



# Désoxygénation des océans : le problème de chacun

**Causes, impacts, conséquences et solutions**

**Résumé à l'attention des décideurs**





# INTRODUCTION

Un plus grand nombre de personnes ont posé le pied sur la surface de la Lune que celles ayant exploré la partie la plus profonde des océans. Pourtant, les 7,7 milliards de personnes qui vivent sur Terre dépendent d'un océan en bonne santé, qu'elles le sachent ou non. L'océan représente 97% de l'espace physique habitable de la planète et joue un rôle central dans le maintien de la vie sur Terre. C'est le célèbre astronome américain Carl Sagan, contemplant la Terre comme un « point bleu pâle » sur la photo la plus éloignée jamais prise de la planète, à plus de 6 milliards de kilomètres de distance, par la sonde spatiale Voyager 1 dans les années 1970, qui a résumé la situation en disant :



Terre - un point bleu pâle © NASA / JPL-Caltech

*« .....C'est notre maison.  
C'est chez nous. C'est là que  
vivent tous ceux que vous  
aimez, tous ceux que vous  
connaissez, tous ceux dont  
vous avez entendu parler, et  
où tout être humain qui n'ait  
jamais existé a vécu. »*

Il est donc surprenant que nous n'ayons pas encore pris conscience de l'incidence total de nos activités sur l'océan vital qui domine et colore notre monde, vu de loin. Le Rapport spécial de 2019 du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC) sur l'océan et la cryosphère dans le contexte du changement climatique<sup>1</sup> met en garde contre les changements que nous avons provoqués. Dans la même ligne que cette publication du GIEC, le présent rapport sur la désoxygénation des océans participe d'un effort mondial et urgent de sensibilisation visant à susciter une action ambitieuse, rapide et décisive.

Étonnamment, ce n'est que depuis les années 2000 que des efforts considérables et spécifiques ont été déployés pour mieux faire connaître et comprendre les conséquences des émissions de gaz à effet de serre sur les océans. Nous savons maintenant que le dioxyde de carbone émis par les activités humaines conduit les océans vers des conditions plus acides, phénomène connu sous le nom d'acidification des océans. Ce n'est qu'au cours de la dernière décennie que l'on a commencé à reconnaître de que la température mondiale des océans est également affectée de manière significative par les effets que le dioxyde de carbone et autres gaz à effet de serre puissants ont sur l'atmosphère terrestre. Environ 93% du réchauffement atmosphérique potentiel causé par les émissions depuis le milieu du XXe siècle a été absorbé par les océans, générant un phénomène d'augmentation de la température de ceux-ci, que l'on pourrait mieux décrire aujourd'hui, du fait de l'ampleur du phénomène, comme le réchauffement des océans. La prise de conscience de ces deux phénomènes, en plus des préoccupations existantes telles que la surpêche, la pollution et la destruction des habitats, a commencé à susciter de vives inquiétudes quant aux impacts sur la biodiversité marine et la fonctionnalité de l'océan dans son ensemble, ainsi que sur la façon dont ceci pourraient avoir des répercussions sur les conditions météorologiques, l'agriculture et l'approvisionnement en eau, avec des conséquences pour les populations humaines, partout dans le monde.

Ce résumé et le rapport technique complet qui l'accompagne<sup>2</sup> montrent que le réchauffement et l'acidification progressive de l'eau de mer sont loin d'être les seules conséquences mondiales majeures des émissions de gaz à effet de serre pour le domaine marin. On sait depuis quelques décennies que le ruissellement de nutriments provenant de l'agriculture entraîne la formation de zones dépourvues d'oxygène dans la mer, là où l'oxygène vital est consommé dans la colonne d'eau et sur les fonds marins. Mais les causes et l'ampleur réelle des impacts de ce phénomène appelé « désoxygénation des océans » étaient jusqu'alors inconnues. Existe-t-il un lien avec le changement climatique, et

1 [https://report.ipcc.ch/srocc/pdf/SROCC\\_FinalDraft\\_FullReport.pdf](https://report.ipcc.ch/srocc/pdf/SROCC_FinalDraft_FullReport.pdf)

2 [www.iucn.org/deoxygenation](http://www.iucn.org/deoxygenation)



quelles en sont les conséquences, aujourd'hui et demain, pour les populations humaines et pour l'environnement ? Basé sur les travaux de 67 experts scientifiques représentant 51 instituts de 17 pays, le présent document constitue la plus grande étude scientifique menée à ce jour sur la désoxygénation des océans. À travers les mots des plus grands experts scientifiques du monde sur le sujet, cette étude montre de manière indéniable que les activités humaines extraient aujourd'hui l'oxygène vital des océans. La société doit prendre conscience, rapidement, de l'ampleur des changements préjudiciables que nous apportons actuellement aux systèmes de régulation de la Terre, et des efforts quasi-monumentaux qui seront nécessaires aux gouvernements et à la société pour surmonter et inverser ces effets.

Ce qui est rapporté ici et dans le rapport technique complet constitue probablement une sous-estimation de la réalité. Les données scientifiques sont incomplètes et la prise de conscience généralisée de la désoxygénation des océans commence à peine, mais ce que l'on sait est déjà très préoccupant. Ce travail devrait intéresser et préoccuper chacun de nous. Il vise à susciter un intérêt accru pour plus de recherche fondamentale, au moment où nous nous apprêtons à entrer dans la Décennie des Nations unies pour les sciences de la mer au service du développement durable (2021-2030). L'objectif de cette décennie est de soutenir les efforts visant à inverser le cycle de déclin de la santé des océans, de sorte qu'une sensibilisation accrue à la désoxygénation de ceux-ci arrive à point nommé. La Décennie des sciences de la mer prétend également rassembler les parties prenantes du secteur des océans, dans le monde entier, autour d'un cadre commun visant à garantir que les sciences de la mer pourront pleinement aider les pays à créer de meilleures conditions pour l'exploitation durable des océans.

Ce rapport sur la désoxygénation des océans est peut-être le signal d'alarme ultime nécessaire pour augmenter de manière spectaculaire nos ambitions pour faire face et réduire immédiatement nos émissions de dioxyde de carbone et autres gaz à effet de serre tels que le méthane. Ceci est nécessaire afin d'éviter que les actions humaines n'aient un impact irréversible et modifient les conditions favorables à la vie sur Terre, qui animent et soutiennent les valeurs naturelles que nous chérissons tous dans notre vie quotidienne.

## Aperçu des données disponibles sur la désoxygénation des océans

La majeure partie de la chaleur excédentaire retenue par la Terre en raison du réchauffement provoqué par les gaz à effet de serre est absorbée par les océans. La désoxygénation de l'océan se produit à toutes les profondeurs, en raison de la plus faible solubilité de l'oxygène dans les eaux plus chaudes, d'une stratification verticale plus forte (gradient de température plus prononcé) empêchant la diffusion de l'oxygène de la surface vers les profondeurs océaniques et d'une circulation plus lente en profondeur qui réduit l'apport d'oxygène vers les eaux profondes. Parallèlement, l'augmentation des apports en nutriments dans l'océan par le ruissellement fluvial et les dépôts atmosphériques favorise la prolifération d'algues, l'augmentation de la demande d'oxygène et le développement de centaines de zones côtières hypoxiques (mortes), ainsi que l'intensification des zones naturellement à faible teneur en oxygène.

- Le taux mondial d'oxygène dans les océans a diminué d'environ 2% entre 1960 et 2010.
- Les simulations des modèles océaniques prévoient une baisse supplémentaire de 1 à 7% du taux d'oxygène dissous dans les océans mondiaux d'ici 2100, causée par la combinaison d'une diminution de la solubilité de l'oxygène induite par le réchauffement et d'une ventilation réduite des profondeurs océaniques.
- Les tendances à long terme liées au changement climatique concernant l'oxygène sont masquées par la variabilité de celui-ci à différentes échelles spatiales et temporelles.
- La diminution de la teneur en oxygène des océans peut avoir des répercussions sur les cycles océaniques des nutriments et sur les habitats marins, avec des conséquences potentiellement néfastes pour les écosystèmes, les personnes qui en dépendent et les économies côtières.
- La perte d'oxygène dans les océans est étroitement liée au réchauffement et à l'acidification de ceux-ci, causés par l'augmentation du dioxyde de carbone provoquée par les émissions anthropiques, ainsi qu'aux conséquences biogéochimiques liées à la fertilisation anthropique de l'océan. Par conséquent, un effort combiné pour étudier les différents facteurs de stress constituerait la meilleure option pour comprendre les changements futurs de l'océan.

# QU'EST-CE QUE LA DÉSOXYGÉNATION DES OCÉANS ?

Alors que les actions visant à assainir les océans se sont généralement concentrées sur les impacts de pressions telles que la pêche, la pollution, la destruction des habitats, les espèces envahissantes ou le plastique, il n'existe pas de variable environnementale d'une telle importance écologique pour les écosystèmes marins et ayant changé de manière si drastique en si peu de temps à cause des activités humaines que l'oxygène dissous. La désoxygénation actuelle des océans commence à modifier progressivement l'équilibre de la vie, en favorisant les espèces tolérantes à l'hypoxie au détriment des espèces sensibles à celle-ci. La perte d'oxygène dans les océans peut être largement attribuée à deux causes principales : l'eutrophisation due au ruissellement des nutriments provenant des zones continentales et aux dépôts d'azote provenant de l'utilisation de combustibles fossiles, et le réchauffement des eaux océaniques dû au changement climatique, entraînant principalement une altération des échanges gazeux avec l'atmosphère sus-jacente et une réduction de la capacité à retenir l'oxygène soluble.

Depuis le milieu du XXe siècle, nous avons pris conscience que l'enrichissement excessif des eaux en nutriments ou en matière organique (eutrophisation) est un problème qui menace et dégrade les écosystèmes côtiers, affecte la pêche et a des répercussions sur la santé humaine dans de nombreuses régions du monde. Plus de 900 zones de l'océan côtier et des mers semi-fermées du monde ont déjà été identifiées comme subissant les effets de l'eutrophisation. Parmi elles, plus de 700 présentent des problèmes d'hypoxie, mais grâce à la gestion des surcharges en nutriments et en matières organiques sur les terres adjacentes, environ 70 (10%) d'entre elles sont maintenant considérées comme en voie de rétablissement. L'ampleur mondiale de l'hypoxie due à l'eutrophisation et les menaces qu'elle fait peser sur les services écosystémiques

sont bien documentées, mais on ne sait pas grand-chose de ses conséquences à long terme sur la santé humaine, les sociétés ou l'économie, ni de ses effets combinés à d'autres facteurs de stress océanique.

Un élément particulièrement novateur de ce rapport est l'attention supplémentaire accordée à l'effet tout récemment reconnu de la réduction d'oxygène résultant du réchauffement des océans, qui affecte aujourd'hui d'immenses zones marines. Le réchauffement de l'atmosphère résultant de l'absorption des émissions de gaz à effet de serre dans l'eau des océans est à l'origine de profonds changements dans la composition physique et biologique de la mer. Ces deux causes interagissent également entre elles, la perte d'oxygène induite par le réchauffement faisant basculer les zones côtières dans une hypoxie provoquée par l'eutrophisation et pouvant contribuer à des augmentations spectaculaires de l'hypoxie côtière. La combinaison de l'hypoxie provoquée par l'eutrophisation, qui peut être relativement facilement et rapidement inversée si des mesures adéquates sont prises, et de l'hypoxie provoquée par le réchauffement climatique, qui ne peut pratiquement pas être inversée, est à l'origine de l'émergence de la désoxygénation des océans en tant que nouveau problème d'importance mondiale.

Les activités humaines ont modifié non seulement la teneur en oxygène du littoral et de la haute mer, mais aussi diverses autres conditions physiques, chimiques et biologiques susceptibles d'avoir des effets négatifs sur les processus physiologiques et écologiques. La désoxygénation des océans n'est que la dernière conséquence de nos activités à être reconnue. Le réchauffement, la désoxygénation et l'acidification des océans sont des « facteurs de stress » majeurs sur les systèmes marins et se produisent généralement simultanément.

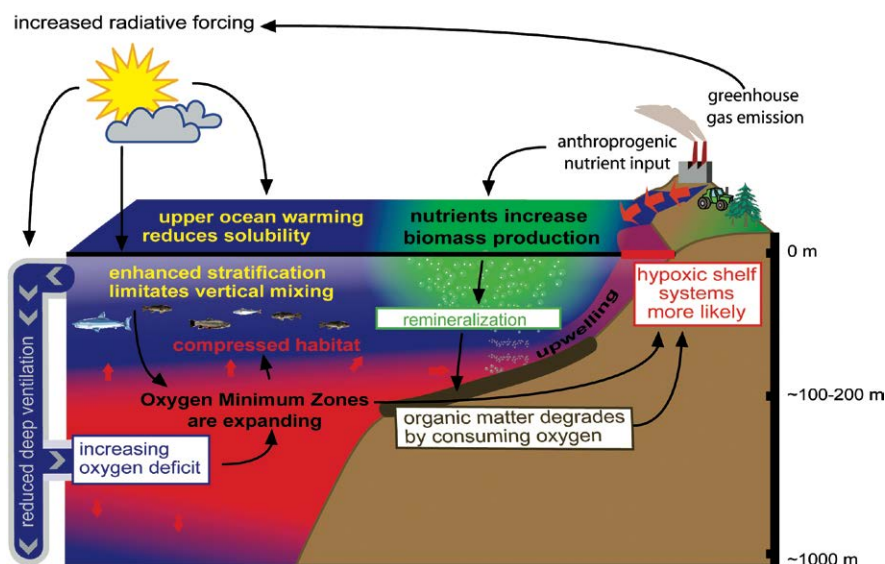
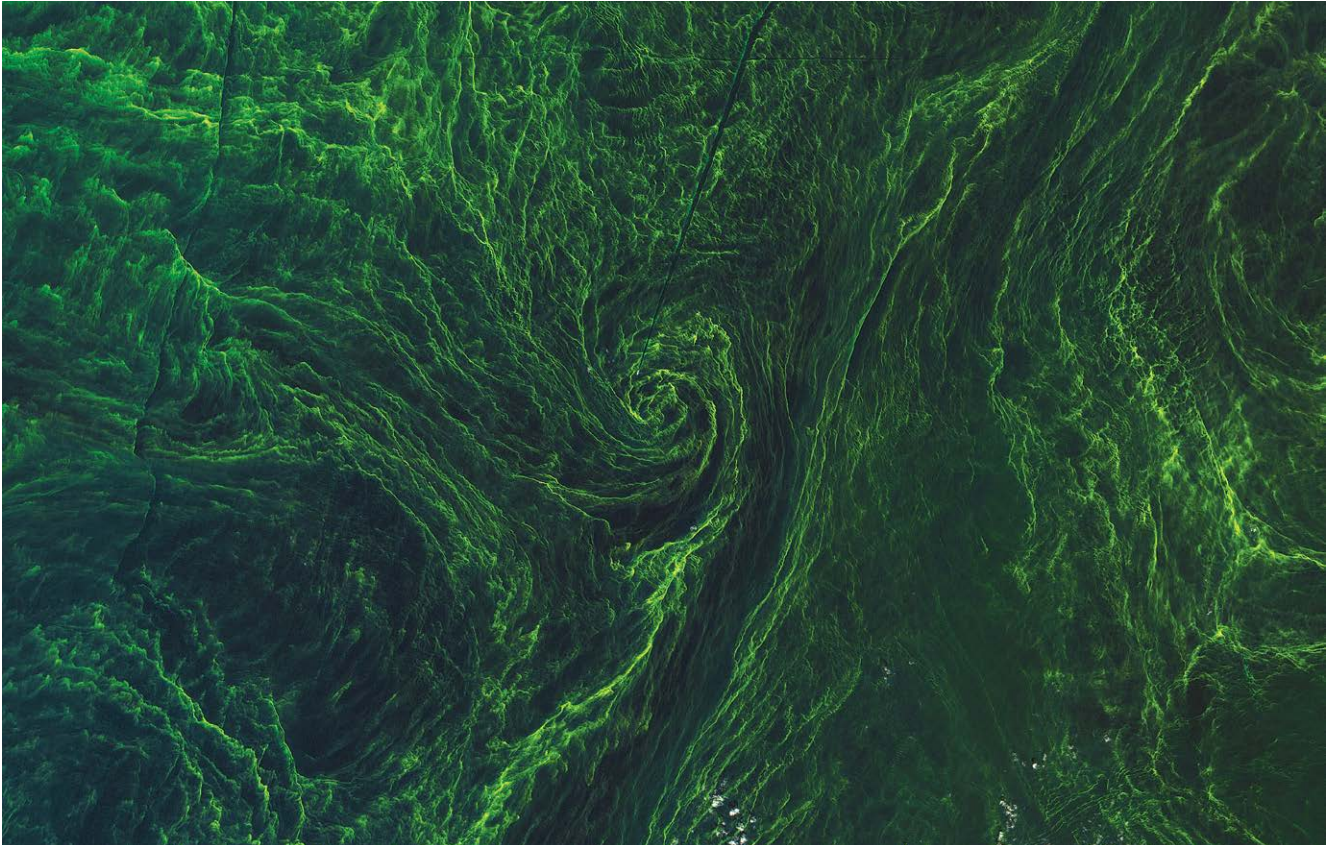


Schéma des interactions de la zone minimale d'oxygène (ZMO, en rouge) en haute mer avec le système du plateau hypoxique et les zones mortes sur les plateaux continentaux des côtes est des océans (modifié de Stramma et al., 2010).

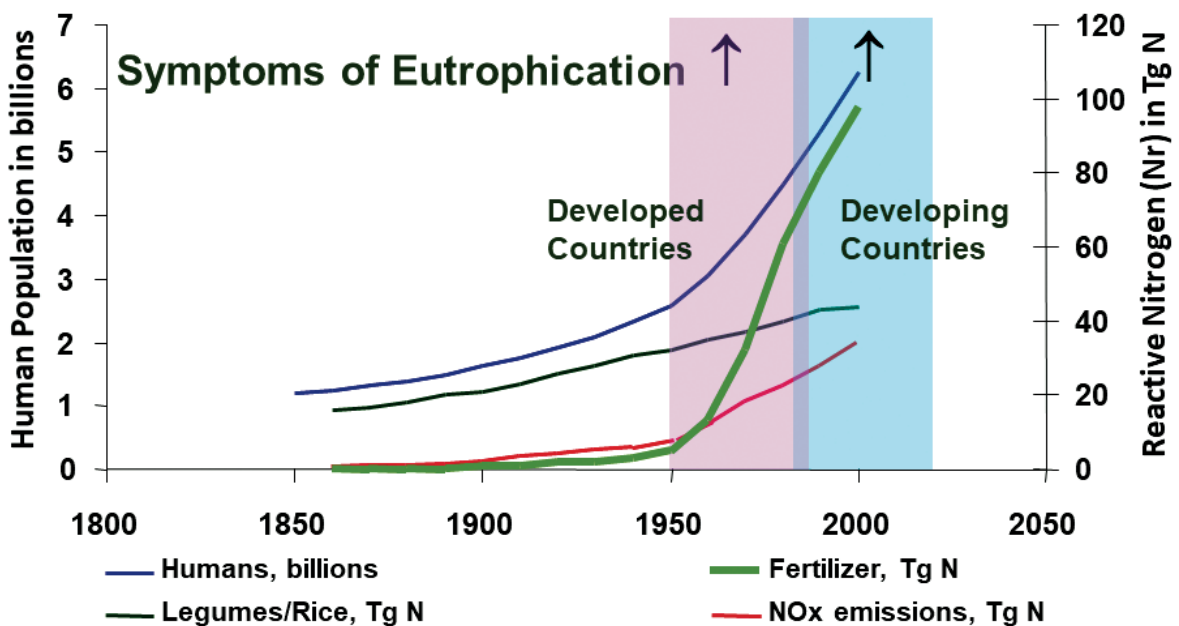




Prolifération de cyanobactéries dans la mer Baltique © lavizzara / Shutterstock.com.

ment, en raison de leur cause commune. L'augmentation des émissions de dioxyde de carbone dans l'atmosphère entraîne simultanément le réchauffement, la désoxygénation et l'acidification des systèmes marins, tandis que la pollution par les nutriments contribue à l'aggravation de la désoxygénation et de l'acidification. Par conséquent, les systèmes marins sont actuellement soumis à une pression intense et croissante en raison des effets cumulatifs de ces multiples facteurs de stress, et étant données les prévisions actuelles concernant les émissions de gaz à effet de serre, les changements dans l'océan ne feront que se poursuivre et s'intensifier. Les effets combinés de ces « facteurs de stress » peuvent être supé-

rieurs, inférieurs ou égaux à la somme de chacun d'entre eux considéré de façon individuelle. De nombreuses incertitudes demeurent concernant ces effets combinés. Il existe des zones d'hypoxie naturelle, abritant des espèces ayant des caractéristiques physiologiques et comportementales particulières, mais tous les organismes ont des limites et, pour bon nombre d'entre eux, même de faibles réductions d'oxygène entraînent des coûts physiologiques et écologiques. L'importance de maintenir des niveaux adéquats d'oxygène dans les océans est peut-être mieux résumée par l'ancienne devise de l'Association pulmonaire américaine : « Si vous ne pouvez pas respirer, rien d'autre n'a d'importance ».



Période au cours de laquelle les symptômes d'eutrophisation et d'hypoxie/anoxie ont commencé dans les pays développés, et comment l'apparition de ces symptômes s'est déplacée au cours des dernières années vers les pays en développement (Rabalais et al. (2014), modifié de Galloway et Cowling (2002) et Boesch (2002)).

# CE QUI EST DÉJÀ EN COURS

© Paulo Oliveira / Alamy stock photo

« Respirer de l'eau » est une tâche difficile car un volume d'eau donné contient beaucoup moins d'oxygène que le volume d'air équivalent. Ainsi, la performance physiologique et le répertoire comportemental des organismes marins dépendent fortement de leur capacité d'extraire l'oxygène de l'eau de mer dans laquelle ils évoluent. Tout écart par rapport aux niveaux normaux d'oxygène de l'océan peut représenter un défi pour les espèces ayant évolué et s'étant adaptées à certains niveaux d'oxygène disponible pour leur vie quotidienne.

Depuis le milieu du XXe siècle, l'augmentation des ruissellements fluviaux d'azote et de phosphore et les dépôts atmosphériques d'azote provenant de l'utilisation de combustibles fossiles ont entraîné une eutrophisation des zones côtières (y compris dans les mers semi-fermées) à l'échelle mondiale. Les

surcharges en nutriments d'origine anthropique fertilisent les eaux côtières et augmentent la biomasse du phytoplancton et autres organismes. Au fur et à mesure que ces organismes meurent et défèquent, la matière organique coule et se désintègre. Ce processus de décomposition, causé surtout par des microbes à respiration aérobie (qui utilise de l'oxygène), épuise l'oxygène dans l'eau environnante. La façon dont cela se déroule à l'échelle régionale et locale dépend de la structuration physique et de la stratification de la colonne d'eau, ainsi que de la durée de rétention de l'eau avant d'atteindre l'océan. Une stratification saline (sel) ou thermique (chaleur), ou les deux, dicte la présence d'une pycnocline (forte différence de densité dans la colonne d'eau) à travers laquelle la diffusion de l'oxygène dissous est entravée. L'allongement du temps de stagnation de l'eau accroît également la probabilité d'ap-



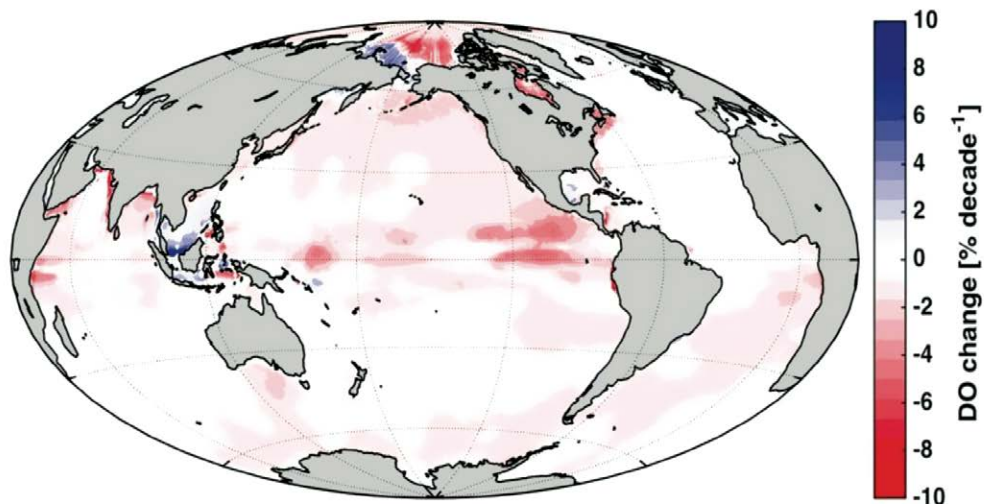
Eaux côtières présentant des concentrations d'oxygène inférieures à 2 mg L<sup>-1</sup> (63 μmol L<sup>-1</sup> ou 61 μmol kg<sup>-1</sup>) (points rouges) (Diaz et Rosenberg, 2008; Isensee et al., 2016). La plupart des systèmes de cette figure ont montré leur première incidence de faible teneur en oxygène après 1960.



pauvrissement en oxygène d'une zone côtière. Les barrières physiques telles que la profondeur du plateau continental ou l'advection des eaux du large peuvent aussi influencer positivement ou négativement le niveau de désoxygénation.

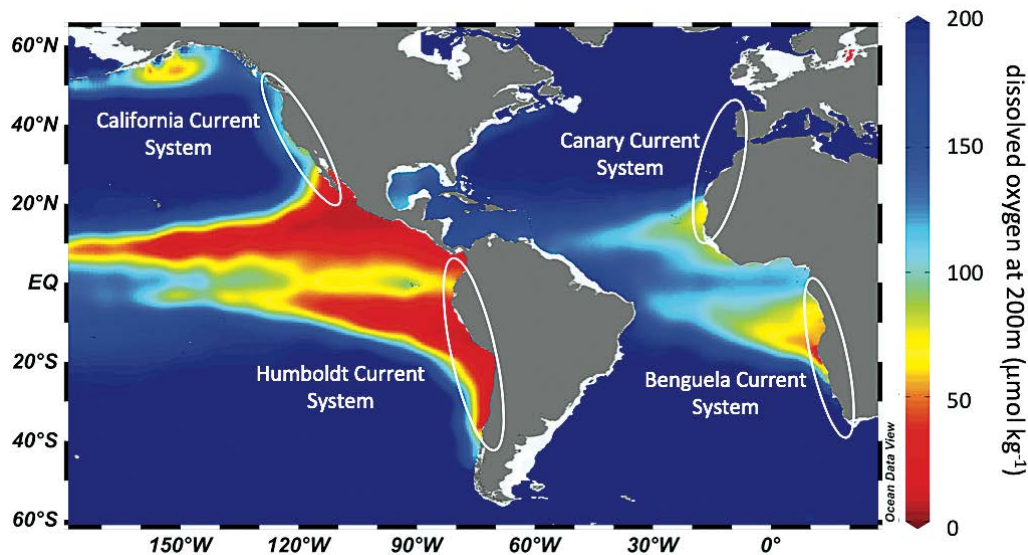
La conséquence globale des perturbations de l'état d'équilibre du système océan-atmosphère au cours des dernières décennies est que l'océan est maintenant devenu une source d'oxygène pour l'atmosphère, même si son taux d'oxygène ne représente qu'environ 0,6% de celui de l'atmosphère. Sur de longues périodes, l'augmentation de la respiration due au réchauffement aura tendance à générer des déficits en oxygène près de la surface de l'océan. L'augmentation du gradient vertical d'oxygène près de la surface pourrait même augmenter l'absorption d'oxygène atmosphérique par l'océan.

La teneur globale en oxygène de l'océan a diminué d'environ 1 à 2% depuis le milieu du XXe siècle. Du point de vue du changement climatique, une des conséquences de l'augmentation des températures de l'eau de mer est la réduction de la solubilité de l'oxygène (et autres gaz) dans l'eau (les lois de la physique dictent, en effet, que plus un liquide est froid, plus il pourra contenir de gaz dissous). Mais ce phénomène n'est qu'en partie responsable des pertes globales d'oxygène dans l'océan actuellement observées. Des preuves suffisantes indiquent que de telles augmentations de température expliquent environ 50% de la perte d'oxygène dans les premiers 1000m de l'océan, ce qui correspond à une perte d'oxygène due à la solubilité d'environ  $0,013 \text{ Pmol O}_2 \text{ an}^{-1}$ . Jusqu'à présent, la contribution de la solubilité à la perte d'oxygène après 1000 m de profondeur s'élève à environ 2% (environ  $0,001 \text{ Pmol O}_2$



Estimation des changements causés par le réchauffement climatique dans la teneur en oxygène de l'océan mondial en pourcentage décennie<sup>-1</sup> depuis 1960 (Schmidtke et al., 2017). Les tonalités rouges indiquent une baisse d'oxygène, et les bleues, une augmentation.





Emplacement des quatre principaux systèmes de remontée d'eau profonde des côtes est, et valeurs d'oxygène dissous à 200 m de profondeur, illustrant l'emplacement de chaque système par rapport aux zones océaniques minimales d'oxygène. Données de l'Atlas océanique mondial 2013.

an<sup>-1</sup>), et selon l'estimation la plus récente de la désoxygénation globale ( $0,096 \pm 0,042 \text{ Pmol O}_2 \text{ an}^{-1}$ ), les changements de solubilité représentent 15% (entre 10 et 30%) de la perte totale d'oxygène entre 1960 et 2010.

La majeure partie de la perte d'oxygène a été causée par des changements dans la circulation océanique et la ventilation associée (les échanges gazeux), qui amènent l'oxygène de l'atmosphère et des eaux de surface vers les profondeurs. Cette situation est aggravée par la réduction du brassage océanique et les changements dans les courants et la configuration des vents. L'index de confiance concernant l'ampleur de l'effet d'entraînement sur la respiration, un autre facteur expliquant une réduction d'oxygène, est plus faible. Moins de 15% de la diminution d'oxygène peut être attribuée à des changements dans la respiration des particules et matières organiques dissoutes induits par le réchauffement.

Bien que les changements biogéochimiques et physiques associés au réchauffement, à la désoxygénation et à l'acidifica-

tion des océans se produisent partout dans le monde, l'empreinte de ces facteurs de stress planétaires a une forte nature régionale et locale. La mer Baltique et la mer Noire comptent peut-être parmi les zones à faible teneur en oxygène les plus connues. Elles constituent les plus grands écosystèmes marins semi-fermés à faible teneur en oxygène du monde. Bien que le bassin profond de la mer Noire soit naturellement anoxique, l'appauvrissement en oxygène dans la partie nord-ouest de la mer Noire a été attribué à d'importantes surcharges en nutriments. Les conditions de très faible teneur en oxygène observées actuellement dans la mer Baltique sont le résultat d'une augmentation des apports en nutriments provenant du ruissellement des terres, exacerbée par le réchauffement de la planète.

Les effets de la désoxygénation ne se limitent toutefois pas aux mers fermées. Les systèmes d'upwelling de bord est (SUBE), qui entraînent une remontée d'eau profonde le long des côtes occidentales des continents, sont l'un des biomes les plus productifs de l'océan, soutenant un cinquième des captures



Mortalité massive de homards dans la baie de Sainte-Hélène, Afrique du Sud © G.C. Pitcher.



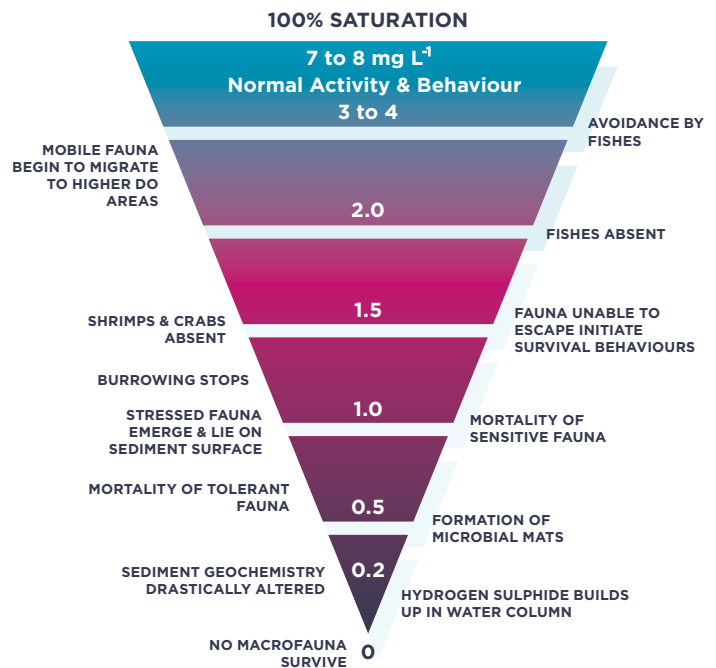
de poissons marins sauvages dans le monde. Ces écosystèmes sont définis par les courants océaniques qui amènent des eaux riches en nutriments mais pauvres en oxygène à la limite est des bassins océaniques du monde. S'agissant de systèmes naturellement pauvres en oxygène, les SUBE sont particulièrement vulnérables à des changements supplémentaires de la désoxygénation océanique mondiale, et ce qui affecte la teneur en oxygène des SUBE finira donc par se répercuter et affecter des centaines de millions de personnes.

La dynamique des SUBE est intimement liée aux modifications globales de la chimie et de la circulation océaniques causées par le changement climatique. Les courants ascendants relient la vaste région de la haute mer, qui connaît une diminution de l'oxygène dissous, aux eaux côtières productives des SUBE. La force et la localisation des courants ascendants dépendent des vents dominants, également affectés par le changement climatique. Pour certains systèmes, cette combinaison de changements entraînera une intensification et une expansion des zones côtières à faible teneur en oxygène (ZFO).

En comparaison avec la haute mer, les changements à long terme dans la disponibilité d'oxygène dissous dans les SUBE dynamiques sont beaucoup plus difficiles à comprendre. Néanmoins, des tendances importantes commencent à apparaître. Dans un certain nombre de ces systèmes, l'oxygène dissous a diminué d'environ  $10 \mu\text{mol kg}^{-1}$  par décennie. Cette situation est très préoccupante, car de nombreux SUBE locaux sont déjà proches, voire au-delà de ce que certains considèrent comme le seuil clé de l'hypoxie, soit  $60 \mu\text{mol O}_2 \text{ kg}^{-1}$ . Les observations d'un renforcement des vents responsables de la remontée des eaux à faible teneur en oxygène et riches en nutriments dans certains systèmes, du fait du changement climatique, entraînent des risques accrus de changements écosystémiques dépassant ceux attendus du fait de la seule désoxygénation des océans. Les SUBE sont des régions clés pour le système climatique en raison de la complexité des processus océaniques et atmosphériques qui relient la haute mer, la troposphère et les zones continentales, et du fait qu'ils abritent des Zones de minimum d'oxygène (ZMO), responsables de la plus grande proportion mondiale de dénitrification de la colonne d'eau et des plus importantes émissions estimées ( $0,2 - 4 \text{ Tg de N an}^{-1}$ ) d'oxyde nitreux, un puissant gaz à effet de serre.

Étant donné que de nombreux SUBE sont déjà exposés à des conditions de faible teneur en oxygène, le risque de franchir des seuils biologiques importants régulant la répartition et la productivité des stocks de pêche et le fonctionnement des écosystèmes est accru. L'anoxie des eaux peu profondes a déjà entraîné des taux de mortalité massifs de poissons et de mollusques dans certains systèmes. L'expansion des zones à faible teneur en oxygène a entraîné une invasion rapide et transitoire du calmar de Humboldt, tolérant l'hypoxie, dans d'autres systèmes. Le déplacement des poissons loin des zones à faible teneur en oxygène a également eu une incidence sur la précision des suivis de pêche indépendants, même si le besoin d'outils de gestion dans le contexte du changement climatique augmente.

Les SUBE sont également sujets aux efflorescences d'algues nuisibles (EAN) à biomasse élevée et constituent l'une des



Gamme de comportements et d'impacts écologiques lorsque les niveaux d'oxygène dissous passent de la saturation à l'anoxie.

premières sources d'information sur les épisodes d'anoxie liés aux marées rouges. L'expansion des proliférations d'algues est plus évidente en Asie que dans n'importe quelle autre partie de l'océan mondial, et c'est là que les relations entre la prévalence croissante des EAN et les activités aquacoles sont de plus en plus mises en cause. Plusieurs modèles montrent la probabilité d'une augmentation de la pollution par les nutriments et, en conséquence, d'une expansion régionale et mondiale continue de l'hypoxie et de l'anoxie côtières liées aux proliférations d'algues nuisibles.

D'après les données disponibles, il est évident que les zones à faible teneur en oxygène (y compris les eaux anoxiques, les ZMO et les zones moins gravement hypoxiques) ont connu une expansion spectaculaire dans la majeure partie de l'Atlantique au cours des 50 à 100 dernières années, un fait clairement lié aux activités humaines. Les eaux à faible teneur en oxygène, les conditions hypoxiques et même anoxiques sont maintenant présentes dans de nombreuses zones côtières de l'Océan Atlantique, y compris dans les mers connexes comme la Méditerranée, le golfe du Mexique, la mer Noire et la mer Baltique. Parallèlement, de grands bassins océaniques tels que l'Atlantique équatorial et l'Atlantique Sud sont affectés par la baisse des niveaux d'oxygène, bien que de telles conditions aient été présentes dans les eaux profondes bien avant que les activités anthropiques commencent à avoir une influence sur le milieu marin. En plus de nombreuses zones côtières, on trouve aussi des eaux à faible teneur en oxygène à des profondeurs moyennes dans la plupart des bassins océaniques de l'Atlantique, habituellement à des profondeurs de 300 à 1 000 m. Les concentrations en oxygène dans ces zones ont diminué au cours des 60 dernières années, en partie à cause du réchauffement de l'océan, mais aussi à cause de la diminution du brassage et de la ventilation.

Dans d'autres régions, les zones pauvres en oxygène de l'Océan Indien devraient continuer de s'étendre et de s'intensifier. Le nord de l'Océan Indien regroupe environ deux tiers de la marge continentale mondiale en contact avec des eaux



à très faible teneur en oxygène ( $< 0,2 \text{ ml O}_2 \text{ L}^{-1}$ ), et abrite également la plus grande zone à faible teneur en oxygène naturelle au monde (au large de l'ouest de l'Inde). Les pays entourant ses bassins semi-fermés, représentant environ un quart de la population humaine, de l'environnement, de la biodiversité et des ressources biologiques mondiale, sont les plus vulnérables aux changements induits par l'homme, en particulier la désoxygénation.

De telles expansions du volume des ZMO ont de nombreux effets néfastes sur la vie marine, notamment la perte d'habitats, des changements dans les réseaux trophiques, une réduction de la croissance et de la reproduction, un stress physiologique, la migration, une vulnérabilité accrue à la prédation, la perturbation des cycles biologiques et, dans les cas extrêmes, la mort. Lorsque l'oxygène dissous est épuisé en deçà des niveaux de détection, comme c'est le cas dans un grand volume d'eau à mi-profondeur dans la ZMO de la mer d'Arabie, la communauté microbienne respire de façon anaérobie, principalement en utilisant le nitrate, un nutriment essentiel, et en le convertissant en azote moléculaire inerte ( $\text{N}_2$ ) et en oxyde nitreux ( $\text{N}_2\text{O}$ ), un puissant gaz à effet de serre. Bien que l'azote moléculaire produit par ce processus (dénitrification) module le bilan d'azote réactif et la productivité biologique marine, les émissions océaniques d'oxyde nitreux jouent un rôle important dans le bilan du rayonnement terrestre.

La ZMO de la Baie du Bengale contient encore un peu d'oxygène, en traces infimes, mais assez pour inhiber la dénitrification à grande échelle. Le volume d'eau contenant des traces d'oxygène ( $< 0,2 \text{ ml O}_2 \text{ L}^{-1}$ ) dans le nord de l'Océan Indien est beaucoup plus grand que le volume de la ZMO fonctionnellement anoxique de la mer d'Arabie, ce qui, en conjonction avec l'extrême sensibilité de la dénitrification à des niveaux d'oxygène extrêmement bas, souligne la réponse non linéaire de la production d'azote moléculaire et d'oxyde nitreux à la désoxygénation de l'océan. Ainsi, l'expansion et l'intensification des ZMO océaniques devraient avoir des conséquences importantes sur la productivité, du fait de la perte d'azote réactif, et sur le climat, en raison de la production accrue d'oxyde nitreux.

Un manque important d'information subsiste, cependant, concernant de potentielles zones sensibles pour la désoxygénation, y compris les deltas de l'Indus, du Gange-Brahmapoutre et de l'Irrawaddy. Ainsi, les représentations visuelles de l'étendue actuelle de la désoxygénation des océans sous-estiment très certainement les effets ressentis dans l'océan mondial. Un renforcement des capacités et la constitution de réseaux sont nécessaires pour étendre et améliorer le suivi de la désoxygénation et autres impacts des changements planétaires sur les océans.

## Aperçu des impacts de la désoxygénation des océans

### Perte de biomasse

- Mortalité directe des espèces pêchées
- Mortalité directe des espèces proies
- Réduction de la croissance et de la production
- Recrutement réduit

### Perte de biodiversité

- Mortalité d'espèces sensibles
- Diversité réduite
- Sensibilité accrue aux maladies et autres facteurs de stress
- Moindre complexité du réseau trophique

### Perte d'habitats

- Entassement des organismes dans des habitats sous-optimaux
- Augmentation des risques de mortalité dus à la prédation naturelle et à la pression de pêche
- Départ forcé des habitats préférentiels
- Modification ou blocage des voies de migration

### Modification des cycles énergétique et biogéochimique

- Augmentation du flux d'énergie par les microbes
- Production de sulfure d'hydrogène toxique
- Rejet de phosphore et autres nutriments provenant des sédiments et alimentant les proliférations d'algues
- Perte de dénitrification





# QUE POURRAIT-IL ARRIVER DANS L'AVENIR ?

Les simulations actuelles de changement climatique pour la fin du siècle prévoient une diminution de l'oxygène dans l'océan, aussi bien dans les scénarios d'émissions élevées que faibles, tandis que les projections de ruissellements fluviaux vers l'océan côtier indiquent que l'eutrophisation se poursuivra ou s'aggravera probablement dans de nombreuses régions du monde. Le réchauffement devrait amplifier le problème de la désoxygénation dans les zones côtières affectées par l'eutrophisation en renforçant et en étendant la stratification de l'eau de mer.

Au fur et à mesure que l'océan se réchauffe, la stratification devrait augmenter, entraînant un ralentissement de la circulation océanique en haute mer. Une circulation ralentie devrait représenter jusqu'à 50% de la désoxygénation observée dans les premiers 1000 m et jusqu'à 98% dans les profondeurs océaniques (profondeur > 1000 m). Les schémas spatiaux et les mécanismes individuels ne sont pas encore bien compris et des améliorations supplémentaires des modèles sont nécessaires afin d'améliorer les projections. Les taux de respiration de matière organique dissoute (MOD) devraient aussi augmenter avec la température. Les estimations de la respiration sont difficiles en raison de la composition mal connue et de l'accessibilité biologique de la matière organique morte. Des expériences d'incubation indiquent une certaine accélération de la respiration induite par le réchauffement, ce qui pourrait expliquer que jusqu'à 10%, ou 0,01 Pmol O<sub>2</sub>, du déclin du taux des matières organiques mortes dans l'océan n'ait pas encore été observé.

Un réchauffement supplémentaire des eaux profondes causé par le changement climatique pourrait aussi entraîner une déstabilisation accrue des hydrates de méthane, provoquant une plus grande libération de méthane à partir des sédiments et une respiration aérobie subséquente du méthane en dioxyde de carbone. Toutefois, il n'existe que peu de preuves observées d'une accélération de la libération de méthane induite par le réchauffement déjà en cours. Au fur et à mesure que l'océan se réchauffera, il perdra plus d'oxygène en raison de l'effet di-

rect de la température sur la solubilité des gaz. De plus, des réductions du brassage vertical associées à une augmentation de la stratification de la flottabilité dans la partie supérieure de l'océan se produiront, entraînant un appauvrissement de l'oxygène en profondeur causé par la respiration. Il est probable que l'océan, dans son ensemble, perde environ 3 à 4% de son taux d'oxygène d'ici 2100 dans un scénario de statu quo (RCP8.5), la majeure partie de cette perte se concentrant dans les premiers 1000 m de la colonne d'eau, où la richesse et l'abondance des espèces sont les plus élevées.

L'intensification et l'expansion futures des zones à faible teneur en oxygène peuvent avoir d'autres conséquences sur les écosystèmes, car le cycle des éléments dépendant de l'oxygène, provoqué par les microbes, modifie l'apport de nutriments ou, dans des cas extrêmes, entraîne une production accrue de gaz de sulfure d'hydrogène (HS) toxique. Les SUBE à faible teneur en oxygène sont également des régions d'enrichissement en dioxyde de carbone, car la perte d'oxygène dissous est associée à la production de dioxyde de carbone. En combinaison avec l'absorption par l'océan des émissions de dioxyde de carbone humain, les niveaux de dioxyde de carbone dans certains SUBE ont déjà atteint des niveaux auxquels les coquilles de carbonate de calcium des organismes marins sont aujourd'hui facilement dissoutes. Les systèmes de remontées des eaux des côtes est représentent donc des zones sensibles pour l'hypoxie et l'acidification des océans, où la mise au point de solutions d'atténuation et d'adaptation est urgente.

On prévoit qu'il existera des différences régionales importantes dans l'intensité de la perte d'oxygène, ainsi que des variations dans les impacts écologiques et biogéochimiques. Tous les modèles convergent sur le fait que la perte d'oxygène aux latitudes moyennes et élevées sera forte et influencée à la fois par la réduction de la solubilité et par l'augmentation des effets de la respiration. Les projections sont plus ambiguës dans les tropiques, où les modèles suggèrent que le déclin de l'oxygène dû à la diminution de la solubilité sera compensé par l'augmentation de l'oxygène due à la réduction de la respiration





cumulative. Ainsi, les concentrations d'oxygène au cœur des zones à concentration minimale actuelles pourraient augmenter. Toutefois, le volume total des eaux considérées comme « suboxiques » et « hypoxiques » pourrait croître considérablement.

Les conditions de faible teneur en oxygène et l'augmentation de la température limitent conjointement l'habitat viable des macro-organismes marins. Un réchauffement continu de l'océan, accompagné d'une désoxygénation, entraînera la contraction et la fragmentation des habitats dans les régions où les niveaux d'oxygène sont inférieurs aux besoins métaboliques. L'expansion des zones suboxiques perturbera probablement le cycle de l'azote dans l'océan. La dénitrification pourrait augmenter, produisant des taux plus élevés de perte d'azote fixé provenant de l'océan. Les perturbations du cycle de l'azote pourraient inclure des changements substantiels dans la production d'oxyde nitreux, bien que cela soit très incertain. À court terme, les organismes marins réagissent à la désoxygénation des océans en modifiant leur physiologie et leur comportement. Une modification du comportement alimentaire et du mode de distribution est généralement observée, pouvant conduire à une réduction de la croissance et à plus de difficultés à terminer le cycle de vie. Une compression verticale des habitats est également prévisible pour les organismes des couches supérieures de l'océan et des eaux côtières. À moyen terme, les processus épigénétiques (influences non génétiques sur l'expression des gènes) pourraient fournir aux populations marines un moyen rapide de s'acclimater à une oxygénation changeant rapidement. Toutefois, ce domaine en pleine évolution des sciences biologiques est trop récent pour évaluer pleinement la contribution des réponses épigénétiques à l'adaptation des organismes marins à la désoxygénation de l'océan. Aucun changement dans la phénologie (chronologie des événements spécifiques aux différents stades de vie) des espèces marines n'a encore été observé en relation avec la désoxygénation de l'océan. Toutefois, la désoxygénation se produit généralement en même temps que d'autres perturbations de l'environnement (réchauffement de l'océan et acidification), également sus-

ceptibles d'affecter le cycle de vie des espèces marines. Le manque de compréhension de leurs interactions et de leurs synergies limite actuellement nos possibilités d'évaluer la capacité des populations marines à réagir phénologiquement à la désoxygénation des océans.

À l'heure actuelle, il est difficile de prédire quelles espèces marines pourront s'adapter avec succès aux changements observés dans l'oxygène dissous de l'océan. À long terme, une adaptation par sélection naturelle pourrait se produire, mais elle sera plus probable chez les espèces dont la durée de génération est très courte. Une telle adaptation évolutive est cependant beaucoup plus difficile à envisager pour la plupart des espèces de poissons commerciales, qui se caractérisent par une long temps de génération. Entre aujourd'hui et 2100, environ 80 générations de sardines (*Sardina pilchardus*; maturité : 1 an), mais seulement de 10 à 15 générations de morues franches (*Gadus morhua*; maturité: entre 5 et 8 ans) verront le jour. Le nombre de générations dans l'un ou l'autre de ces scénarios est modeste et fait douter de la capacité des espèces de poissons commerciales, en particulier, à s'adapter à des conditions océaniques évoluant rapidement.

Il existe, dans la nature, de grandes variations interindividuelles et interspécifiques de tolérance à la réduction de disponibilité de l'oxygène. Cette diversité dans les réactions des espèces marines les rend difficiles à comprendre. De plus, les synergies avec d'autres facteurs de stress environnementaux, qu'ils soient naturels ou anthropiques, comme le réchauffement et l'acidification des océans, renforcent cette difficulté. Au cours des 30 dernières années, les biologistes et physiologistes marins ont déployé des efforts considérables pour comprendre comment les animaux marins réagissent aux conditions environnementales et à la réduction de disponibilité de l'oxygène. Malgré tous ces efforts, un long chemin reste encore à parcourir et l'intensification de la collaboration entre physiologistes, écologistes, modélisateurs et gestionnaires est essentielle pour fournir aux décideurs et aux gestionnaires de ressources marines des informations scientifiques pleinement opérationnelles.

# POURQUOI EST-CE IMPORTANT ?

Les conséquences de l'augmentation de la désoxygénation des océans se feront sentir à différentes échelles dans le système Terre/Océan. À l'échelle des estuaires individuels, l'aggravation d'une faible teneur en oxygène réduit l'habitat essentiel des espèces halieutiques et favorise les espèces tolérantes à une faible oxygénation (comme bon nombre de méduses) dans les réseaux trophiques. Dans les régions de remontées des eaux côtières induites par le vent, les mécanismes physiques se produisent là où les eaux froides, riches en éléments nutritifs et pauvres en oxygène alimentent, en amont, une grande abondance de plantes océaniques (c.-à-d. la productivité primaire). Dans les scénarios futurs, le réchauffement de la planète pourrait modifier l'oxygénation de ces eaux, affectant d'autres services, comme la pêche. À plus grande échelle, la désoxygénation océanique pourrait influencer les interactions gazeuses océan-atmosphère. En effet, lorsque les eaux des ZMO remontent et pénètrent dans la zone euphotique, un rejet potentiel de gaz à effet de serre tels que l'oxyde nitreux, le dioxyde de carbone et le méthane, peut se produire dans l'atmosphère, exacerbant le réchauffement de la planète et affectant, de façon subséquente, la stratification, la productivité biologique et le taux d'oxygène.

Les zones à teneur minimale en oxygène jouent un rôle essentiel dans le cycle global de l'azote, auquel participent divers composés chimiques comme l'ammonium, le nitrite, le nitrate, l'oxyde nitreux et l'azote gazeux, et différents processus bactériens interviennent dans les transformations d'un composé chimique à un autre. Des pertes importantes d'azote sont observées dans les ZMO et représentent environ 10% de la dénitrification globale (le processus par lequel le nitrate est réduit en azote gazeux par les microbes en absence d'oxygène). Sur terre, ce procédé est essentiel au recyclage de l'azote dans le système terrestre pour la santé des sols, la croissance microbienne et végétale et la santé animale. La dénitrification, cependant, peut aussi aggraver le réchauffement de la planète par la production d'oxyde nitreux. Avec le réchauffement de la planète, on prévoit que les ZMO connaîtront une expansion importante, entraînant des modifications du bilan d'azote océanique et une augmentation de la production d'oxyde nitreux océanique, aggravant encore le réchauffement de l'atmosphère et de l'océan.

Parallèlement aux influences du cycle de l'azote, le recyclage du phosphore (P) dans les systèmes marins est renforcé lorsque les niveaux d'oxygène dans l'eau de mer sont extrêmement faibles ou inexistants. La disponibilité accrue de phosphore qui en résulte peut accroître la productivité et, par conséquent, la demande d'oxygène dans les eaux plus profondes. Cette boucle de rétroaction positive entre la productivité, la perte d'oxygène et la disponibilité accrue du phosphore peut contribuer à une plus grande désoxygénation dans les systèmes océaniques et côtiers. Les sédiments des zones de l'océan les plus proches des terres, les marges continentales, peuvent constituer une source de nutriments de fer (Fe) à l'état de trace dans les eaux des zones adjacentes de haute mer. Cette libération de fer dans les sédiments réagit de façon non linéaire à la désoxygénation de l'océan et atteint un maximum lorsque les concentrations d'oxygène près des fonds marins sont faibles et qu'il n'y a pas de sulfure. Cela signifie que la désoxygénation des océans peut initialement accroître la disponibilité en fer pour les producteurs primaires, pour ensuite donner lieu à une diminution de la disponibilité en fer lorsque les eaux deviennent sulfuriques. Une meilleure compréhension des cycles couplés des éléments et de leurs liens avec l'oxygène de l'océan renforcera notre capacité de prédire les impacts du changement climatique. Le réchauffement de la planète modifiera la ventilation et les propriétés des sources d'eau, la stratification océanique, les vents de surface, l'activité à moyenne échelle, les taux de remontées, la faible couverture nuageuse et les échanges gazeux et de particules air-mer. La compréhension de ces changements et de leurs effets de compensation et de synergie sur la trajectoire future de la désoxygénation des océans est importante mais difficile, en raison de la rareté des données biogéochimiques disponibles et des biais du modèle global.

Outre l'influence d'une diminution de l'oxygène sur les cycles géochimiques, la désoxygénation a également des conséquences importantes pour les espèces et les services qu'elles fournissent. À l'échelle d'un organisme, un faible niveau d'oxygène dans l'eau de mer peut provoquer toute une

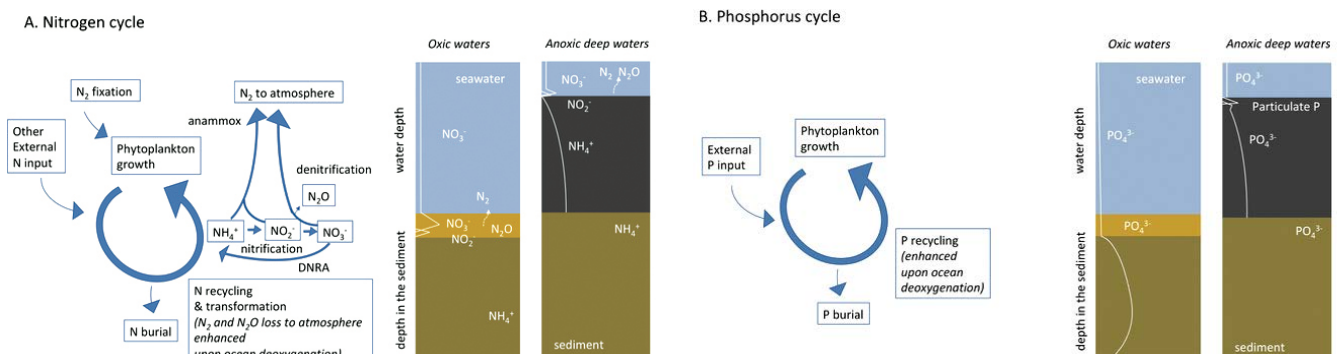


Figure conceptuelle des trajectoires des nutriments dans (A) le cycle de l'azote et (B) le cycle du phosphore. Les différences entre les cycles de l'azote et du phosphore sont décrites entre les eaux oxiques et les eaux profondes anoxiques. Pour les trajectoires de l'azote, les pertes en N<sub>2</sub> et N<sub>2</sub>O dans l'atmosphère sont stimulées par la désoxygénation de l'océan. Dans le cas du phosphore, la désoxygénation entraîne une augmentation du recyclage.





série de conséquences. La plus évidente est la réduction de l'oxygène disponible dans l'eau ventilée sur les surfaces respiratoires (branchies, peau). Ceci conduit à une diffusion réduite d'oxygène à travers l'épithélium des organes respiratoires et donc, à un moindre transport d'oxygène vers les cellules par le fluide circulatoire interne (sang, fluide extracellulaire). Une réduction de l'oxygénation dans le liquide circulatoire entraîne, à son tour, une réduction de la disponibilité en oxygène au niveau des cellules (mitochondries). Il en résulte une réduction de la production d'énergie qui, à son tour, réduit la capacité d'activités telles que la croissance et la reproduction. Ces impacts peuvent entraîner une augmentation du risque de prédation, affecter le recrutement et modifier la production de la population (biomasse), ainsi que sa démographie.

La désoxygénation réduit également les habitats convenables pour de nombreux organismes associés aux fonds marins, pousse les espèces de moyennes eaux vers les eaux de surface, mieux oxygénées, et perturbe les cycles biogéochimiques. Ces phénomènes sont déjà visibles par des impacts sur les espèces et des changements dans la composition en espèces des communautés marines, décrits plus loin dans le présent résumé.

La teneur en oxygène de l'océan mondial a déjà été réduite, dans le passé, provoquant des changements et des pertes de biodiversité semblables à ce que nous commençons à observer aujourd'hui. Une analyse de ces données permet de confirmer la dégradation importante actuelle des écosystèmes marins, y compris la perte de diversité, la diminution de l'abondance et les changements dans la composition de la faune souvent accompagnés d'une dominance accrue d'espèces opportunistes, par des paléoindicateurs des conditions passées. Une combinaison de plusieurs indicateurs, influencés

par de faibles concentrations d'oxygène et autres paramètres environnementaux, fait prévoir le développement d'eaux sus-jacentes pauvres en oxygène. Cette évidence est encore plus frappante lorsqu'on la compare aux données à long terme sur la qualité de l'eau, qui indiquent une augmentation des charges d'azote ou de carbone organique. Des déplacements fauniques dans les grandes endofaunes (mollusques) se sont déjà produits, dans le passé, à cause de l'eutrophisation et d'une réduction de l'oxygène.

La communauté scientifique se préoccupe déjà de la désoxygénation des océans et prend des mesures à cet égard. La Commission océanographique intergouvernementale de l'UNESCO (COI-UNESCO) a créé le Réseau mondial sur l'oxygène océanique (GO2NE), destiné à fournir une vision globale et multidisciplinaire de la désoxygénation, en mettant l'accent sur la compréhension de ses multiples aspects et impacts. Ce réseau a largement contribué à l'élaboration de ce rapport. Lors d'une récente conférence sur la désoxygénation des océans qui s'est tenue à Kiel, en Allemagne, en 2018, pour discuter de la réduction de l'oxygène, de ses causes et de ses conséquences, les 300 scientifiques présents, de 33 pays, ont publié la « Déclaration de Kiel ». Cette déclaration, dont le sous-titre indique que « l'océan est en train de perdre son souffle », appelle tous les pays, les acteurs de la société, les scientifiques et les Nations unies à sensibiliser le monde entier à la désoxygénation des océans, à prendre des mesures immédiates et décisives pour limiter la pollution et, en particulier, l'apport excessif de nutriments dans les océans, et à limiter le réchauffement de la planète par des mesures décisives d'atténuation du changement climatique. Cette Déclaration doit maintenant être entendue haut et fort par les conseillers politiques, les décideurs et le grand public.

# CONSÉQUENCES DE LA DÉSOXYGÉNATION DES OCÉANS SUR LES ESPÈCES, LES HABITATS ET LES ÉCOSYSTÈMES CÔTIERS ET MARINS

## Benthos estuariens et côtiers

Toute une gamme de conséquences affecteront les espèces benthiques estuariennes et côtières. Les invertébrés benthiques mobiles s'éloigneront des masses d'eau à faible teneur en oxygène dissous. Des études ont montré que cela pourrait entraîner une diminution par 10 de la diversité des assemblages benthiques, une diminution par 25 de l'abondance de l'endofaune benthique et une diminution par 10 de la biomasse, lorsque l'oxygène dissous approche les  $0,05 \text{ mg L}^{-1}$  dans une zone côtière à très faible teneur saisonnière en oxygène. Entre 343 000 et 734 000 MT de carbone sous forme de production secondaire sont perdus dans les écosystèmes chaque année sur plus de  $245\,000 \text{ km}^2$  lorsque les eaux profondes sont fortement désoxygénées. Le rétablissement des communautés benthiques, dans de meilleures conditions d'oxygène, peut prendre des années, voire des décennies, et ne jamais revenir aux conditions pré-impact.

Une forte désoxygénation saisonnière dans les eaux côtières modifie la composition de la communauté benthique. L'endofaune fouisseuse des eaux profondes est remplacée par de petits détritivores opportunistes de surface, vivant dans les premiers 2 cm de sédiments. La diversité, le nombre de groupes taxonomiques, l'abondance et la biomasse diminuent à mesure que la concentration d'oxygène dissous diminue. Les sédiments qui en résultent ne deviennent pas azoïques. Les organismes multicellulaires disparaissent en grande partie, à l'exception de quelques-uns, adaptés à une forte hypoxie / anoxie. En revanche, les communautés microbiennes prospèrent. Différents degrés de désoxygénation affectent le benthos de différentes façons, les stades de développement étant généralement plus sensibles que les adultes. Les taxons diffèrent également par leur sensibilité à une faible teneur en oxygène. Les crustacés péricarides disparaissent complètement avant de nombreux vers polychètes et sipunculien, tandis qu'en termes de méiofaune, les copépodes harpacticoïdes sont plus sensibles que les nématodes.

Cette perte d'endofaune due à la désoxygénation affecte le fonctionnement des écosystèmes. La perte de benthos bioturbateur permet à la discontinuité du potentiel d'oxydoréduction des sédiments de se rapprocher de l'interface eau-sédiments. La perte d'organismes benthiques et de production secondaire diminuent la disponibilité en nourriture pour les consommateurs supérieurs, tandis qu'à de très faibles niveaux d'oxygène, des écoulements d'ammonium et d'orthophosphates se produisent à partir des sédiments, générant une rétroaction négative à une désoxygénation plus poussée.

Dans les environnements estuariens et côtiers, les zones de désoxygénation réduisent l'habitat propice à des espèces commercialement importantes. Cela peut, à son tour, entraîner une réduction de la croissance et influencer sur les prix du marché.

## Varech et macroalgues

Étant donné que les varech et autres macroalgues sont des producteurs primaires qui absorbent le dioxyde de carbone et produisent de l'oxygène, on pourrait s'attendre à ce que les effets de l'hypoxie sur ceux-ci soient modestes. Cependant, les varechs et autres macroalgues respirent, elles aussi, et ont donc besoin d'oxygène. Par conséquent, l'hypoxie pourrait avoir des effets néfastes sur des processus comme la production primaire nette (PPN), qui fournit de la matière organique pour soutenir les réseaux trophiques et les écosystèmes de varech. Toutefois, les effets de l'hypoxie pourraient varier considérablement selon les espèces de macroalgues et leur habitat, car ce groupe d'organismes est extrêmement divers dans sa morphologie et sa distribution.



*Ecklonia radiata* © John Turnbull.

Le varech et autres macroalgues sont présents dans les systèmes littoraux du monde entier. Ceux-ci sont dynamiques et connaissent de grandes fluctuations d'oxygène, de pH et de température. Dans les zones côtières dynamiques de remontée des eaux, les périodes de faible teneur en oxygène sont souvent plus épisodiques. Contrairement à l'hypoxie provoquée par la respiration dans les baies et les estuaires, ces expositions à l'hypoxie causées par les remontées d'eau tendent à être aiguës, avec des cycles de perturbation et de récupération rapides, durant généralement moins de 24 heures. Il sera tout de même nécessaire d'étudier la probabilité que les organismes de ces systèmes subissent une mortalité directe due à des adaptations à des degrés élevés de variabilité na-



turelle de l'oxygène dissous, ou s'ils sont déjà près de leurs limites physiologiques.

On ne sait que très peu de choses sur les effets directs de la désoxygénation sur les macroalgues. D'une part, l'hypoxie pourrait nuire aux processus métaboliques, entraînant une production primaire nette plus faible. Ces processus devraient également être affectés à diverses étapes du cycle de vie des macroalgues. Cependant, de nombreuses algues marines photorespirent (en utilisant de l'oxygène au lieu du dioxyde de carbone), réduisant leur efficacité photosynthétique, de sorte que la diminution des concentrations d'oxygène pourrait, en fait, augmenter les taux de photosynthèse chez certaines macroalgues marines. Ces prévisions deviennent compliquées lorsque l'on considère les effets de l'oxygène en combinaison avec des facteurs de stress concomitants comme l'acidification et le réchauffement des océans. En fonction de facteurs comme la calcification, la proximité du benthos, le taux de croissance et les mécanismes de concentration du carbone, ces trois facteurs de stress devraient affecter différemment les groupes de macroalgues.

En plus d'effets directs sur les macroalgues, une faible teneur en oxygène (et les fluctuations de pH et de température associées aux remontées d'eau) pourrait avoir des effets profonds sur les organismes brouteurs, décomposeurs et prédateurs qui régissent la structure et la fonction des écosystèmes de varech. Il n'existe que peu d'études publiées sur les réactions des organismes des prairies de varech à une faible teneur en oxygène, mais celles-ci suggèrent des changements dans la recherche de nourriture, l'alimentation et les déplacements. Les invertébrés benthiques sédentaires, comme les ormeaux, pourraient être affectés par le fait que les dépressions des fonds rocheux pourraient retenir des poches d'eau froide, acide et à faible teneur en oxygène pendant des heures après le passage des vagues internes, un peu comme les mares résiduelles retiennent l'eau d'une marée en phase de retrait. De plus, les effets de la désoxygénation sur les organismes modifieront probablement les interactions trophiques et le flux d'énergie. Des différences de vulnérabilité entre brouteurs et prédateurs pourraient renforcer ou affaiblir les cascades trophiques et le contrôle descendant des populations de varech.

## Écosystèmes tropicaux - Coraux, herbiers marins et mangroves

La désoxygénation affecte les écosystèmes côtiers tropicaux, mais elle demeure relativement peu étudiée et mal comprise. Le nombre d'écosystèmes hypoxiques pourrait largement être sous-estimé dans les tropiques, en raison du manque de capacité de recherche. Les coraux et les herbiers marins, par exemple, fournissent un habitat à diverses communautés d'or-

ganismes vulnérables à de faibles concentrations d'oxygène. Ils sont, eux-mêmes, vulnérables à l'hypoxie et ont également la capacité d'influencer les concentrations d'oxygène dans l'eau environnante, entraînant des rétroactions qui peuvent influencer les taux de désoxygénation. Les températures typiquement plus chaudes des écosystèmes tropicaux, combinées à la dépendance des récifs coralliens à la calcification, suggèrent qu'une perspective de stress multiple est nécessaire pour prévoir les effets de la désoxygénation dans ces régions.

Les données démontrent déjà une partie de l'ampleur et de la nature des impacts de la désoxygénation dans les tropiques :

- 75% : pourcentage de diminution de la diversité corallienne dans une zone morte hypoxique panaméenne.
- 1 000 000 : nombre de poissons morts dans les récifs coralliens à la suite d'un épisode hypoxique en Australie.
- 13% : pourcentage d'écosystèmes coralliens dans le monde présentant un risque élevé de désoxygénation.
- 8,66 mg L<sup>-1</sup> : Variation de la concentration d'oxygène dissous mesurée dans une zone de mangrove sur une période de 24 heures, d'un minimum de 0,46 à un maximum de 9,12 mg L<sup>-1</sup>.

Lorsque l'hypoxie apparaît le long de gradients de connectivité liés aux apports terrestres et au lessivage océanique, les espèces peuvent se séparer ou se limiter à une partie d'une ancienne aire de répartition et les captures de pêche peuvent décliner ou être déplacées. Une faible teneur en oxygène peut aussi déclencher des changements biogéochimiques exacerbant l'hypoxie par des boucles de rétroaction, où une faible teneur en oxygène peut favoriser la production de sulfures toxiques, entraînant la mort de plantes benthiques et d'algues. Les différences de tolérance et de capacité à s'acclimater chez les espèces fondatrices de coraux, d'herbiers marins et de mangroves peuvent conduire à une diminution de leur diversité globale, comme c'est le cas chez les coraux formant des récifs, alors que les communautés pourraient passer sous la dominance d'espèces tolérantes au stress, qui ont une complexité d'habitat plus faible. Le fait que l'hypoxie régisse les interactions entre espèces, en raison de tolérances au stress différentes, signifie que les pathogènes pourraient obtenir un avantage sur des hôtes stressés, comme c'est le cas dans la maladie de la bande noire sur les coraux, qu'un stress accru pourrait augmenter la dépendance aux mutualismes, comme dans le cas des poissons nageant pendant leur sommeil qui « nettoient » les crevasses de corail hypoxiques avec de l'eau oxygénée, et que les algues pourraient augmenter au niveau des récifs, parce qu'elles sont plus tolérantes que les coraux à des conditions d'oxygène extrêmement faibles.



(A) Récif corallien © blue-sea.cz; (B) Herbier marin © Ethan Daniels/Shutterstock.com; (C) Mangroves © happystock/Shutterstock.com.



Maladie de la bande noire © Rogers et al. (2008).

Les épisodes de faible teneur en oxygène peuvent aussi causer une mortalité massive des herbiers marins et des coraux formant les habitats, de sorte que les services écosystémiques, y compris la fonction de pépinière, sont perdus et que la complexité structurale des habitats se simplifie avec la perte de structures comme les récifs coralliens et les herbiers marins qui sont construits et entretenus par des organismes aérobies. L'hypoxie dans les écosystèmes tropicaux peut interagir avec d'autres facteurs de stress liés aux changements planétaires, y compris l'acidification et le réchauffement des océans, bien que la santé et la survie des coraux et des graminées puissent réagir de façon non linéaire aux changements de concentration de l'oxygène dissous. La consommation photosynthétique de dioxyde de carbone et la production d'oxygène par les coraux et les herbiers marins peuvent atténuer les stress associés à la désoxygénation et à l'acidification des océans, alors que, par ailleurs, l'augmentation de la respiration par les organismes photosynthétiques, en particulier avec le réchauffement, peut avoir un effet contraire.

## Communautés mésopélagiques

Les communautés mésopélagiques comprennent les poissons et autres organismes vivant dans des profondeurs intermédiaires, entre 200 et 1 000 m (environ 650 et 3 300 pi) de profondeur. La structure de la communauté mésopélagique dépend directement de la disponibilité en oxygène pour son métabolisme aérobie.

La diversité, l'abondance, la répartition et la composition des espèces mésopélagiques sont toutes influencées par les variations d'oxygène, tant à grande qu'à petite échelle. La désoxygénation océanique diminuera la teneur minimale en oxygène dans la zone mésopélagique et provoquera un déplacement vertical des oxyclines (c.-à-d. une expansion du cœur des ZMO) dans la colonne d'eau. Dans ce domaine océanique, la capacité d'une espèce à extraire l'oxygène de l'eau de mer a évolué pour répondre à une demande spécifique en oxygène. Par conséquent, les espèces ne possèdent pas de capacité excédentaire, et ne vivent pas dans des environnements présentant un excès d'oxygène par rapport à leur capacité évolutive. Elles sont donc sensibles à des réductions de la pression partielle d'oxygène et à une augmentation de la température (qui augmente la demande métabolique).

Pour ces espèces, les changements des profils de température et d'oxygène à l'intérieur de la colonne d'eau peuvent donc découpler ou accroître la compétition entre les différentes espèces mésopélagiques de zooplancton et les grands prédateurs qui se nourrissent en eaux profondes en modifiant l'abondance, la répartition et la profondeur des couches de zooplancton, ainsi que la composition et la diversité des espèces. Les cycles biogéochimiques (c.-à-d. la pompe biologique et les assemblages microbiens) qui dépendent de la communauté zooplanctonique mésopélagique seront considérablement modifiés.

Une diminution de la pression partielle d'oxygène ( $PO_2$ ) dans n'importe quel habitat réduira la performance métabolique aérobie de toutes les espèces qui y vivent (mais la  $PO_2$  ne diminuera pas dans les eaux de surface, qui sont en équilibre avec l'atmosphère). Pour les espèces mésopélagiques, une diminution de la teneur en oxygène réduira la capacité de capture des proies et d'évasion des prédateurs et, selon l'ampleur de la désoxygénation et les effets interdépendants de la hausse de température, pourrait entraîner des réductions spécifiques de survie, de croissance et de reproduction.

Les couches supérieures moins profondes d'oxycline et d'hypoxie pourraient entraîner une suppression spécifique des mouvements verticaux et une compression de l'habitat vertical aérobie vers la surface. Cela pourrait modifier les relations écologiques entre les espèces qui vivent dans des strates de profondeur différentes, et réduire l'abondance des espèces, qui seront poussées vers des eaux moins profondes et mieux éclairées, où la pression de prédation sera plus élevée. En outre, cela pourrait réduire la diversité au cœur des ZMO et modifier la composition en espèces de l'écosystème et les cycles biogéochimiques, ainsi que l'efficacité de la pompe à carbone biologique. L'expansion future des ZMO forcera la communauté de l'oxycline inférieure à se déplacer vers des eaux plus profondes. Cela pourrait modifier le cycle vital (diapause et reproduction) des habitants saisonniers, les interactions prédateur-proie avec les espèces bathypélagiques d'eaux plus profondes, et pourrait altérer plus avant les cycles biogéochimiques et l'efficacité de la pompe biologique.

## Communautés mésopélagiques des marges continentales

Les modèles climatiques mondiaux prévoient que le réchauffement de la planète entraînera une diminution des concentrations d'oxygène dans les couches d'eau moyennes, l'impact le plus important se produisant dans les régions de ZMO situées le long des marges continentales. Les séries chronologiques de ces régions indiquent que des changements importants dans la concentration d'oxygène ont eu lieu, des données montrant une variabilité décennale et une tendance séculaire à la baisse au cours des dernières décennies. L'étendue et le volume des eaux hypoxiques et suboxiques ont augmenté considérablement au cours des dernières décennies, avec une accumulation de couches limites hypoxiques le long des marges continentales.

Les communautés mésopélagiques dans les régions continentales des ZMO sont uniques, et cette faune est connue pour son adaptation aux environnements hypoxiques et su-

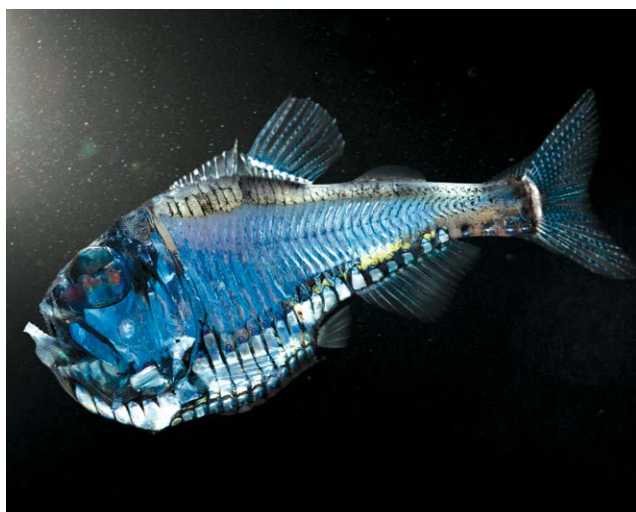


boxiques. Cependant, les faunes mésopélagiques diffèrent considérablement, de sorte que la désoxygénation et le réchauffement pourraient conduire à une dominance accrue des faunes subtropicales et tropicales les mieux adaptées aux conditions des ZMO.

Les bactéries dénitrifiantes dans les zones suboxiques des ZMO de l'océan représentent environ un tiers de la perte d'azote fixé de l'océan. La dénitrification dans le Pacifique tropical oriental a connu une variation dans un rapport de 1 à 4 au cours des 50 dernières années, la moitié de cette variation étant due aux oscillations de volume des eaux suboxiques dans le Pacifique. Une désoxygénation continue à long terme pourrait entraîner une diminution de la teneur en éléments nutritifs et, par conséquent, de la productivité océanique et de l'absorption du dioxyde de carbone par les océans. La désoxygénation pourrait aussi entraîner une augmentation de la libération océanique d'oxyde nitreux, un puissant gaz à effet de serre produit par des microbes dans des conditions suboxiques.

Il n'existe que peu de séries chronologiques permettant d'évaluer l'impact d'une réduction de l'oxygène sur la faune mésopélagique des marges continentales. Cependant, au sein du courant de Californie, les populations d'une vaste série de poissons mésopélagiques ont diminué d'environ 77%, un fait fortement corrélé à une diminution de 22% des concentrations d'oxygène dans les couches d'eau moyennes. Plusieurs taxons tropicaux-subtropicaux connus pour leur adaptation aux conditions hypoxiques ont vu leur dominance augmenter. Par exemple, l'aire de répartition et l'abondance apparente du calmar de Humboldt, adapté à la prédation sur les poissons mésopélagiques dans la couche limite hypoxique, ont considérablement augmenté.

Le micronecton mésopélagique constitue un lien trophique clé entre le zooplancton et une variété de prédateurs : calmars, thons, requins et autres poissons, ainsi qu'un certain nombre de mammifères et d'oiseaux marins présentant un intérêt particulier pour la conservation. Une réduction généralisée des populations de poissons mésopélagiques pourrait donc avoir des conséquences profondes pour les écosystèmes marins mondiaux et pour la pêche. Les marges continentales dans les zones de remontée des eaux sont exposées à l'hypoxie



*Agyropelecus affinis* © Paulo Oliviera / Alamy stock photo.

naturelle sur une superficie de 1,1 million de km<sup>2</sup>. Les gradients d'oxygène qui en résultent constituent d'excellents laboratoires naturels pour comprendre les adaptations, les tolérances, les seuils et les réactions de l'écosystème à la désoxygénation des océans.

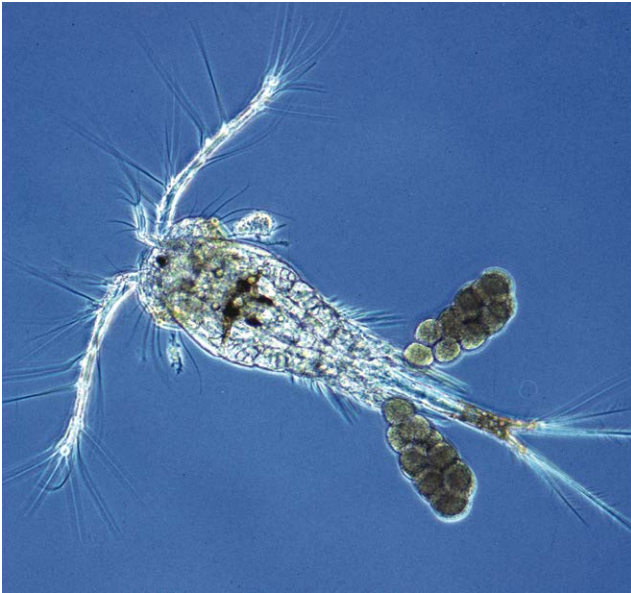
L'expansion des zones à teneur minimale en oxygène modifiera la structure et la fonction des communautés benthiques sur les marges continentales par un changement de la composition taxonomique, de la taille des spécimens, de la structure du réseau trophique, de la bioturbation et du cycle du carbone. La diversité des communautés est particulièrement sensible à l'hypoxie, avec des diminutions régulièrement observées dans des conditions d'hypoxie chez les animaux de toutes tailles (de la méiofaune aux poissons démersaux). La perte de diversité peut réduire la capacité d'adaptation et la résilience aux diverses perturbations. La désoxygénation sur les marges continentales entraîne déjà une compression de l'habitat pour les espèces démersales et benthiques intolérantes à l'hypoxie, et une expansion de l'habitat pour les espèces tolérantes à l'hypoxie, altérant les interactions entre les espèces, y compris avec les humains.

## Plancton estuarien et côtier

La désoxygénation saisonnière des écosystèmes estuariens et côtiers entraîne divers impacts sur le plancton. Pour le zooplancton, cela inclut une abondance globale plus faible, une structure communautaire modifiée avec des taxons porteurs d'œufs plus petits et une augmentation du zooplancton gélatineux avec la diminution de l'oxygène dissous, des distributions verticales moins profondes et une réduction de l'étendue de la migration verticale, des impacts sous-létaux, y compris une taille réduite à l'âge adulte, et des taux de croissance réduits. Les interactions prédateurs-proies pélagiques peuvent être modifiées si les proies zooplanctoniques utilisent les eaux hypoxiques comme refuge contre la prédation par les poissons. À l'inverse, le fait d'éviter les eaux profondes à faible teneur en oxygène peut entraîner des agrégations de zooplancton à l'interface des eaux hypoxiques, lesquelles peuvent être recherchées par les prédateurs zooplanctoniques.

Dans les écosystèmes côtiers en cisailles et à flux différentiel entre les couches superficielles et profondes, le fait d'éviter les eaux profondes à faible teneur en oxygène peut influencer sur la dynamique spatiale des populations de zooplancton en modifiant les patrons d'émigration et d'immigration et les temps de résidence. Les modèles écosystémiques des mers estuariennes et côtières doivent intégrer les eaux hypoxiques saisonnières profondes afin de mieux comprendre les effets de la désoxygénation actuelle et future sur les réseaux trophiques pélagiques.

Les eaux profondes à faible teneur en oxygène pourraient donner lieu à une diminution de l'abondance globale du zooplancton et à une diminution de la pression de broutage sur le phytoplancton. Cela pourrait avoir pour effet de limiter la disponibilité en nourriture des poissons qui s'alimentent de zooplancton. Les eaux à faible teneur en oxygène pourraient aussi entraîner des changements dans les espèces de zooplancton, avec une tendance à des individus de plus petite



Copépode *Oithona davisae* © Albert Calbet.

taille. Ainsi, différentes espèces de zooplancton pourraient être moins nutritives pour leurs poissons prédateurs, et la présence de proies zooplanctoniques de plus petite taille pourrait exiger une plus grande consommation de zooplancton par les poissons pour répondre à leurs besoins nutritionnels.

Le zooplancton utilisant les eaux profondes légèrement hypoxiques comme refuge contre la prédation pourraient également connaître un certain nombre de conséquences. Les poissons se nourrissant de zooplancton pourraient éviter les eaux profondes pauvres en oxygène et donc, consommer moins de zooplancton. Les méduses se nourrissant de zooplancton, par contre, peuvent mieux tolérer les eaux pauvres en oxygène que les poissons, et pourraient donc remplacer ces derniers en tant que consommateurs dominants de zooplancton.

Le zooplancton pourrait éviter les eaux profondes fortement hypoxiques et se regrouper à l'interface de profondeur où l'oxygène diminue rapidement, ce qui pourrait entraîner une augmentation des zones d'alimentation pour les prédateurs du zooplancton.

Les différences entre l'apport d'oxygène dans l'environnement et la demande en oxygène des organismes déterminent la réponse du plancton à la désoxygénation. La définition de l'hypoxie comme une concentration ne tient pas compte de la diminution de la solubilité de l'oxygène et de l'augmentation du taux métabolique des organismes avec l'augmentation de la température. À des températures élevées, les organismes peuvent se trouver dans des conditions stressantes ou létales, même lorsque la concentration d'oxygène dissous est supérieure aux niveaux définis comme hypoxiques ( $<2 \text{ mg L}^{-1}$ ). Les effets réels de l'hypoxie sont très probablement spécifiques à l'espèce et à la température, en fonction de la demande en oxygène de chaque espèce zooplanctonique.

## Élasmobranches

Tous les requins, pocheteaux et raies, qui comptent plus de 1 000 espèces, sont obligés de respirer de l'eau, leur demande

absolue en oxygène étant relativement élevée, s'agissant de prédateurs actifs relativement gros. Avec de larges distributions dans les habitats aquatiques présentant de grandes variations dans les variables physico-chimiques, y compris la concentration d'oxygène, la physiologie, le comportement et l'écologie des élasmobranches sont fortement influencés par un appauvrissement en oxygène.

De nombreux élasmobranches montrent des réactions comportementales rapides à l'eau hypoxique par une activité accrue associée à l'évitement. Néanmoins, les élasmobranches semblent également capables de supporter une légère hypoxie avec des réponses circulatoires et/ou ventilatoires, peut-être même pendant de longues périodes. Cependant, ces stratégies peuvent être insuffisantes pour supporter une hypoxie ou une anoxie modérée, progressive ou prolongée. À mesure que la température de l'eau augmente avec le réchauffement climatique, la plupart des élasmobranches (comme les ectothermes) présenteront des taux métaboliques élevés et seront de moins en moins capables de tolérer les effets d'une hypoxie, même légère, associée à la désoxygénation de l'océan. Ainsi, une hypoxie soutenue dans les eaux côtières plus chaudes sera susceptible d'entraîner des changements dans la répartition des élasmobranches.

On prévoit que l'expansion des ZMO en haute mer, en particulier, aura des répercussions importantes sur les populations d'élasmobranches pélagiques, à mesure que celles-ci seront confinées aux couches superficielles par la formation de bancs d'eau hypoxique et, par conséquent, qu'elles seront plus susceptibles aux pêches de surface. Les couches superficielles recouvrant les ZMO semblent être des zones sensibles d'utilisation spatiale pour les requins pélagiques, de plus en plus susceptibles de subir une importante « compression de leur habitat » (volumes d'habitat réduits) avec l'expansion des OMZ. On sait que ces eaux, situées au-dessus des ZMO, sont des zones sensibles pour la pêche commerciale des requins pélagiques, et l'expansion des ZMO pourrait entraîner des risques accrus de surexploitation d'espèces menacées, comme le requin-taupe bleu, *Isurus oxyrinchus*, déjà surexploité. Il est donc prioritaire d'atténuer les effets de la désoxygénation des océans sur les élasmobranches, de sorte



Requin-taupe bleu *Isurus oxyrinchus* © Richard Robinson / Alamy stock photo.



que les taux de capture futurs soient contrôlés à la lumière du changement climatique, plutôt que de voir leur exploitation exacerbée par la perte d'oxygène dans les océans.



Thon rouge de l'Atlantique *Thunnus thynnus* © Paulo Oliveira / Alamy stock photo.

## Thons et marlins

Les thons et les marlins devraient être particulièrement sensibles aux faibles concentrations ambiantes d'oxygène, compte tenu de leur taux métabolique élevé et des grandes différences entre leur taux de repos et leur taux métabolique maximal. Bien qu'il existe de nombreuses similitudes comportementales entre les différentes espèces, il existe aussi des différences claires et démontrables dans les taux de croissance, la taille maximale des adultes, les capacités physiologiques, la faible tolérance à l'oxygène et les préférences concernant les conditions environnementales.

Le changement climatique devrait modifier les concentrations d'oxygène dans l'ensemble de la haute mer, la plupart des régions subissant des diminutions en raison d'un ralentissement de la ventilation océanique et d'une diminution de la solubilité de l'oxygène en surface. Entre 200 et 700 m de profondeur (une gamme verticale incluant les profondeurs auxquelles les thons et marlins descendent habituellement pour se nourrir), les diminutions les plus importantes et les plus certaines des concentrations en oxygène devraient se produire dans le Pacifique Nord et dans une grande partie de l'océan Austral, tandis que les changements les plus faibles et les moins certains devraient se produire dans l'océan Pacifique tropical. Le long d'une ligne nord-sud traversant le milieu de l'océan Pacifique (160° de longitude ouest), les diminutions prévues de la concentration d'oxygène sont les plus prononcées entre 15°N et 50°N entre 250 et 750 m de profondeur, et au sud de 50°S entre 50 et 300 m.

La profondeur à laquelle les concentrations d'oxygène tombent en dessous de 3,5 ml L<sup>-1</sup> (une concentration hypoxique seuil pour plusieurs espèces de thon et de marlins, dont le thon albacore et le thon listao, les marlins et les voiliers) devrait atteindre les hauts-fonds dans l'ensemble des océans, ce qui pourrait entraîner une compression verticale étendue de l'habitat et des changements dans les mouvements verticaux. Le seuil de 3,5 ml L<sup>-1</sup> prévu dans les hauts-fonds est particulièrement prononcé dans les régions subtropicales et aux latitudes moyennes de l'océan Pacifique. La profondeur de l'oxycline devrait également atteindre plus

de 150 m dans ces mêmes régions de l'océan Pacifique et dans la majeure partie de l'océan Austral. Les espèces résidant dans les régions tempérées du Pacifique Nord, comme l'espadon, le thon obèse, le thon rouge du Pacifique ou l'albacore, pourraient donc être plus durement touchées par les changements futurs de la teneur en oxygène que d'autres espèces, car les diminutions prévues de la teneur en oxygène sont plus importantes à l'intérieur de leur aire de répartition actuelle.

Les changements de température et de teneur en oxygène peuvent modifier la répartition et la capturabilité des thons et des marlins en trois aspects. Parce qu'ils sont très mobiles, les thons et marlins peuvent présenter des changements complexes dans leur répartition en réponse aux conditions environnementales changeantes. Lorsque les températures des couches superficielles deviennent trop chaudes, ils peuvent passer plus de temps en profondeur (en supposant que les concentrations d'oxygène y soient suffisantes), et lorsque les couches à faible teneur en oxygène se trouvent dans les haut-fonds ou s'élargissent, ils peuvent passer plus de temps près de la surface oxygénée (en supposant que les températures ne soient pas trop chaudes), ce qui augmente leur vulnérabilité aux engins de pêche de surface. Si aucun refuge vertical contre des conditions inappropriées n'est disponible, ils peuvent modifier leur répartition horizontalement. Comme les tolérances à la température et à l'hypoxie des thons et marlins sont spécifiques à chaque espèce, tout changement de la température et de la teneur en oxygène dans la colonne d'eau peut modifier la compétition entre les différentes espèces, à mesure que leurs habitats verticaux et horizontaux se déplacent de différentes façons, ce qui pourrait modifier la dynamique établie du réseau trophique, les structures de l'écosystème et les taux de prises accessoires. Les réactions différentielles des espèces-proies aux changements de conditions environnementales pourraient aussi avoir une incidence sur les structures du réseau trophique, la capacité des thons et des marlins à trouver leur nourriture, l'âge de première reproduction et la taille moyenne des individus.

Les changements futurs dans la répartition des thons et marlins risquent de compliquer l'évaluation des stocks et d'entraîner des effets socio-économiques importants. À mesure que les habitats spatiaux des espèces cibles de thon et marlins se déplacent, la capacité des indices d'abondance, fondés sur les captures par unité d'effort (CPUE) et dépendant de la pêche, de saisir avec précision la dynamique des stocks sera compromise, à moins que les méthodes de normalisation des CPUE ne puissent s'adapter. À mesure que les populations des espèces cibles de thon et marlins diminueront en abondance ou s'éloigneront des lieux de pêche traditionnels, les pêcheurs devront investir plus d'efforts pour localiser et capturer ces espèces ou pour reconfigurer leurs engins de pêche afin d'en cibler de nouvelles. Des contraintes économiques, politiques et réglementaires peuvent toutefois nuire à la capacité des pêcheurs de s'adapter efficacement, particulièrement si les espèces franchissent les limites de gestion. Les pêches à petite échelle dans les pays en développement et les pêches reposant sur des navires à portée limitée et à faible capacité technologique sont susceptibles d'être plus vulnérables aux changements dans la portée ou dans les modes de migration.

## Aperçu des conséquences de la désoxygénation des océans

- Les organismes marins ont besoin d'oxygène pour transformer la nourriture en énergie et utiliser cette dernière pour croître et se reproduire, ainsi que pour échapper aux dommages causés par d'autres facteurs de stress, s'y adapter et les réparer. Lorsque les niveaux d'oxygène de l'océan sont insuffisants, un organisme peut ne pas trouver l'énergie nécessaire pour résister à d'autres facteurs de stress. L'augmentation de la température mondiale aggrave le déclin de l'oxygène et augmente les besoins en oxygène des organismes dépendant de la respiration aérobie, simultanément.
- La désoxygénation et la présence de zones avec peu ou pas d'oxygène se produit dans des zones continentales de plus en plus grandes. On prévoit que les conséquences de la diminution continue de la teneur globale en oxygène océanique dissous entraîneront des changements dans les écosystèmes, une compression des habitats actuellement disponibles sur le plan biologique et des changements à grande échelle dans les services rendus par les écosystèmes.
- Une faible teneur en oxygène, combinée à d'autres facteurs de stress, peut réduire la capacité d'un animal à combattre les pathogènes et les parasites, ce qui peut accroître l'intensité et la prévalence d'un certain nombre de maladies chez les animaux marins. La carence énergétique résultant d'une faible teneur en oxygène peut également augmenter la morbidité et la mortalité dues aux maladies.
- L'évitement des zones à faible teneur en oxygène par les espèces peut modifier les répartitions spatiales et temporelles, et la mortalité des espèces mobiles due à la pêche peut augmenter si les pêcheurs ciblent des zones bien oxygénées servant de refuge aux animaux forcés d'éviter les habitats pauvres en oxygène. De plus, un habitat bien oxygéné peut ne pas fournir un refuge convenable pour les espèces vivant dans des zones dépourvues d'oxygène en raison de la prévalence d'autres facteurs de stress comme les températures élevées et les prédateurs.
- Une réduction des captures de pêche et une diminution des bénéfices économiques sont à prévoir dans les États côtiers. La désoxygénation, la pollution et l'acidification des océans combinées peuvent avoir une incidence négative sur certains services écosystémiques. Des impacts négatifs sont à prévoir sur la régulation biologique, le cycle des nutriments et la fertilité, la nourriture, les ressources ornementales (comme les coraux, les perles, les coquillages), le tourisme et les loisirs.
- La désoxygénation affecte directement les espèces, les écosystèmes et de nombreux aspects des services écosystémiques fournis par la haute mer et les eaux côtières. Ses effets sont liés à la variabilité climatique, de sorte que les interactions et la compréhension de ses impacts et interactions sont limitées.
- Une réduction de l'oxygène provoque des modifications de l'aire de répartition des espèces, des changements dans les déplacements verticaux et transversaux et des pertes dans les habitats de frai, entraînant :
  - une modification des taux d'interaction écologique entre les prédateurs et les proies, et entre les espèces en compétition pour les mêmes ressources ;
  - une modification des interactions écologiques, au fur et à mesure que des espèces envahissantes, tolérantes à l'hypoxie, augmentent en abondance ;
  - une réduction de la productivité de la pêche à mesure que le taux de reconstitution des populations diminue chez les espèces benthiques frayantes et chez celles dont la croissance dépend fortement de l'habitat ;
  - une augmentation des conflits liés à la pêche à mesure que de multiples espèces cibles seront poussées vers des refuges à taux d'oxygène restreints ;
  - une incertitude accrue en matière de gestion, étant donné que les suivis de pêche indépendants seront compromis par une accessibilité réduite des poissons aux méthodes de relevé.
- L'expansion spatiale et /ou temporelle des zones actuellement affectées par la suboxie ou l'anoxie, ainsi que le développement de nouveaux habitats contenant peu ou pas d'oxygène dans les régions où ils étaient auparavant absents, se traduiront par :
  - une perte accrue de nutriments azotés à mesure que la dénitrification s'intensifiera ;
  - un risque accru d'accumulation de sulfure d'hydrogène dans la colonne d'eau à mesure que la réduction du sulfate s'intensifiera ;
  - une modification des rapports de disponibilité en nutriments à mesure que le flux de fer et de phosphore provenant des sédiments augmentera.
- L'intensification du réchauffement, de l'acidification et autres facteurs de stress océanique, en conjonction avec l'hypoxie côtière, se traduira par :
  - un plus large éventail de taxons et de processus affectés ;
  - une évolution plus rapide vers un état sans analogue dans l'océan moderne, où de multiples aspects de l'environnement océanique côtier s'éloigneront des plages naturelles d'exposition.





Éléphant de mer *Mirounga angustirostris* © MZPHOTO.CZ / Shutterstock.com.

## Mégafaune des océans

La répartition des mammifères marins dépend principalement de la disponibilité en proies. Par conséquent, les impacts à l'échelle des communautés sur les espèces à branchies affectent les comportements des mammifères marins. L'hypoxie côtière augmente dans les zones d'habitat essentiel des mammifères marins. Il existe environ 47 espèces de mammifères marins dans les régions touchées par l'hypoxie du système du courant nord-californien, de la mer Noire, de la mer Baltique et du Golfe du Mexique.

Les épisodes d'hypoxie côtière entraînent des changements dans la répartition, la mobilité, l'évitement des prédateurs et la mortalité des animaux à branchies. Une hypoxie grave ou prolongée peut entraîner des changements dans le réseau trophique, pouvant avoir une incidence sur le succès de recherche de nourriture chez les mammifères marins. L'augmentation du réchauffement de l'océan et la diminution de la capacité de rétention d'oxygène de l'eau de mer qui en résulte suggèrent une tendance imminente à l'aggravation de l'hypoxie dans le monde entier. Ces tendances peuvent mener à une pression accrue pour les espèces de mammifères marins déjà menacées ou en voie de disparition. À l'inverse, l'augmentation des taux de prédation sur les espèces à branchies frappées d'une incapacité ou d'une compression spatiale due à l'hypoxie pourrait profiter à certains mammifères marins. Les liens directs entre l'hypoxie côtière et les mammifères marins

peuvent être difficiles à quantifier, mais les mammifères marins littoraux abondants sont probablement d'excellentes espèces à étudier pour commencer à élucider ce problème.

La désoxygénation de l'océan entraîne l'expansion des ZMO au large et la formation de hauts fonds. Cette expansion pourrait avoir un effet positif sur l'efficacité de la recherche de nourriture chez les éléphants de mer du Nord, en raison (1) de leur capacité accrue à se nourrir de proies inactives, (2) de la diminution des coûts de plongée en termes de temps et de dépense énergétique, et de l'augmentation subséquente du temps de recherche de proies dans la phase inférieure des plongées de recherche de nourriture, et (3) de l'augmentation de la densité des proies liée à la compression verticale de leur répartition. Une dépendance accrue à l'égard des proies dans la ZMO (environ 40% du total de leurs proies) pourrait entraîner des changements dans la composition des espèces au sein de la communauté mésopélagique. L'augmentation de l'efficacité de recherche de nourriture chez les éléphants de mer pourrait entraîner des augmentations de la population qui, à leur tour, pourraient entraîner d'importantes perturbations et des changements dans le fonctionnement de l'écosystème mésopélagique par des effets descendants et de cascade trophique.

Les cachalots et les baleines à bec, plongeurs profonds typiques de la zone mésopélagique, chassent les calmars qui se nourrissent dans la zone mésopélagique supérieure et se reposent souvent dans la ZMO. Bien que la quête de nourriture et la migration verticale des calmars demeurent mal définies, les données disponibles suggèrent que la formation future de ZMO dans les hauts fonds causera une compression verticale de cette « zone de repos », donnant ainsi un avantage en matière de recherche de nourriture aux cachalots et aux baleines à bec qui se nourrissent de calmars. L'augmentation de l'efficacité de la recherche de nourriture dans les habitats où se produit la formation de ZMO dans les hauts fonds améliorera le rôle des mammifères plongeurs profonds dans le cycle des nutriments, en pompant ceux-ci vers les eaux de surface à partir de la zone de ZMO, ce qui entraînera une augmentation de la production et du flux des nutriments vers les profondeurs. Ce flux accru pourrait finalement affecter la consommation d'oxygène dû à la respiration microbienne et à la nitrification dans la zone où l'oxygène est limité, ce qui entraînerait une expansion supplémentaire de la ZMO.





# CONSÉQUENCES POUR LES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES

Les effets de la désoxygénation de l'océan sur les humains demeurent sous-étudiés et difficiles à évaluer. Peu d'études traitent du sujet et celles qui le font se concentrent généralement sur les pertes économiques associées à la désoxygénation des océans, plus facilement quantifiables, excluent la valeur de non-utilisation et d'existence ainsi que les services culturels, et se limitent à des systèmes relativement petits et limités dans les régions capitalisées. Malgré l'absence de recherches approfondies sur le sujet, les connaissances actuelles fondées à la fois sur les sciences naturelles et sociales peuvent fournir des indications utiles sur les conséquences attendues de la désoxygénation continue des océans en termes de types d'impact généralisés.

Les populations humaines bénéficient des services des écosystèmes océaniques sous forme de bien-être (biens, santé, bonnes relations sociales, sécurité, décisions éclairées). Les services rendus par les écosystèmes se traduisent en bien-être humain selon l'échelle sociale, de sorte que les différences de pouvoir et de vulnérabilité détermineront la façon dont les différents groupes sociaux seront exposés aux dangers créés par la désoxygénation continue de l'océan. Bien que les mécanismes précis des changements biophysiques causés par la désoxygénation des océans ne soient pas connus, les mécanismes sociaux établis semblent indiquer que celle-ci exacerbera les inégalités et les perturbations sociales existantes.

Une réduction de la teneur en oxygène dissous devrait perturber le fonctionnement des écosystèmes et entraîner la dégradation des habitats, générant des défis et occasionnant de nouveaux coûts pour les systèmes existants d'utilisation des ressources océaniques. Les récifs coralliens, les zones humides et les marais, ainsi que les poissons et les crustacés sont les plus vulnérables aux effets négatifs de la désoxygénation des océans, de sorte que les personnes tributaires de ces systèmes seront particulièrement exposées à ces effets négatifs. Certaines espèces tolérantes à l'hypoxie peuvent profiter d'une réduction des niveaux d'oxygène dissous due à une altération, si elle est temporaire, et ces avantages devraient être pris en compte dans les stratégies d'adaptation.

Les populations des basses latitudes, les populations côtières urbaines et rurales, les ménages pauvres des pays en développement et les groupes marginalisés (comme les femmes, les enfants et les populations autochtones) sont les plus vulnérables aux effets de la désoxygénation des océans. Les communautés dans lesquelles ces caractéristiques se recoupent sont particulièrement fragiles, notamment les communautés côtières d'Afrique de l'Ouest et les pays en développement à faible revenu (PDFR). Une meilleure compréhension des effets nuancés de la désoxygénation des océans sur le bien-être humain sera d'une importance cruciale pour une planification efficace en réponse à celle-ci. Les analyses des services écosystémiques devraient tenir compte de l'ensemble des types de services écosystémiques, même s'ils ne sont pas quantifiables, afin de déterminer la profondeur et l'exactitude des informations nécessaires à une bonne planification. Les approches transdisciplinaires visant à évaluer les systèmes représentent, de façon holistique, des moyens prometteurs pour acquérir des connaissances pertinentes aux politiques sur la dynamique, complexe et variable, des systèmes socio-écologiques.

Les politiques et mesures visant à s'adapter à la désoxygénation des océans et à en atténuer les effets devraient être axées sur la réduction de la vulnérabilité des groupes et des individus, en s'attaquant aux causes ultimes et immédiates de l'exposition et d'une sensibilité importante, en atténuant les problèmes tels que l'eutrophisation et en renforçant les capacités d'adaptation. Il convient d'accorder une attention particulière au rôle central que jouent les institutions sociales dans la médiation de l'accès aux services écosystémiques et aux inégalités inhérentes dans la façon dont les humains sont exposés aux risques naturels.

## Conséquences de la désoxygénation des océans sur la pêche

La pêche (commerciale, artisanale, récréative) est un service écosystémique fournissant des emplois et des denrées au système alimentaire mondial. La production mondiale des



## Aperçu des conséquences de la désoxygénation des océans sur les services écosystémiques

Les conséquences de la désoxygénation des océans peuvent avoir et auront probablement un nombre croissant d'impacts et de défis pour les communautés humaines et les économies tributaires, ainsi que pour la société dans son ensemble.

- La réduction des habitats disponibles pour les organismes pélagiques, mésopélagiques et benthiques pourrait causer :
  - des changements dans la répartition des espèces entraînant une réduction de la disponibilité des services écosystémiques dans les zones d'habitats perdus et, dans certains cas, une disponibilité accrue de services écosystémiques dans les eaux bien oxygénées ou grâce à des espèces trouvant un avantage concurrentiel dans les zones hypoxiques ;
  - une réduction des avantages de bien-être humain fournis par des secteurs (comme la pêche ou le tourisme) dépendant d'organismes négativement affectés et des services qu'ils fournissent ;
  - des changements et des incertitudes dans les secteurs et groupes tributaires d'espèces affectées, entraînant des coûts associés à l'adaptation à des conditions nouvelles ou de moins en moins prévisibles ;
  - des réductions plus importantes du bien-être des groupes les plus vulnérables et une augmentation de tous les avantages découlant d'une plus grande disponibilité de services écosystémiques pour les groupes ayant une plus grande capacité d'adaptation. Les groupes n'ayant pas la capacité de s'adapter souffriront de plus de résultats négatifs que ceux ayant une plus grande capacité d'adaptation.
- La réduction de l'abondance et du recrutement des poissons et autres populations marines dans les régions à faibles niveaux d'oxygène pourrait provoquer :
  - une disponibilité réduite de nourriture dans les régions où les concentrations d'oxygène dissous sont faibles. Les systèmes océaniques des basses latitudes et les zones adjacentes aux populations côtières à forte densité seront les plus touchés ;
  - un risque accru pour les groupes les plus tributaires des services écosystémiques affectés et le moins en mesure de s'adapter aux changements, en raison de la perte ou de la réduction des services écosystémiques ;
  - une plus grande vulnérabilité des groupes tributaires d'espèces et de systèmes relativement plus vulnérables aux conditions de faible teneur en oxygène, comme les poissons, les récifs coralliens et les bivalves ;
  - une augmentation de certains services écosystémiques, du fait des effets en cascade et de la modification de la structure du réseau trophique, mais seuls les groupes ayant la capacité d'en tirer profit bénéficieront de ces avantages.
- Les défis en matière de développement de modèles et de qualité d'observation, signifient que :
  - la mise au point de modèles nécessite de nouvelles observations et des expériences spécifiques exigeant des ressources et des capacités sociales ;
  - l'incertitude des modèles se traduira par des connaissances moins complètes et une gestion moins efficace ;
  - les coûts de l'incertitude et de la nécessité de s'adapter à de nouvelles conditions seront plus importants.

pêches de capture s'est stabilisée, alors que la demande continue d'augmenter. La surexploitation et les effets sur les habitats et le réseau trophique font passer la pêche de service écosystémique à facteur de stress. Il est à prévoir que la désoxygénation s'étende au cours des prochaines décennies, et qu'elle affecte négativement la croissance, la survie et la reproduction, la biomasse et le déplacement des poissons, ainsi que leur disponibilité pour la pêche. Il est également à prévoir que l'ampleur des effets de la désoxygénation sur la pêche augmente à mesure que les zones océaniques subissant une désoxygénation croissante chevaucheront les régions côtières et océaniques soutenant une production halieutique élevée.

La quantification des effets de la désoxygénation sur la pêche est compliquée par les effets de facteurs environnementaux variables et autres facteurs de stress affectant également la dyna-

mique des populations de l'espèce visée, mais aussi parce que la dynamique de l'oxygène et de la pêche (pêcheurs et bateaux) dépend fortement de chaque site. L'évaluation des changements climatiques planétaires comporte des changements simultanés de la température, de l'acidité et de l'oxygène, ainsi que des effets causés par d'autres facteurs de stress comme l'élévation du niveau de la mer. Il est difficile d'isoler un effet direct de l'hypoxie sur les débarquements de pêche au moyen d'une analyse fondée sur la corrélation des débarquements et des charges d'azote dans les écosystèmes, mais l'efficacité trophique (débarquements par unité de charge d'azote) est plus faible dans les systèmes où l'hypoxie est importante.

La désoxygénation des océans affecte la pêche de diverses façons. Parmi les exemples, mentionnons les effets d'une faible teneur en oxygène sur la population de poissons cible, elle-même,

par suite d'une réduction du recrutement et de l'abondance de la population, ainsi que les effets d'une distribution spatiale sur les poissons et les crustacés entraînant des changements dans la dynamique des bateaux de pêche. Les analyses vont de preuves circonstancielles fondées sur des données recueillies sur le terrain à des données et modèles détaillés. Les analyses de modélisation démontrent que, dans les situations où l'hypoxie seule peut avoir des effets faibles à modérés à l'échelle de la population, ceux-ci peuvent devenir importants ou amplifiés lorsque l'hypoxie est combinée à d'autres facteurs de stress.

Un effet prédominant de la désoxygénation est la modification des lieux de pêche en réponse à des changements de répartition à petite échelle de l'espèce cible en raison de l'hypoxie, qui affecte également la capturabilité et la bioéconomie de la pêche. On compte sur la capacité de capture pour assurer une gestion efficace de la pêche, et le fait de ne pas tenir compte des effets de la désoxygénation sur la capacité de capture peut donner lieu à des analyses de gestion mal informées et à des directives de pêche erronées.

La diminution des concentrations d'oxygène dans les habitats actuellement utilisés par les poissons ciblés par la pêche entraînera des réductions spécifiques de la croissance, de la survie et de la reproduction des individus. Lorsqu'un nombre suffisant de poissons seront touchés, des effets se produiront également au niveau de la population, par une réduction de la biomasse exploitable, ainsi que par la mauvaise qualité des poissons capturés (p. ex., trop maigres).

De plus en plus de zones océaniques connaîtront une réduction des concentrations d'oxygène, forçant les organismes à éviter les zones mortelles et, dans certains cas, amenant les individus à se regrouper autour des zones d'hypoxie ou à modifier leur répartition spatiale. Cela aura des répercussions sur la pêche. Les activités de pêche seront touchées sur le plan économique (coûts plus élevés), du fait que les bateaux devront effectuer des voyages plus longs, et passeront moins de temps à pêcher et plus à se déplacer pour accéder aux lieux de pêche. Dans certains cas, les poissons seront plus faciles à capturer (regroupement plus près du rivage) et plus accessibles aux pêcheurs locaux. Dans les deux cas, la désoxygénation aura une incidence sur la gestion (probablement plus risquée que prévu), qui repose sur l'établissement d'un lien entre les captures et l'abondance de la population (capturabilité), du fait que les captures ne suivront plus les hypothèses sous-jacentes de capturabilité utilisées dans l'évaluation des stocks.

On observe une désoxygénation croissante à l'échelle mondiale, en particulier dans les zones côtières qui fournissent également une grande partie des captures mondiales de pêche commerciale et de subsistance. Étant donné que les captures de poissons sauvages sont déjà proches des niveaux maximums durables, il est essentiel de disposer de directives de gestion précises. Les gestionnaires devront tenir compte des effets de la désoxygénation dans leurs évaluations et leurs délibérations sur les stocks.

## **De nouvelles avancées en science de la désoxygénation des océans sont nécessaires pour mieux prévoir les tendances et les conséquences du déclin de l'oxygène dans les océans, et pour guider les politiques et les solutions technologiques visant à les réduire. Les domaines critiques incluent :**

- élargir les observations sur l'oxygène en haute mer et dans les eaux côtières, notamment en les intégrant aux programmes et réseaux existants, en ciblant les régions où davantage de données permettront d'améliorer l'évaluation de la situation actuelle et des tendances d'évolution de l'oxygène ;
- réaliser des expériences et des observations pour améliorer la compréhension des mécanismes critiques contrôlant les patrons et les effets de la diminution d'oxygène ;
- Développer des modèles numériques permettant de mieux prédire les effets actuels d'une faible teneur en oxygène et autres facteurs de stress, les changements futurs des niveaux d'oxygène et les avantages potentiels des options de gestion à l'échelle mondiale, régionale et locale ;
- évaluer les effets sur les économies et les sociétés humaines, en particulier lorsque le déclin de l'oxygène menace la pêche, l'aquaculture et les moyens de subsistance ;
- mettre au point un système de gestion des données permettant un contrôle rigoureux de la qualité et un leadership de la part d'un centre de données océanographiques reconnu à l'échelle mondiale, offrant un accès libre à des fins scientifiques et stratégiques ;
- améliorer, de façon continue, les outils de suivi de l'oxygène, y compris les capteurs permettant de mesurer avec précision les concentrations d'oxygène ultra-faibles et les capteurs à faible coût qui rendront possible un suivi plus étendu dans les eaux côtières sous-échantillonnées ;
- le renforcement des capacités dans les zones côtières du monde en développement pour l'observation des paramètres océanographiques de base, en particulier l'oxygène, et de l'impact de la désoxygénation sur la pêche et la biodiversité, devra être considéré comme hautement prioritaire.





## QUE POUVONS-NOUS FAIRE ?

---

La teneur en oxygène de la haute mer et des eaux côtières a décliné depuis le milieu du XXe siècle et devrait continuer à le faire au cours du XXIe siècle en raison du changement climatique et de l'augmentation des rejets de nutriments. Les conséquences de ce déclin de l'oxygène dans l'océan incluent une diminution de la biodiversité, des changements dans la répartition des espèces, le déplacement ou la réduction des ressources halieutiques et des changements dans les cycles biogéochimiques.

L'utilisation de combustibles fossiles et l'agriculture contribuent à la fois au réchauffement de la planète et à un enrichissement excessif des eaux en nutriments. Les eaux usées, et en particulier la biomasse contenue dans les eaux usées non traitées et l'azote et le phosphore dans les effluents d'eaux usées traitées et non traitées, contribuent aussi de façon importante à l'appauvrissement de l'oxygène dans les eaux côtières. Les stratégies de réduction des nutriments les plus efficaces ont fait appel à des exigences juridiques, fixé des objectifs précis et utilisé le suivi pour déceler les problèmes et les réponses aux stratégies de gestion. Il existe toute une gamme de solutions possibles à la réduction des nutriments pouvant être adaptées aux économies et aux besoins locaux. La comparaison des modèles et des observations suggère que les modèles sous-estiment le taux de perte réel d'oxygène dans l'océan. La désoxygénation des océans pourrait se produire plus rapidement et pourrait être plus importante que ne le suggèrent les modèles.

Réduire le taux de perte d'oxygène dans l'océan mondial et diminuer au minimum la contribution du changement climatique à la désoxygénation des eaux côtières exige un effort spectaculaire d'atténuation du climat, principalement par des réductions urgentes, radicales et conséquentes des émissions de gaz à effet de serre dues aux activités humaines. Pour rétablir l'oxygène perdu au cours du dernier siècle à des échelles de temps inférieures au millénaire, il faudra aussi réduire les concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre à des niveaux inférieurs à ceux d'aujourd'hui, grâce à l'élimination active de ces gaz. La désoxygénation induite par le réchauffement ne peut pas être facilement inversée et, par conséquent, une action plus précoce pour limiter les émissions de dioxyde de carbone et réduire le réchauffement sera plus bénéfique.

Il est urgent de poursuivre et d'intensifier les efforts pour quantifier les tendances de la désoxygénation et prévoir les conditions futures de l'oxygène, afin de comprendre les effets de la désoxygénation sur les processus biologiques, biogéochimiques et écologiques, et intégrer la désoxygénation dans l'élaboration des stratégies de gestion de la pêche, et autres. La gouvernance, à des échelles allant de juridictions locales aux organismes internationaux tels que les Nations unies, joue un rôle important dans l'identification du problème et des solutions à la désoxygénation, ainsi que dans les efforts d'atténuation et d'adaptation visant à réduire la désoxygénation et ses conséquences négatives.

Les solutions à la désoxygénation des océans et l'élaboration de stratégies d'adaptation à celle-ci dépendent de données scientifiques solides et suffisantes. La portée internationale de la collaboration scientifique sur cette question est remarquable. Les groupes de travail scientifiques et d'experts peuvent faciliter la communication entre les différentes parties prenantes et aider les décideurs à prendre les mesures nécessaires pour enrayer la désoxygénation croissante à l'échelle locale, régionale et mondiale. Des progrès supplémentaires sont toutefois nécessaires dans la science de la désoxygénation des océans, en particulier pour améliorer les prévisions des conditions et des impacts futurs sur le bien-être humain.

La désoxygénation des océans est un problème progressif qui nécessite une attention immédiate. La désoxygénation provoquée par le réchauffement ne peut pas être facilement inversée. En effet, le taux d'oxygène dans l'océan mettra probablement des siècles à se rétablir du réchauffement prévu dans les scénarios d'émissions de type statu quo. La désoxygénation est intrinsèquement liée au réchauffement climatique. La réduction du réchauffement provoqué par l'homme est le seul moyen de prévenir la perte généralisée d'oxygène dans l'océan. Toutefois, la stabilisation des émissions résultant du changement climatique peut permettre à la ventilation océanique de se rétablir, dans une certaine mesure, ce qui atténuera la perte d'oxygène. Plus le retard dans l'augmentation spectaculaire des ambitions et la réduction drastique des émissions sera long, plus grandes seront les conséquences auxquelles nous devrons faire face à l'avenir.

# REMERCIEMENTS

L'élaboration du présent rapport a représenté une tâche importante. Les rédacteurs souhaitent remercier Minna Epps, Carl Gustaf Lundin, James Oliver et Ulrika Åberg du Programme mondial marin et polaire de l'UICN, Imre Sebestyén pour la mise en page et la conception, et tous ceux qui ont participé à l'examen indépendant par les pairs et fourni des conseils techniques détaillés sur le texte, ainsi que ceux ayant contribué à fournir les illustrations du rapport.

Les rédacteurs tiennent également à remercier sincèrement les scientifiques suivants pour leurs contributions à ce rapport :

Edward H. Allison, Andrew H. Altieri, Hannah Bassett, Hannes Baumann, Denise L. Breitbart, Richard Brill, Denis Chabot, Francis Chan, Guy Claireaux, Daniel J. Conley, J. Kevin Craig, Larry B. Crowder, Curtis Deutsch, Boris Dewitte, Robert J. Diaz, Timothy H. Frawley, Christina A. Frieder, Halley E. Froehlich, Natalya D. Gallo, Véronique Garçon, Keryn B. Gedan, Denis Gilbert, Katerina Goubanova, Marilaure Grégoire, Dimitri Gutiérrez, Kirsten Isensee, Takamitsu Ito, Gil S. Jacinto, R. Jeyabaskaran, J. Anthony Koslow, Shirley Leung, Lisa A. Levin, Karin E. Limburg, Olof Linden, Matthew C. Long, Natalie H.N. Low, Baye Cheikh Mbaye, Fiorenza Micheli, K.A.S. Mislán, K.S. Mohamed, Ivonne Montes, Barbara Muhling, Yasuhiko Naito, S.W.A. Naqvi, Hannah R. Nelson, Crystal A. Ng, Andreas Oschlies, Shelton Padua, James J. Pierson, Grant C. Pitcher, D. Prema, Nancy N. Rabalais, Michael R. Roman, Kenneth Rose, Rutger Rosenberg, Sunke Schmidtke, Brad A. Seibel, David W. Sims, Caroline P. Slomp, Inna M. Sokolova, Sheanna Steingass, Alexandra Stote, Lothar Stramma, Kersey Sturdivant, Phillip Williamson, Karen F. Wishner, Moriaki Yasuhara.

Nous remercions vivement le ministère suédois de l'Environnement et de l'Énergie pour son généreux soutien financier.

Le résumé exécutif ainsi que le rapport technique complet sont disponibles à l'adresse suivante :  
[www.iucn.org/deoxygenation](http://www.iucn.org/deoxygenation)

La terminologie géographique employée dans cet ouvrage, de même que sa présentation, ne sont en aucune manière l'expression d'une opinion quelconque de la part de l'UICN, ou des autres organisations participantes, sur le statut juridique ou l'autorité de quelque pays, territoire ou région que ce soit, ou sur la délimitation de ses frontières.

Les opinions exprimées dans cette publication ne reflètent pas nécessairement celles de l'UICN ou des autres organisations participantes.

L'UICN et les autres organisations concernées rejettent toute responsabilité en cas d'erreurs ou d'omissions intervenues lors de la traduction en français de ce document dont la version originale est en anglais. En cas de divergences, veuillez vous référer à l'édition originale. Titre de l'édition originale : *Ocean deoxygenation: everyone's problem. Causes, impacts, consequences and solutions. Summary for policy makers.* (2019). Publié par : UICN, Gland, Suisse. DOI : <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2019.14.en>

Publié par : UICN, Gland, Suisse.

Droits d'auteur : © 2019 UICN, Union internationale pour la conservation de la nature et des ressources naturelles

Ce document doit être référencé comme suit : Laffoley, D. & Baxter, J.M. (eds.) (2019). *Désoxygénation des océans : le problème de chacun. Causes, impacts, conséquences et solutions. Résumé à l'attention des décideurs.* Gland, Suisse : UICN. 28 pp.

ISBN : 978-2-8317-2026-5 (PDF)

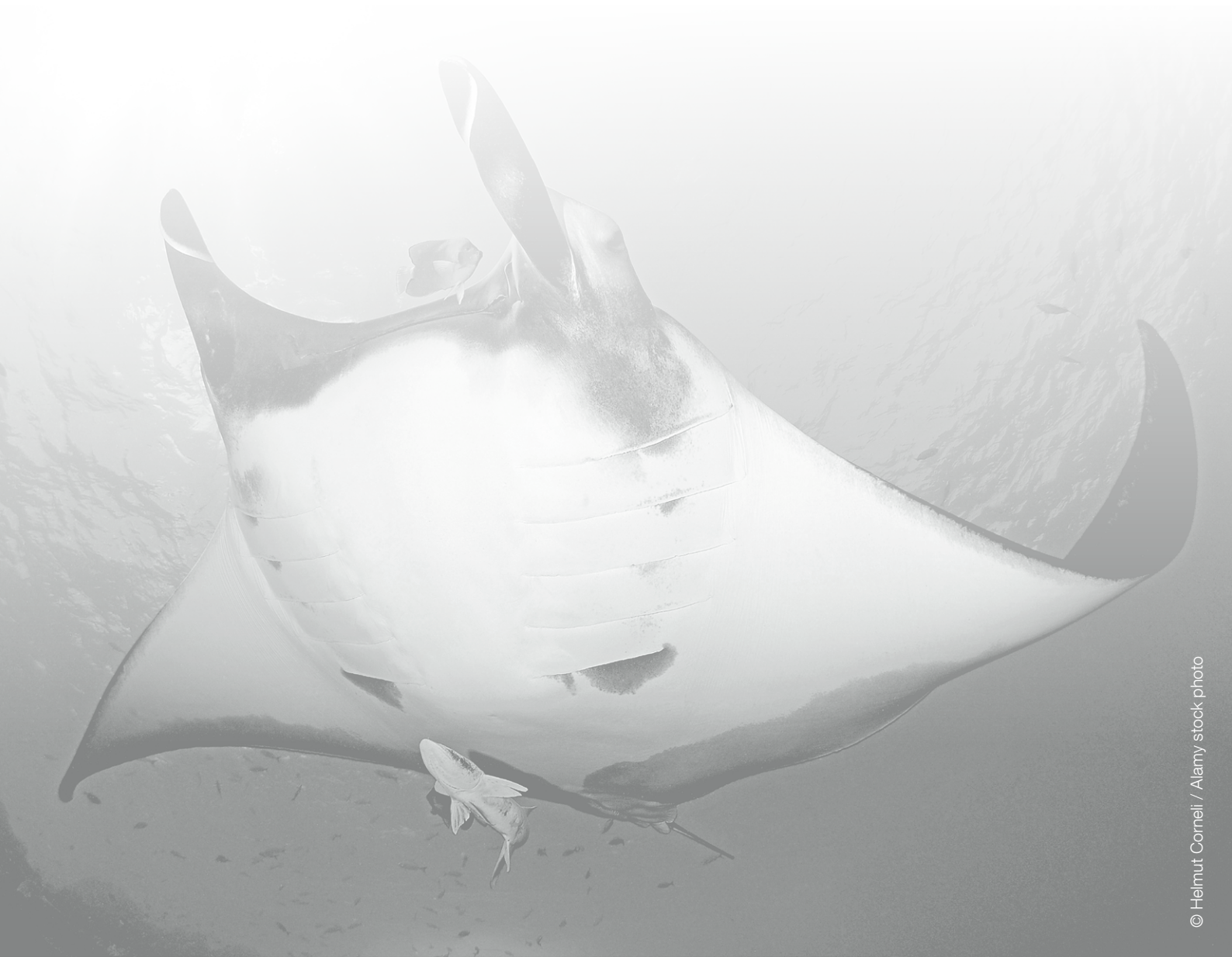
DOI : <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2019.14.fr>

Traduction en français : INTUITIV - [www.intuitivme.com](http://www.intuitivme.com)



L'UICN est une union unique de Membres composée de gouvernements et d'organisations de la société civile. Elle compte avec l'expérience, les ressources et le poids de ses plus de 1 300 organisations Membres et les compétences de ses plus de 15 000 experts. L'UICN est l'autorité mondiale en ce qui concerne l'état du monde naturel et les mesures nécessaires pour le protéger.





© Helmut Corneli / Alamy stock photo



UNION INTERNATIONALE POUR LA  
CONSERVATION DE LA NATURE

SIÈGE MONDIAL  
Rue Mauverney 28  
1196 Gland  
Suisse  
Tel +41 22 999 0000  
Fax +41 22 999 0002  
[www.iucn.org](http://www.iucn.org)

Photos de couverture : dans le sens des aiguilles  
d'une montre à partir du haut  
© Waterframe / Alamy stock photo; © Andrew Altieri;  
© 2004 MBARI; © D.M. Sheny