit du soleil, et l'atmosphère et l'océan en sont les deux fluides. Ils assurent le transport et la distribution de la chaleur de la source chaude équatoriale vers les régions polaires.

## 2.2. Les courants de surface

Les échanges thermodynamiques et mécaniques précédents et les mouvements qu'ils induisent dans l'océan comme dans l'atmosphère génèrent des variations de pression atmosphérique et océanique qui vont « organiser » la circulation des deux fluides. La pression atmosphérique en un point représente le poids de la colonne d'air qui le surmonte. Pareillement, la pression océanique en un point (pression hydrostatique) représente le poids de la colonne d'eau au-dessus d'une surface en profondeur prise comme référence ; elle dépend de la densité et donc de la température, de la salinité et bien sûr de la hauteur de la colonne d'eau. Les variations du niveau de la surface de la mer que mesurent les satellites sont une représentation précise du champ de pression océanique. En raison de la rotation de la Terre sur elle-même et de sa sphéricité, les courants atmosphériques et océaniques ne s'écoulent pas en ligne droite des hautes vers les basses pressions. En effet la rotation de la Terre sphérique sur elle-même impose à tout corps ou fluide en mouvement à sa surface une accélération complémentaire, dite de Coriolis, qui entraîne le mobile sur la droite de son mouvement dans l'hémisphère nord et sur la gauche dans l'hémisphère sud. C'est pourquoi les grandes circulations océanique et atmosphérique ignorant la ligne droite s'organisent en de vastes tourbillons autour des zones de haute (anticyclone) et basse (dépression) pression. Comme l'atmosphère, l'océan a ses anticyclones et ses dépressions, que les mesures altimétriques satellitaires permettent de cartographier. Vents et courants tournent dans le sens des aiguilles d'une montre autour des anticyclones et en sens inverse autour des dépressions. C'est le contraire dans l'hémisphère sud. Les vents et courants sont d'autant plus forts que le gradient de pression autour de l'anticyclone ou de la dépression est élevé. Figure 1 a et b. Dans l'Atlantique nord, entre le centre de l'anticyclone océanique (centré sur les Bermudes) et la dépression du Labrador au sud du Groenland, la dénivellation est de 1,8 mètre.



(a)



**=4== =+=1. . cm**  
 0 10 20 30 40 50 60 70 80 90100110120130140150160170180

(b)

Figure 1 -Les champs moyens de pression atmosphérique (en hectopascal) (a) et océanique (b) (représentée par la topographie de la surface de l'océan -en cm- induite par la circulation ; les flèches représentent les grands courants de surface).

Ce couplage entre océan et atmosphère fait que la circulation superficielle océanique est un calque de la circulation atmosphérique, figure 2. Dans l'Atlantique, autour de l'anticyclone océanique associé à l'anticyclone des Açores et entraînés par le vent, tournent le Gulf Stream à l'ouest, le courant des Canaries à l'est le courant équatorial nord au sud et l'amorce de la dérive nord Atlantique au nord ; et autour du système dépressionnaire d'Islande on trouve à l'est la dérive nord atlantique et le courant de Norvège vers le nord et à l'ouest le retour par le courant du Groenland et le courant du Labrador. On retrouve les mêmes structures couplées océan/atmosphère dans le reste de l'océan mondial.

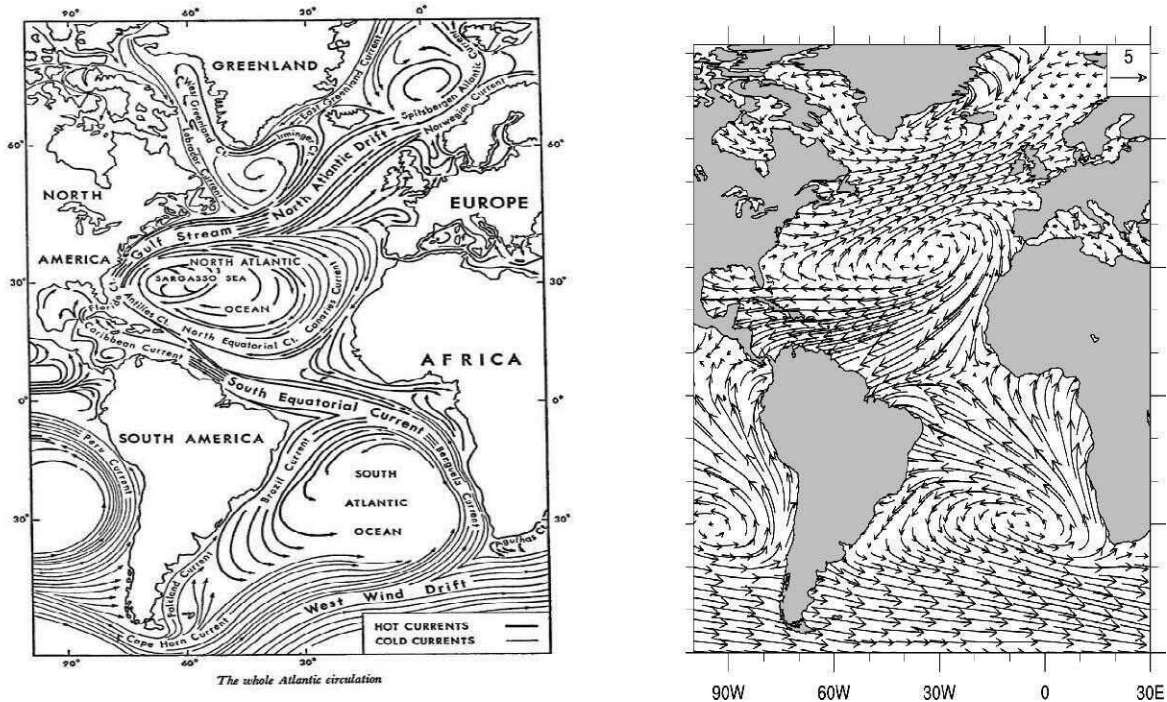


Figure 2 – Courants (à gauche) et vents (à droite) moyens de surface sur l'Atlantique.

### 2.3. La circulation thermohaline : le tapis roulant

On appelle circulation thermohaline les courants produits non par le vent mais par des différences de densité entre les masses d'eau océanique. Dans l'Atlantique Nord, les courants sinuent en contournant les centres de haute et basse pression océaniques : Gulf Stream, dérive Nord Atlantique, courant de Norvège, et transportent de l'équateur vers l'Arctique des eaux chaudes et très salées (c'est dans l'anticyclone océanique de l'Atlantique nord que l'on trouve les eaux océaniques les plus salées). Dans leur parcours, elles échangent énergie et chaleur avec l'atmosphère et leurs propriétés (température, salinité) évoluent mais elles gardent une sursalure importante par rapport aux eaux environnantes. Plus elles montent vers le nord, plus elles se refroidissent et plus leur densité augmente. Lorsqu'en hiver en mers du Groenland et de Norvège la banquise, constituée d'eau douce, se forme, la salinité augmente et aussi la densité qui devient supérieure à celle des eaux sous-jacentes. Les eaux de surface plus lourdes plongent jusqu'à leur profondeur d'équilibre hydrostatique vers 3 000 mètres de profondeur. Elles s'écoulent ensuite vers le sud pour se répandre dans tout l'océan puis, sous l'influence des mélanges et de la dissipation de l'énergie des marées, elles regagnent la surface et finissent, *via* les courants de surface, par regagner leur point de départ, prêtes pour un nouveau tour. Un tour complet prend de l'épaisseur de la banquise environ mille ans. C'est ce que



l'on appelle le « tapis roulant » (figure 3) qui joue un rôle important dans la dynamique du climat. En effet la plongée des eaux profondes dans l'Atlantique nord représente en moyenne un débit de 15 millions de m<sup>3</sup>/s (c'est à peu près 15 fois le débit de tous les fleuves de la Terre). Elle joue le rôle d'une pompe aspirante et accroît d'autant le débit des courants de surface et donc le transport de chaleur vers le nord par le Gulf Stream et la dérive Nord Atlantique. La quantité de chaleur transmise par l'océan à l'atmosphère s'accroît également, assurant aux pays de l'Europe de l'Ouest exposés aux vents d'ouest des hivers doux et humides. D'où la question à laquelle il est difficile d'échapper : quelle pourrait être l'impact sur le climat du ralentissement ou de l'arrêt de ce tapis roulant ? Hypothèse qui n'est pas à exclure, compte tenu du changement climatique qui tend à diminuer la densité des eaux de surface qui deviennent plus chaudes et moins salées (réduction de la surface, augmentation des précipitations sur l'Arctique).

### Circulation thermohaline atlantique

*Adapté par Maier-Reimer d'après Broecker*

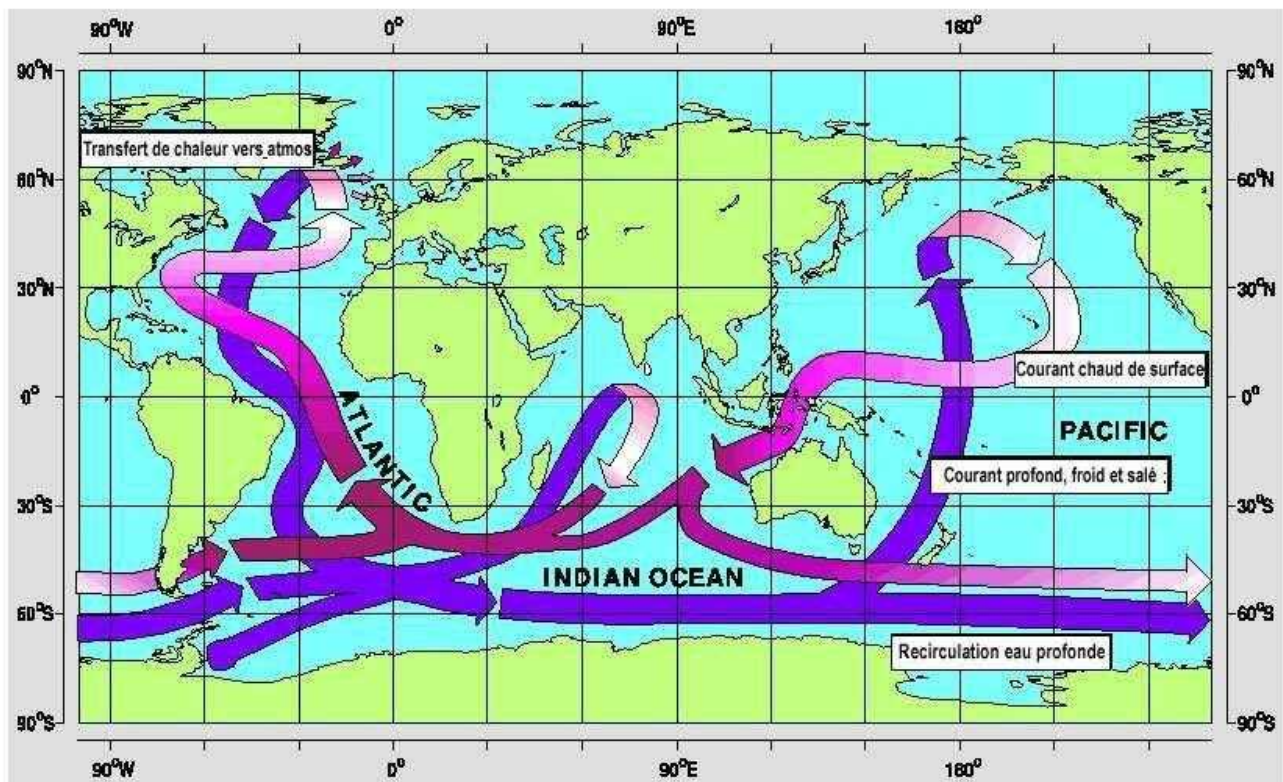


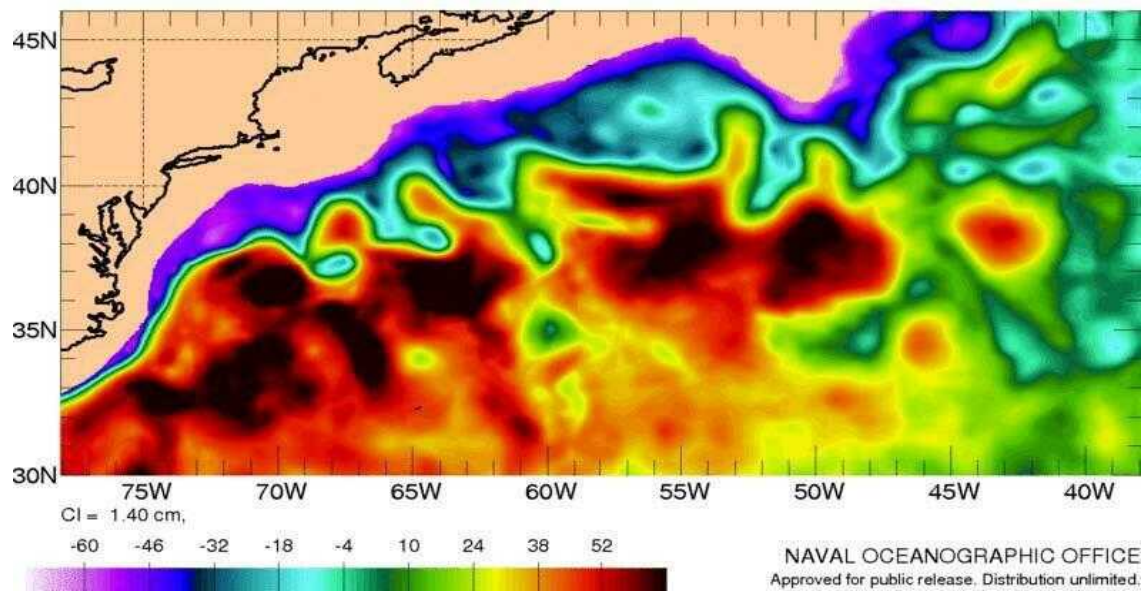
Figure 3 – La circulation thermohaline (tapis roulant).

#### 2.4. Les tourbillons

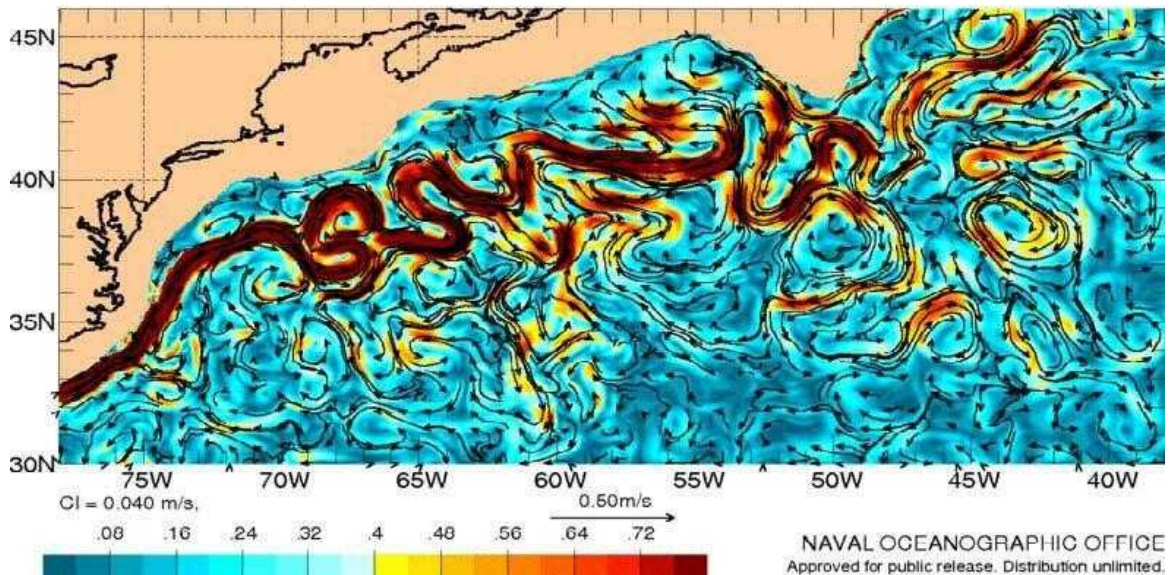
La circulation générale océanique, bien ordonnée autour de vastes systèmes anticycloniques et cycloniques, représente dans l'océan comme dans l'atmosphère une situation moyenne qui efface la variabilité que l'on observe à de plus petites échelles de temps et d'espace. L'océan et l'atmosphère sont des fluides turbulents où les instabilités produisent des « perturbations » qui

ont des durées de vie et des extensions très différentes. Tout le monde connaît les « dépressions » atmosphériques des prévisionnistes de la météo qui, circulant d'ouest en est, viennent apporter pluie et douceur relative sur la France en hiver. Leur durée de vie est de quelques jours et leur extension de l'ordre du millier de kilomètres. L'équivalent dans l'océan, les tourbillons, sont de dimension plus réduites – de l'ordre de 100 km de diamètre – et ont une vie beaucoup plus longue : de quelques mois à plus d'une année. Il fut longtemps difficile de détecter ces tourbillons car, compte tenu de leur faible dimension et de leur mobilité, ils échappaient aux moyens de mesure traditionnels à partir des navires océanographiques qui sont lents et dont l'autonomie était faible. Les observations satellitaires permettent maintenant de les cartographier et de suivre leur évolution, notamment la mesure du niveau de la mer, qui permet de distinguer les tourbillons anticycloniques (point haut) et cycloniques (point bas). Les tourbillons existent dans tout l'océan. Ils sont des agents très actifs des transferts de quantité de mouvement et de chaleur dans les océans et dans les échanges avec l'atmosphère. Ils contiennent plus de 90% de l'énergie cinétique totale de la circulation océanique. Ils doivent être pris en compte dans les modèles océaniques, ce qui leur impose un maillage très serré dans ces modèles pour bien les résoudre. Ils sont particulièrement développés dans les zones de fort courant comme le Gulf Stream, le Kuro Shio et le courant des Aiguilles qui méandrent et sinuent entre les tourbillons qu'ils génèrent (figure 4).

UNCLASSIFIED: 1/32° Global NLOM  
SSH ANALYSIS: 20120914



UNCLASSIFIED: 1/32° Global NLOM  
CURRENT/SPEED LAYER 1 ANALYSIS: 20120914



(b)

Figure 4 – Méandres et tourbillons dans le Gulf Stream ; (a) la topographie de surface (cm) ; tourbillons anticycloniques en noir/rouge (surélévation) ; tourbillons cycloniques en bleu/vert (sous élévation). La dénivellation est d'environ 80 cm entre les deux types de tourbillons. (b) vitesse des courants (m/s).



### 3. L'élévation actuelle du niveau de la mer

Le niveau de la mer est l'un des meilleurs indicateurs du changement climatique actuel. En effet, les variations du niveau de la mer résultent des changements intervenant dans les différents compartiments du système climatique de la Terre en réponse à la variabilité climatique interne, ainsi qu'aux forçages naturels et anthropiques. Ces derniers incluent la contribution du réchauffement de l'océan, de la fonte des glaces terrestres et des changements dans le stockage de l'eau dans les bassins fluviaux continentaux.

Au cours du 20<sup>ème</sup> siècle, la marégraphie a été la seule technique permettant d'observer directement les variations du niveau de la mer. Toutefois elle ne mesure que la variation relative du niveau de la mer par rapport à la côte (les mouvements verticaux de la croûte terrestre sont aussi enregistrés par les marégraphes) et la couverture des mesures in situ est limitée aux côtes continentales et aux îles.

Depuis près de 30 ans, les variations du niveau de la mer sont mesurées en routine à l'échelle mondiale et régionale par une série de missions d'altimétrie spatiale de haute précision (les missions franco-américaines Topex/Poseidon, Jason-1, 2 et 3, la mission franco-indienne Saral/AltiKa et les missions de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) ERS-1 & 2, Envisat et Sentinel-3A & B). En plus de fournir des informations précieuses sur la circulation océanique à grande et moyenne échelle, l'altimétrie spatiale permet de mesurer la hausse du niveau de la mer avec une précision sans précédent et une couverture globale du domaine océanique. La figure 1 montre cette évolution depuis janvier 1993 jusqu'à aujourd'hui. Une élévation moyenne de  $3.2 \pm 0.3$  mm par an est observée, mais ce qui frappe c'est la nette accélération du phénomène.

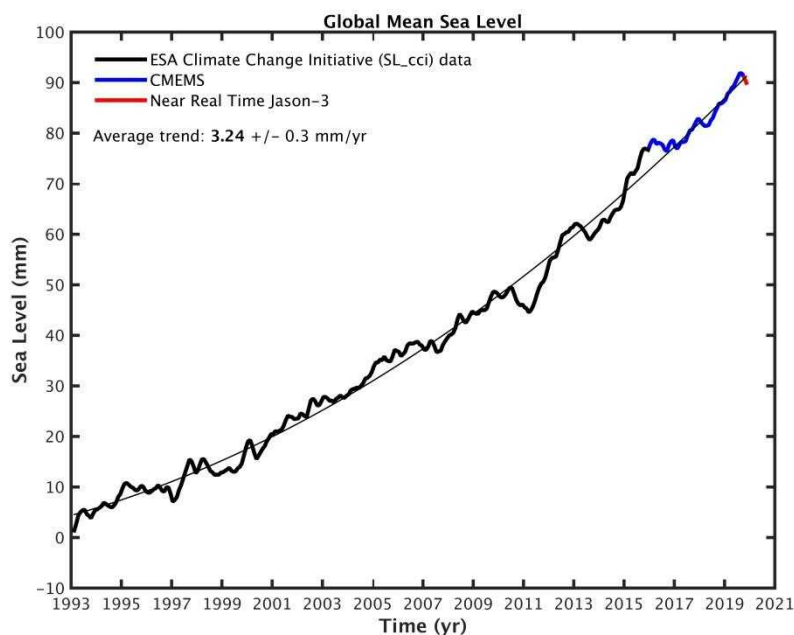


Figure 1 : Evolution du niveau moyen global de la mer mesurée par les satellites altimétriques depuis 1993. La courbe noire fine illustre l'accélération de la hausse de la mer (Source : LEGOS).

La principale cause de l'élévation actuelle du niveau moyen de la mer est le réchauffement de l'océan via la dilatation thermique de l'eau de mer, et la fonte des glaces continentales (glaciers, Groenland et Antarctique) en réponse au réchauffement climatique lié aux activités humaines.

Nous avons maintenant à notre disposition différents systèmes d'observation qui permettent de quantifier ces différentes contributions. Le système international Argo de flotteurs automatiques fournit des mesures de température et de salinité de l'océan jusqu'à 2000 m de profondeur, avec une couverture presque globale. La mission de gravimétrie spatiale GRACE quant à elle, permet de mesurer les redistributions des masses d'eau en surface, notamment celles liées à la fonte des glaciers et des calottes polaires. GRACE fournit aussi des informations sur les variations des stocks d'eau sur les continents, dues par exemple au pompage de l'eau dans les nappes profondes pour l'irrigation des cultures ou à la construction de barrages sur les fleuves. D'autres techniques spatiales comme l'interférométrie radar et l'altimétrie radar et laser sont également utilisées pour estimer les pertes de masse de glace des calottes polaires. La figure 2 illustre les différentes contributions à la hausse actuelle de la mer et compare leur somme au niveau de la mer observé.

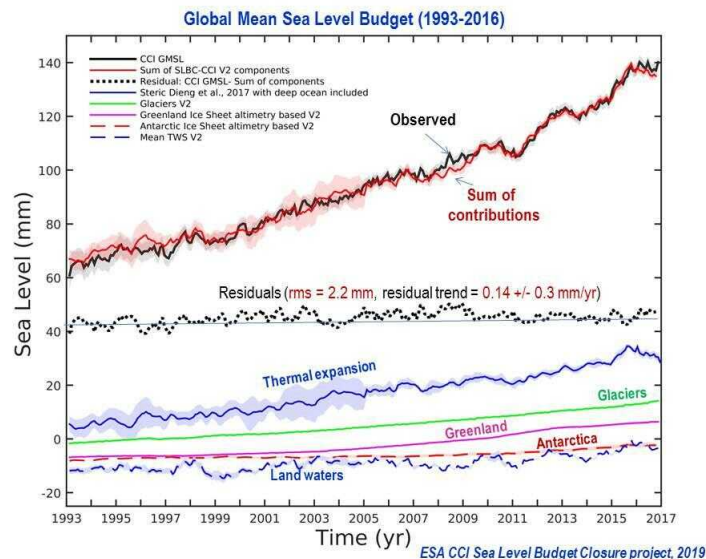


Figure 2: Contributions de l'expansion thermique de l'océan, de la fonte des glaciers, du Groenland et de l'Antarctique, ainsi que des variations des stocks d'eau sur les continents à l'élévation actuelle du niveau moyen global observé par altimétrie. (Source : projet ESA Climate Change Initiative "Sea level Budget Closure"; <http://www.esa-sealevel-cci.org/>)

On estime que depuis 1993, l'expansion thermique de l'océan et les glaciers de montagne ont contribué chacun pour environ 30% à la hausse de la mer, les 40% restants étant dus à la perte de masse de glace du Groenland et de l'Antarctique. Ainsi la fonte des glaces continentales est aujourd'hui la contribution dominante à la hausse de la mer.

L'étude du bilan niveau de la mer est importante car elle impose des contraintes sur les contributions manquantes ou mal connues telles que l'océan profond sous-échantillonné par le système Argo. C'est aussi une manière utile de valider les modèles de climats développés pour simuler le climat du futur, en particulier l'élévation du niveau de la mer au cours des prochaines décennies.

L'altimétrie spatiale a également révélé une forte variabilité régionale du taux d'élévation du niveau de la mer (Figure 3). Dans certaines régions telles que le sud de l'Atlantique, le Pacifique et l'Océan Indien, ou encore le Pacifique tropical ouest et nord-ouest, la hausse est plus de 2 fois plus rapide que la hausse moyenne.

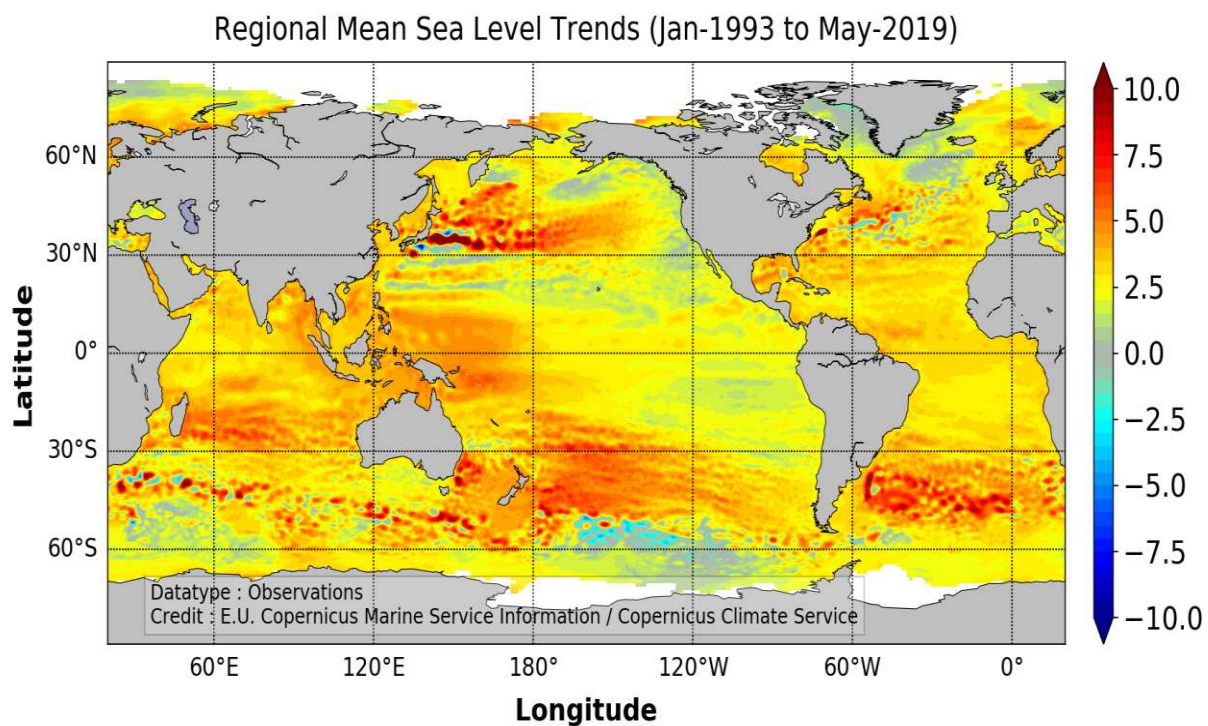


Figure 3 : Disparités régionales des vitesses d'élévation de la hausse de la mer entre 1993 et 2019 mesurées par altimétrie spatiale (Source : Copernicus Marine and Climate Services)

Cette hausse non uniforme de la mer résulte principalement de l'expansion thermique non uniforme de la mer, certaines régions stockant plus de chaleur que d'autres en réponse à des redistributions de la chaleur par la circulation océanique et aux échanges directs avec l'atmosphère. Dans certaines régions les variations de salinité jouent aussi un rôle important.

À l'échelle locale, en particulier dans les zones côtières, des processus de petite échelle se superposent aux composantes du niveau moyen global du niveau de la mer et à sa variabilité régionale. Il peut en résulter que la hausse de la mer à la côte s'écarte sensiblement de la hausse observée au large. Parmi ces phénomènes, on peut citer les courants côtiers à petite échelle, ainsi que l'apport d'eau douce dans les estuaires fluviaux qui modifient la densité de l'eau, donc le niveau de la mer près des côtes. Les changements de l'intensité du vent et des vagues, de la profondeur du plateau continental et des stocks de sédiments le long des côtes peuvent aussi modifier les variations du niveau de la mer dans les zones littorales par rapport à l'océan du large. De plus, les mouvements verticaux de la croûte terrestre, notamment s'il s'agit de l'enfoncement du sol, peuvent amplifier la hausse de la mer dans les zones côtières. Contrairement au niveau moyen global et régional de la mer mesuré par les missions d'altimétrie spatiale, les variations du niveau de la mer dans les zones côtières restent encore mal connues. Les zones côtières sont en effet fortement sous-échantillonnées par les marégraphes et les missions d'altimétrie conventionnelles en raison –pour ces dernières- de la contamination des terres émergées dans le signal radar. Cependant, un retraitement dédié des données de ces missions permet désormais d'estimer la variation du niveau de la mer très proche de la côte. De plus, dans un avenir proche, l'utilisation systématique des nouvelles technologies altimétriques mises en œuvre dans les récentes missions de l'ESA (par exemple, CryoSat-2 et Sentinel-3) ou encore dans la future mission SWOT développée par le CNES et la NASA, permettra d'estimer systématiquement les changements du niveau de la mer au plus près de la côte, avec une couverture mondiale. De telles observations auront un intérêt majeur pour l'adaptation à la hausse de la mer dans les régions côtières basses de la planète où vit actuellement plus de 10% de la population mondiale.

# L'exploitation de la biomasse

Philippe Cury

*Une mer qui se vide de ses poissons.*

*Est-ce que la mer se vide de ses poissons ? Pourquoi y a-t-il autant de poissons dans nos poissonneries alors que l'on prétend que les mers se dépeuplent ? Est-ce que l'aquaculture va remplacer la pêche ? À l'heure où de nombreux problèmes de sécurité alimentaire se posent dans un monde en pleine évolution, il convient de mieux comprendre le futur de la pêche en mer.*

## **1. La pêche : notre dernière activité de prélèvement d'une ressource sauvage à l'échelle industrielle**

Autrefois les ressources halieutiques paraissaient tellement abondantes et les poissons tellement prolifiques qu'il était impensable que les pêcheries puissent entamer la manne océanique. L'immense productivité des océans fascinait les esprits. Les ressources marines semblaient se régénérer instantanément et les océans ressemblaient à de véritables cornes d'abondance. Dans *L'Histoire naturelle des animaux* (1756), Arnault de Nobleville et Salerne décrivent l'abondance des harengs en termes imagés : « On peut dire que leur nombre est véritablement infini, c'est-à-dire qu'il surpasse tous les nombres connus; et quelque dénombrement qu'on en voulût faire, on ne pourrait dire autre chose sinon que leur quantité surpasse celle des étoiles visibles et télescopiques du firmament ». L'homme semblait flotter entre deux mondes infinis, celui des cieux et celui des océans, qu'il avait pour projet de conquérir. Le temps des grandes expéditions débutait. Les navigateurs, au cours de leurs longs périple à travers les océans voyaient de véritables « murs » de poissons ou encore des hordes de baleines, réveillant les imaginations. Daubenton dans *l'Encyclopédie* (1751-1772) consacre aussi une longue rubrique aux harengs, où il souligne déjà que la pêche ne prélève qu'une partie infimes de ces immenses populations que recèlent les mers: « Quoique les pêcheurs prennent une très grande quantité de harengs, on a calculé que la proportion du nombre des harengs pris par tous les pêcheurs dans leur route est au nombre de toute la troupe lorsqu'elle arrive du Nord, comme un est à un million ; et il y a lieu de croire que les gros poissons tels que les marsouins, les chiens de mer, en prennent plus que tous les pêcheurs ensemble. » Les ressources étaient inépuisables et l'action de l'homme marginale. De plus toutes ces myriades de poissons, petits ou grands, semblaient tellement féconds et produisaient tellement d'œufs que certains auteurs y voyaient une menace directe pour la mer ; les pays devaient combattre les envahisseurs en développant la pêche. Un peu comme il faut supprimer des cafards qui pullulent et pourrissent les aliments, les poissons devaient être pourchassés pour maintenir la salubrité des mers. Il y a dans les écrits de Michelet une sorte de stupéfaction, presque d'effroi, devant les énormes quantités de harengs. Leur fécondité lui apparaissait tellement monstrueuse qu'« ils arriveraient en fort peu de générations à combler, solidifier l'océan, ou à le putréfier, à supprimer toute race et à faire du globe un désert ». Sans détour Michelet assimilait les océans à la grande femelle du globe.

On retrouve ce type de stéréotype porté à son paroxysme dans le *Grand Dictionnaire de Cuisine* d'Alexandre Dumas (1871) : « On a calculé que si aucun accident n'arrêtait l'éclosion de ces œufs et si chaque cabillaud venait à sa grosseur, il ne faudrait que trois ans pour que la mer fût comblée et que l'on pût traverser à pied sec l'Atlantique sur le dos des cabillauds. » L'homme avait trouvé des arguments pour légitimer la conquête des océans.

## **2. La pêche : pour combien de temps encore ?**

Cette perception passée contraste singulièrement avec la situation actuelle. Le temps des ressources finies produites par les océans est devenu au cours des cinquante dernières années une réalité de plus en plus contraignante dans un monde qui consomme toujours plus de poissons.

Les années cinquante ont marqué le début d'une croissance très rapide de l'activité de pêche qui s'est accompagnée d'une augmentation des captures, tellement élevée que leur tendance excédait l'accroissement de la population humaine. En l'espace de deux décennies, la production mondiale des pêches marines et continentales a été multipliée par trois, passant ainsi de 18 millions de tonnes en 1950 à 56 millions de tonnes en 1969. Durant ces années de « pêche miraculeuse », l'expansion des pêches s'est poursuivie. Par la suite, au cours des années soixante-dix et quatre-vingt, le taux moyen d'accroissement est tombé à 2 % par an et pratiquement à zéro depuis les années quatre-vingt-dix, alors que le nombre de bateaux et leur efficacité n'ont cessé d'augmenter. Que les pêcheries exercent leur activité dans l'Hémisphère nord ou dans les eaux tropicales, qu'elles soient industrielles ou artisanales, le constat est le même : les pêcheries mondiales ont atteint le maximum de leur potentiel et selon les Nations unies (FAO 2012) 87 % des populations de poissons sont maintenant pleinement exploités à surexploités. On n'enregistre plus de développement des pêcheries et le seuil des captures est aujourd'hui atteint.

La pêche continue de jouer un rôle essentiel en nourrissant plus d'un milliard d'êtres humains. De plus la demande par habitant en poisson s'accroît à un rythme soutenu. L'appétit croissant pour le poisson fait peser une pression toujours plus forte sur les ressources sauvages et pose la question de la durabilité de l'exploitation des ressources marines. Depuis les années soixante, les disponibilités par habitant de poissons et de produits de la pêche ont pratiquement doublé (la consommation moyenne mondiale atteint aujourd'hui 19 kg par personne et par an), gagnant ainsi de vitesse la croissance démographique, qui a également plus que doublé au cours de la même période. Dans les PFRDV (Pays à Faible Revenu et à Déficit Vivrier), où la consommation actuelle de produits de la mer est proche de la moitié de celle des pays les plus riches, la contribution du poisson à l'apport total en protéines animales est considérable, voisine de 20%. Dans certains pays à forte densité de population, insulaires ou côtiers, les protéines de poisson contribuent de façon décisive au régime alimentaire, fournissant un pourcentage d'au moins 50% du total protéique (Bangladesh, Corée du Nord, Ghana, Guinée, Indonésie, Japon, Sénégal, etc.). Le poisson est la denrée alimentaire la plus échangée au niveau mondial (40% des captures).

Ainsi L'Europe qui a surexploité ses eaux côtières dès le début du XX<sup>e</sup> siècle importe aujourd'hui 65% des produits marins qu'elle consomme. Si nos poissonniers sont bien achalandés c'est parce que les produits de la mer sont produits par d'autres pays, ceux du sud notamment qui ont de moins en moins accès aux poissons devenus trop chers.

Les limites de l'exploitation halieutique se profilent à l'échelle de la planète et la compétition pour l'exploitation d'une ressource accessible a entraîné la «course au poisson» et la surexploitation. Au niveau de nos mers européennes, la grande majorité des stocks de poissons sont surexploités, ainsi les captures sont ainsi passées de sept millions de tonnes à quatre millions de tonnes au cours des vingt dernières années. Ce ne sont pas seulement le surplus (les intérêts) produit par les populations marines qui ont été prélevées mais également le stock reproducteur (le capital). La technologie qui a permis d'améliorer la vie en mer et l'efficacité de pêche des bateaux est devenue en très peu de temps un problème récurrent au niveau planétaire : il y a trop de bateaux de pêche suréquipés (les moyens de localisation comme les GPS ou de repérage du poisson comme les sonars et échosondeurs) qui sont devenus trop efficaces pour des ressources halieutiques qui ne cessent de se raréfier. Il y aurait aujourd'hui trois à quatre fois trop de bateaux suréquipés pour des stocks de poissons devenus trop rares. L'activité de pêche ne détruit pas seulement les habitats, mais également la biodiversité, en privilégiant des engins de pêche peu sélectifs comme les chaluts (large filet traîné sur les fonds détruisant la flore et la faune benthiques inféodées au fond) qui rejettent annuellement plusieurs dizaines de millions de tonnes de poissons, de crustacés ou d'autres animaux aquatiques non commercialisables. Le coût annuel de cette surexploitation au niveau mondial est abyssal. La destruction de la richesse économique pour l'exploitant et au niveau de la communauté est estimée à 51 milliards de dollars alors que le produit de la pêche est de l'ordre de 85 milliards de dollars selon le rapport de la Banque mondiale. Les subventions sont également disproportionnées et souvent sans effet pour corriger les problèmes des pêcheries. En France les subventions destinées au secteur depuis ces trois dernières décennies sont comparables à la valeur des débarquements annuels. Elles n'ont pas résolu les problèmes structurels du secteur mais, au contraire, n'ont fait qu'engendrer les crises récurrentes du secteur. La rentabilité de l'activité de pêche est devenue problématique et il est difficile d'envisager un futur pour ce secteur d'activité.

### **3. Les effets indirects de la pêche sur la biodiversité marine**

La pêche a un impact fort sur les espèces qu'elle cible. Mais les effets indirects sur les autres composantes de l'écosystème apparaissent comme importants. Car c'est bien l'ensemble de l'écosystème marin qui est potentiellement touché par la pêche.

Certains modes de pêches ont des effets sur l'habitat des espèces marines, exploitées ou non. Le chalutage contribue par exemple à la destruction de l'habitat benthique (de fond). Annuellement, les surfaces couvertes par le chalutage sont estimées à la moitié de la surface des plateaux continentaux. Cette surface représente 150 fois la surface de déforestation annuelle en milieu terrestre et illustre l'ampleur de l'impact potentiel sur les nombreuses espèces sédentaires. Il existe également des effets de la pêche sur des espèces non ciblées. Les pêcheries ciblent généralement des espèces d'intérêt commercial, à l'aide d'engins sélectifs et/ou par l'exploitation de zones et de saisons adaptées. Cependant, la sélection est loin d'être parfaite. Les rejets en mer de captures d'espèces accessoires (car sans ou ayant peu d'intérêt commercial) sont très élevés et représentent 27 millions de tonnes (soit environ 30% des captures déclarées). La commission Baleinière internationale estime entre 65 000 et 80 000 le nombre de dauphins, phoques et autres mammifères marins qui périssent ainsi chaque année. Environ 40 000 tortues marines en danger ou menacées d'extinction sont prises dans les filets ou autres engins non-sélectifs. Un autre exemple marquant mais non isolé est celui des pêcheries de crevettes ou de crabes qui prélèvent environ trois à dix fois leur volume en espèces de poissons non désirables commercialement. Pour un kilogramme de crevettes pêchées, il faudra rejeter en moyenne cinq à dix kilogrammes de prises accessoires!

Ces pratiques d'exploitation des ressources marines sont de plus en plus condamnables dans un contexte de protection de la biodiversité et n'apparaissent plus adaptées aux exigences de conservation des populations naturelles.

Une évolution qualitative essentielle des captures de pêche montre les effets que peut engendrer la pêche sur l'ensemble de l'écosystème : les poissons de petite taille et situés en début de chaîne trophique constituent une part croissante des captures. On trouve de plus en plus de sardines, d'anchois, de harengs et d'autres petits poissons pélagiques dans les filets des pêcheurs et de moins en moins de grands poissons tels que les morues, flétans, colins, etc. Ce phénomène n'est pas lié au fait que les pêcheurs ciblent davantage les petits poissons, bien au contraire. Les pêcheurs ciblent le plus souvent les poissons carnivores de grande taille, situés en haut de la chaîne trophique car ceux-ci ont une valeur commerciale élevée. Au Canada, où la morue semble bel et bien avoir disparu depuis 1992, date de son effondrement, l'écosystème est aujourd'hui dominé par des poissons pélagiques et d'autres espèces situées plus bas dans la chaîne trophique, notamment les crevettes et les crabes. Il y a quelques décennies, on pouvait encore pêcher des flétans de trois mètres et des morues de deux mètres. Aujourd'hui, leur taille dépasse rarement le mètre et plus souvent seulement quelques décimètres. Cette diminution de taille des poissons dans les captures est un des symptômes clairs de la surexploitation généralisée des stocks de poissons : les tailles des poissons diminuent et les océans renferment en majorité des poissons juvéniles. Les scientifiques commencent à mesurer l'ampleur de ce phénomène. Les connaissances du fonctionnement du milieu marin, même si elles sont incomplètes, laissent présager que la diminution massive de ces espèces prédatrices en moyenne de 87% (requins, marlins, espadons, mammifères marins, tortues marines...) aura des conséquences importantes sur l'ensemble des écosystèmes marins en bouleversant leur structure et leur fonctionnement. Dominés par des espèces de petite taille et à courte durée de vie, les écosystèmes deviennent beaucoup plus tributaires des variations climatiques.

Comme les poissons prédateurs deviennent rares les poissons fourrages qui constituent leur nourriture sont convoités par les pêcheurs. Aujourd'hui plus de 37% des captures mondiales sont composées de ces petits poissons qui sont transformées en farine et huiles pour l'alimentation animale. Ainsi sardines, anchois, maquereaux, sprats, ou bien krill (des petites crevettes) qui servent de nourriture à l'ensemble des prédateurs marins deviennent à leur tour surexploitées. Oiseaux, mammifères marins mais aussi les gros poissons se nourrissent de ces espèces qui sont le véritable 'fuel' des écosystèmes. Après les gros poissons ce sont les petits poissons qui sont surexploités avec des conséquences importantes sur le fonctionnement des écosystèmes. En Namibie par exemple, un des écosystèmes les plus productifs à l'échelle mondiale, la population de sardines qui avait atteint 10 millions de tonnes dans les années soixante a été surexploitée et s'est effondrée dans les années soixante-dix. L'abondance est devenue négligeable et les prédateurs marins comme les oiseaux (manchots ou encore les fous du Cap) sont morts de faim. Les populations d'oiseaux ont ainsi vu leur effectif diminuer de plus de 80% en moins de trois décennies et sont aujourd'hui en danger. L'écosystème a basculé dans un autre type de fonctionnement (on appelle ce basculement « un changement de régime » en écologie, ou « regime shift » en anglais) et les méduses se sont mises à proliférer. Aujourd'hui l'abondance des méduses entre 12 à 20 millions de tonnes représente 2,5 fois celle des poissons. Les pêcheurs namibiens n'exploitent pas les méduses et doivent attendre des jours meilleurs où les poissons reprendront le dessus. Cependant personne ne connaît à ce jour combien de temps cela pourra prendre pour redonner à cette zone marine sa grande productivité en poissons.



Certains chercheurs n'hésitent pas à dire que si ces tendances lourdes se poursuivent les pêcheries fermeront les unes après les autres et la pêche en milieu marin deviendra une activité récréative à l'aube de 2048 (Worm *et al.*, 2006), à l'instar de ce qu'est devenue la chasse en milieu terrestre il y a 2000 ans. Certains politiques confient volontiers que ce secteur d'activité est voué à une fin programmée. Les ressources sont surexploitées, le bilan économique des pêches est critique et les pêcheurs de nombreux pays sont aujourd'hui très inquiets de leur avenir lié à des océans qui se vident de leurs ressources. Les espoirs se tournent naturellement vers l'aquaculture, comme il y a 2000 ans nous nous sommes tournés vers l'agriculture.

#### **4. L'aquaculture au secours de la pêche ?**

La situation préoccupante des pêches et son futur incertain laissent penser que l'aquaculture pourrait combler l'écart grandissant entre l'offre et la demande en produits de la mer ; l'aquaculture comme un remède à la surpêche pour nourrir le monde. La croissance de la production aquicole a en effet suivi une tendance inverse à celle de la pêche. À partir d'une valeur insignifiante, la production totale de l'aquaculture a progressé d'environ 5% par an dans les années cinquante à plus de 10% par an depuis 1990. En un demi-siècle, ou presque, l'aquaculture qui était une activité quasiment anecdotique est devenue comparable à la pêche pour ce qui est de sa contribution à la production alimentaire mondiale. La production aquicole mondiale a atteint un nouveau pic historique en 2010, avec 60 millions de tonnes produites, en Asie tout particulièrement.

Cependant, malgré l'accroissement important de ce secteur ces dernières années, des observations suggèrent que le potentiel de l'activité aquicole pourrait atteindre ses limites dans un avenir proche. Pour préserver son potentiel et assurer son développement futur, les pratiques modernes de l'aquaculture, sa gestion et la recherche associée doivent impérativement prendre en compte un certain nombre de problèmes actuels liés à l'intensification de la production aquicole, telles que la gestion de la santé des animaux aquatiques (maladies, fort taux de parasitisme), la qualité et l'innocuité des produits de l'aquaculture, la préservation de l'environnement (dégradation critique des habitats, introduction d'espèces, pollution). De plus, l'aquaculture est un très gros consommateur de ressources aquatiques. En Europe et en Amérique du Nord par exemple, la production aquicole est développée pour la production d'espèces à haute valeur commerciale, destinées à la consommation des pays riches, qui sont pour la plupart des espèces carnivores, comme le saumon, les daurades, les bars, les thons rouges... Or, ces espèces sont nourries à partir de petits poissons pélagiques (sardine, anchois, hareng, etc.) et requièrent trois à dix fois plus de nourriture (farines et huiles de poissons) qu'ils ne produisent de biomasse. Autant de nourriture potentielle issue de la pêche qui pourrait être dédiée à la consommation humaine. Ce type d'aquaculture ne peut raisonnablement pas subvenir aux besoins des régions les plus défavorisées.

Pour pallier aux besoins grandissant et qui seront nécessaires à l'alimentation humaine il faudra se résoudre à développer simultanément une aquaculture durable de poissons herbivores et gérer l'exploitation des ressources renouvelables marines de manière soutenable.

#### **5. Vers une pêche responsable et durable**

Dans un objectif d'incitation à une démarche de précaution et dans un véritable effort de construction de la pêche de demain, la FAO (Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture) a jeté les bases d'une approche écosystémique des pêches. En établissant le code

de conduite pour des pêches responsables en 1995, une dimension nouvelle est apparue avec le principe de précaution appliqué aux pêcheries. Il s'agit en l'occurrence d'une tentative affichée de concilier conservation et exploitation. Il ne s'agit pas de rejeter l'activité de pêche en tant que telle mais de responsabiliser les pêcheurs et instances décisionnelles dans l'exploitation des ressources renouvelables marines : le devenir de l'activité de pêche dépend largement de l'état de santé des écosystèmes marins. Avec la déclaration de Reykjavik en 2001, qui a ensuite été avalisée durant le Sommet mondial sur le développement durable à Johannesburg en 2002, les États se sont engagés à respecter un cadre international et un agenda pour lequel des objectifs de conservation et d'exploitation sont désormais fixés ([www.fao.org](http://www.fao.org)).

Reste à savoir si les gouvernements intégreront dans leur législation la responsabilisation des pêcheries prônée par les Nations unies, à l'heure où une gestion responsable et précautionneuse de la pêche est un minimum requis pour assurer la viabilité de la ressource et de son exploitation. Si, faute de ressources, les pêches maritimes ne veulent pas devenir une activité ludique à l'instar de la chasse, il faudra réduire le nombre de bateaux et leur activité, reconstituer les nombreux stocks de poissons qui se sont effondrés et concilier conservation et exploitation, c'est-à-dire rendre les pêcheries plus respectueuses de leur environnement. Plusieurs pays (par exemple l'Australie, l'Afrique Du Sud ou la Nouvelle Zélande) ont montré qu'une gestion écosystémique effective de leurs ressources marines permet aux pêches locales de maintenir les emplois tout en conservant l'état de santé et la productivité des océans. Il s'agit d'une vision partagée d'une société désirable qui ne considère pas la pêche comme une série de razzias mais comme une activité renouvelable.

## Références

Banque mondiale (2008). *The sunken billions: the economic justification for fisheries reform*. The world Bank, Washington DC.

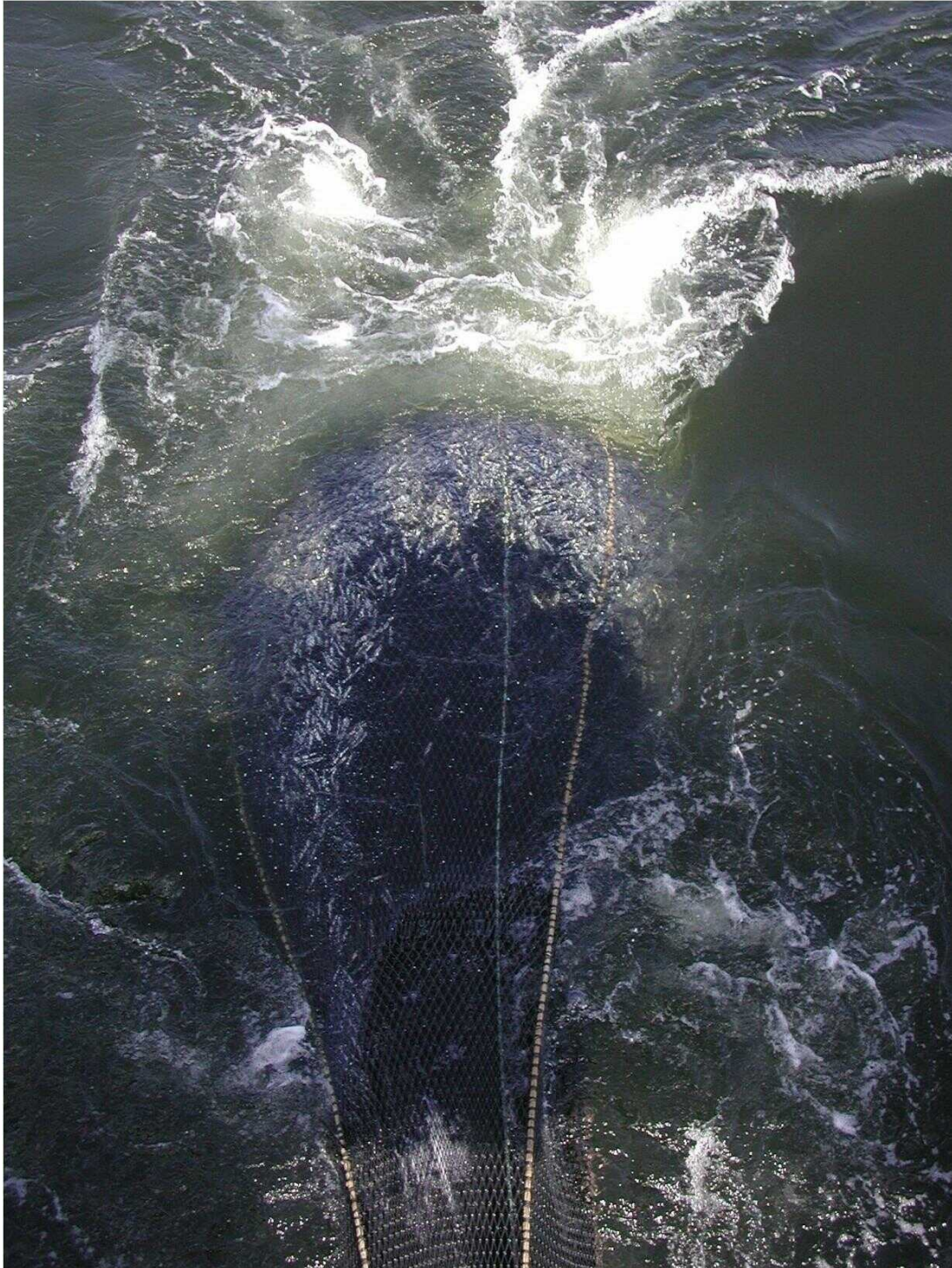
Cléach M.P. (2008). *Marée amère : pour une gestion durable de la pêche*. Les rapports de L'OPECST. 175pp ([www.senat.fr/noticerap/2008/r08-132-notice.html](http://www.senat.fr/noticerap/2008/r08-132-notice.html)).

Cury P. et Miserey Y. (2008). *Une mer sans poissons*. Calmann-Levy.

FAO (2012). *La situation mondiale des pêches et de l'aquaculture, 2012* (<http://www.fao.org/fishery/sofia/fr>).

Académie des sciences (2003). *Exploitation et surexploitation des ressources marines vivantes*. Rapport sur la science et la technologie, n° 17, Tec&doc, Paris.

Worm *et al.* (2006). Impacts of biodiversity loss on ocean ecosystem services. *Science*, **314** : 787-790.



Remontée d'un chalut pélagique servant à échantillonner les poissons pélagiques (anchois dans ce cas) lors d'une campagne océanographique. Cette campagne conjointe entre l'Institut de la mer du Pérou (IMARPE) et l'IRD avait pour but d'étudier le comportement des bancs de poissons en fonction de leur environnement décrit des points de vue biotique et abiotique.





Fou du Cap, *Morus Capensis*.



Cormorant Guanay, *Phalacrocorax*.