

> même à terre, où d'anciennes installations minières encombrant partout le paysage...

Afin de diminuer les besoins en minerais et les impacts environnementaux associés, il est essentiel que la société développe à l'échelle planétaire un recyclage efficace des métaux. Pour autant, la récupération ne suffira pas à satisfaire la demande, qui est en augmentation constante. Il est aujourd'hui difficile de dire si, à quantité de minerai équivalente, l'exploitation du plancher océanique aura des conséquences environnementales plus graves que celles de l'extraction terrestre.

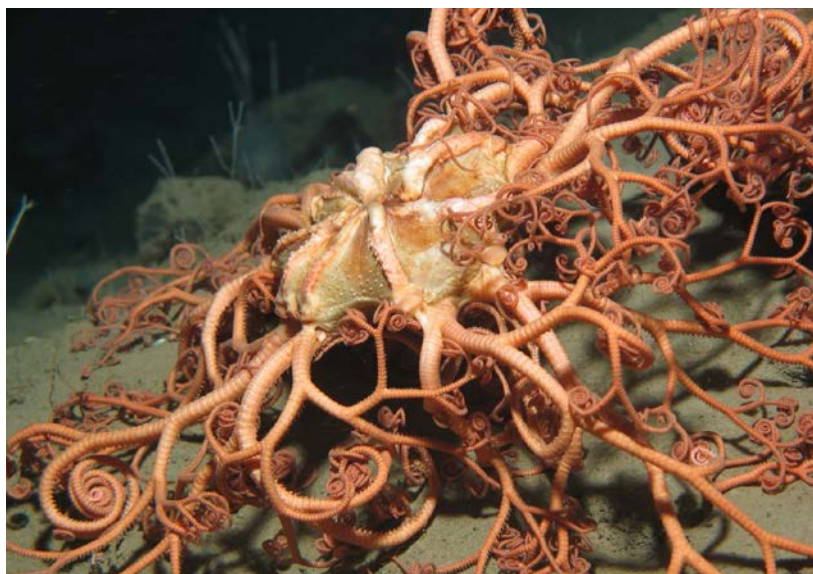
Bien entendu, la régulation des activités minières aura un effet sur ce bilan. L'AIFM ne dispose pas de navires pour inspecter les exploitations, de sorte qu'elle partage cette responsabilité avec les nations parrainant les entreprises minières. Elle ne peut que révoquer le permis d'un pays ou d'une entreprise, suspendre les opérations ou imposer une amende si elle parvient à la conclusion que les opérations minières menées dans une zone ne respectent pas les normes environnementales.

Quatorze des pays membres des Nations unies ont signé la CNUDM, mais ne l'ont pas ratifiée (dont les États-Unis), et 15 autres membres ne l'ont pas signée. Ces 29 États pourraient essayer d'exploiter les eaux internationales sans respecter les règles de l'AIFM, laquelle devrait alors s'en remettre à la diplomatie internationale pour régler le litige.

L'organisation a publié une ébauche de la réglementation qu'elle prévoit pour l'exploitation minière dans les eaux internationales. Les règles correspondantes visent à tout couvrir à terme, de l'émission d'un permis d'exploration et d'exploitation jusqu'aux mesures à prendre pour protéger l'environnement marin. L'AIFM prévoit l'entrée en application de ces règles d'ici à 2020. Quant à l'activité dans les usines terrestres de traitement des nodules, sa régulation relèvera des pays les accueillant.

UN CAUCHEMAR BIENTÔT RÉALITÉ ?

Un autre aspect important de la problématique posée par l'émergence d'une industrie minière en mer est l'exploitation au sein des zones économiques exclusives des différents pays. Certains pays n'ont pas de mers profondes dans cette zone qui s'étend jusqu'à 200 milles nautiques (370 kilomètres) à partir de la côte. D'autres en ont beaucoup, en particulier les États insulaires du Pacifique. Certains pays, telle la République des Palaos, ont purement et simplement rejeté l'exploitation minière de leur plancher océanique. D'autres, tels les Tonga, les Kiribati et les Îles Cook, mettent une régulation en place et recherchent des partenaires industriels. Les Îles Cook ont par exemple signé un contrat avec la société américaine *Ocean*



© SERPENT Project/D.O.B. Jones

Minerals, qui accorde à l'entreprise la priorité quant à la prospection à la recherche de nodules cobaltifères de ses 23 000 kilomètres carrés de zone économique exclusive.

L'exploitation minière des grands fonds marins est ainsi sur le point de devenir une réalité. Étant donné son intérêt économique et stratégique croissant, certains États pourraient lancer une exploitation pilote dans les 5 à 10 prochaines années. Il est souhaitable dans cette perspective que toutes les parties concernées coopèrent, comme elles l'ont fait jusqu'à présent, les essais industriels à petite échelle se faisant conjointement aux indispensables recherches scientifiques.

De fait, une grande partie de ce que nous savons des écosystèmes et des ressources dans les zones économiques exclusives est le fruit d'études menées en conjonction avec les entreprises. Notre expédition de San Diego, par exemple, a été financée par l'institut de technologie du Massachusetts, l'institut Scripps d'océanographie en collaboration avec l'Autorité internationale des fonds marins, l'institut d'études géologiques des États-Unis (USGS) et l'entreprise GSR. En 2019, le projet européen *JPI Oceans* effectuera une étude dans la zone de fracture de Clarion-Clipperton en collaboration avec l'AIFM et GSR.

Certaines des directives et normes à appliquer dans l'exploitation commerciale pourraient être inspirées des règles relatives à des industries existantes, et d'autres créées. Si les différents acteurs en présence parviennent à collaborer, l'exploitation minière du plancher océanique sera une référence éthique, puisque, jusqu'à présent, la réglementation n'a été établie qu'après la mise en exploitation d'une ressource naturelle. Nous pouvons cette fois réfléchir et réguler avant d'exploiter à tort et à travers. ■

L'étoile *Gorgonocephalus caputmedusae* fera-t-elle les frais de l'exploitation minière en eaux profondes ?

BIBLIOGRAPHIE

J. DYMENT ET AL. (coord.), *Les impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales marines profondes, Expertise scientifique collective, Synthèse du rapport, CNRS-Ifremer, 2014* <http://bit.ly/Ifre-Nodu>

Biodiversity, species ranges, and gene flow in the abyssal Pacific nodule Province: Predicting and managing the impacts of deep seabed mining, *Étude technique de l'AIFM n°3, AIFM, 2008*.

Site de l'AIFM: www.isa.org.jm

Expérience Plumex de l'institut Scripps d'océanographie: www.mod.ucsd.edu/plumex

À bout de souffle

**Dans les océans, s'étendent d'immenses zones appauvries en oxygène.
La raison ? Le changement climatique et la pollution.
Et les conséquences pour l'écosystème marin sont dévastatrices !**



L'ESSENTIEL

- Au gré des courants et de l'activité biologique, des régions entières de l'océan s'appauvrissent en oxygène.
- Dans ces zones (notées OMZ), un équilibre s'est installé entre l'apport en oxygène et la consommation.
- Le réchauffement climatique et le déversement

de polluants, *via* les fleuves ou l'atmosphère, perturbent cette situation.

- En conséquence, des régions totalement dépourvues d'oxygène apparaissent et s'étendent toujours plus.

- La faune, du plancton aux poissons, a du mal à s'adapter.

LES AUTEURS



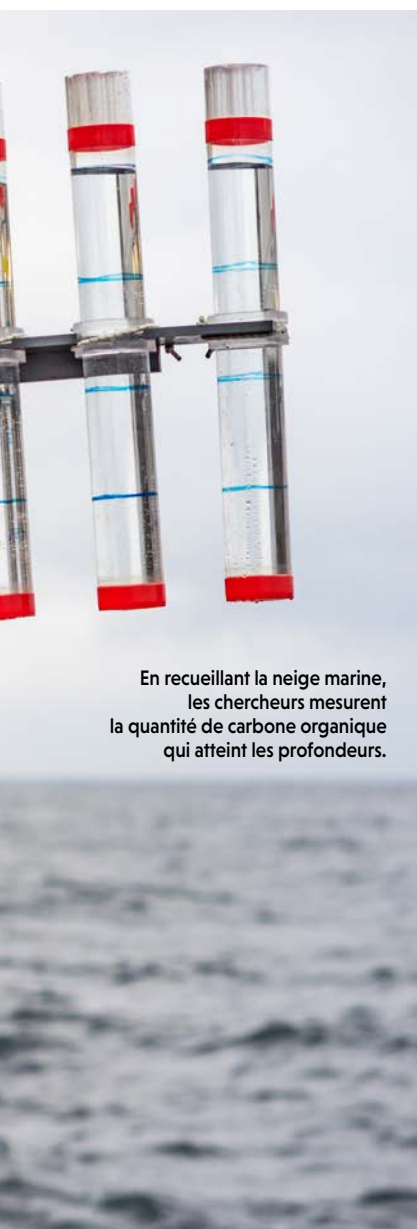
CLARISSA KARTHÄUSER est doctorante à l'institut Max-Planck de microbiologie marine à Brême, en Allemagne.



ANDREAS OSCHLIES est professeur au centre Helmholtz d'océanographie à Kiel, en Allemagne.



CHRISTIANE SCHELLEN coordonne les recherches sur les interactions climato-biogéochimiques dans l'océan tropical au centre Helmholtz d'océanographie.



En recueillant la neige marine, les chercheurs mesurent la quantité de carbone organique qui atteint les profondeurs.

I

neige sur le fond des océans! Cette «neige marine» est une pluie d'agrégats se déposant dans les profondeurs. De quoi est-elle composée? D'un mélange de microorganismes morts, ou mourants, de déjections de poissons, de sable, de suie... Au fond, ils sont dégradés par des bactéries qui utilisent le peu d'oxygène disponible. Mais quand ce gaz vient à disparaître, s'il n'est plus délivré en quantité suffisante par les courants, une zone hypoxique voire anoxique se développe. Et la neige recouvre alors une zone morte...

Des études récentes suggèrent que la teneur en oxygène de la mer a diminué ces dernières décennies, et cette tendance devrait se poursuivre. Les coupables en sont le changement climatique et des apports importants en nutriments. Par quels mécanismes? Le réchauffement ralentit le mélange des océans et diminue la solubilité de l'oxygène dans l'eau. Quant aux nutriments, ils arrivent toujours plus nombreux dans la mer, déversés par les industries, l'agriculture, les eaux usées... Conséquence: une croissance massive des algues et une consommation accrue de l'oxygène lors de la dégradation de la biomasse morte.

Comment vont évoluer les zones déjà pauvres en oxygène? Des régions, déjà

hypoxiques, basculeront-elles vers l'anoxie? Que nous apprend à ce sujet l'histoire de la Terre? Suivons à la trace l'oxygène dans la mer.

L'oxygène n'est pas réparti uniformément dans l'océan. On en trouve de grandes concentrations près de la surface, où les algues, par la photosynthèse, en libèrent même plus que l'eau ne peut en stocker. Ces eaux de surface sont riches en oxygène même la nuit, alors que la photosynthèse est éteinte, grâce à un échange constant avec l'atmosphère.

Par les courants marins et des processus de mélange, l'eau de surface atteint des zones plus profondes, là où des microorganismes dégradent le matériel organique qui y coule, c'est la neige marine. La quantité d'oxygène apportée par l'eau dépend surtout de sa température avant qu'elle ne plonge; en effet, l'eau chaude absorbe moins d'oxygène que l'eau froide. Pour preuve, on trouve de grandes concentrations de ce gaz dans la mer du Labrador, entre le Canada et le Groenland, là où une grande partie des eaux profondes de l'Antarctique prend sa source.

LE RÈGNE DE LA PHYSIQUE

Ce mouvement de plongée est dicté par la physique: les eaux refroidies sont plus denses et coulent. L'eau profonde revient au contact de l'atmosphère, dans les zones de remontée tropicales et subtropicales (*voir la figure page suivante*). C'est le schéma de la circulation thermohaline qui parcourt tous les océans du globe, un tour du monde par ce biais prenant environ 1 000 ans.

Pendant son voyage, la composition chimique de l'eau change, car il «neige» continuellement de la biomasse morte depuis les zones peu profondes. Et les microorganismes qui s'en nourrissent prélèvent toujours plus d'oxygène. Simultanément, le CO₂ et les nutriments que les algues en surface avaient

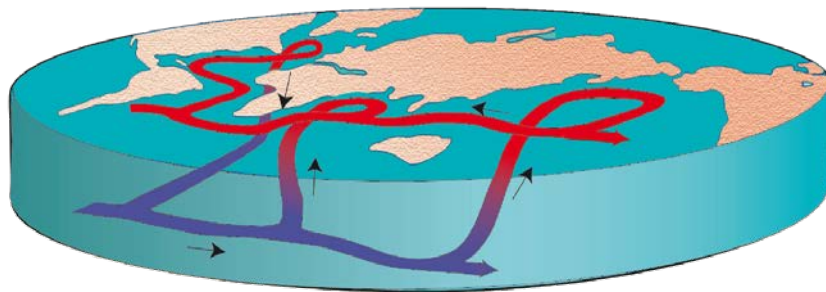


> fixés sont relâchés. Lorsqu'elle passe dans l'Atlantique, l'eau du fond de la mer du Labrador est plus riche en oxygène que dans le Pacifique nord et l'océan Indien.

Les eaux des profondeurs, aux abords des côtes occidentales des continents africain et américain, sous les tropiques, remontent de nouveau. C'est la conséquence des vents parallèles aux côtes qui poussent l'eau de surface vers l'équateur. En raison de la force de Coriolis, cette eau est déviée au large, ce qui entraîne la remontée de l'eau des couches profondes. Cette dernière est riche en nutriments (nitrates, phosphates...), ainsi qu'en oligoéléments comme le fer. La croissance du phytoplancton en est favorisée.

Une partie des algues qui se multiplient est ingérée par le zooplancton et par des poissons (sardines, anchois...). L'autre partie coule dans des couches plus profondes et y meurt, faute de lumière nécessaire à la photosynthèse. Les restes laissés par les prédateurs et leurs déjections s'enfoncent eux aussi. Le matériel organique s'enchevêtre et s'agglomère en de plus gros agrégats, formant des flocons de neige marine qui mesurent parfois plusieurs millimètres.

Les microorganismes qui sont établis sur les flocons et d'autres qui nagent librement entraînent, par leur métabolisme, une plus grande consommation d'oxygène sous la zone où la photosynthèse est possible. Dans ces zones, il n'y a pas non plus de mélange suffisant, si bien que l'oxygène se raréfie.



La circulation thermohaline consiste en un déplacement, une sorte de tapis roulant, de l'eau en raison des variations de température et de salinité. Les eaux chaudes cheminent en surface, remontent l'Atlantique, se refroidissent, plongent, parcourent le trajet inverse en profondeur et remontent en surface dans l'océan Indien et dans l'océan Pacifique.

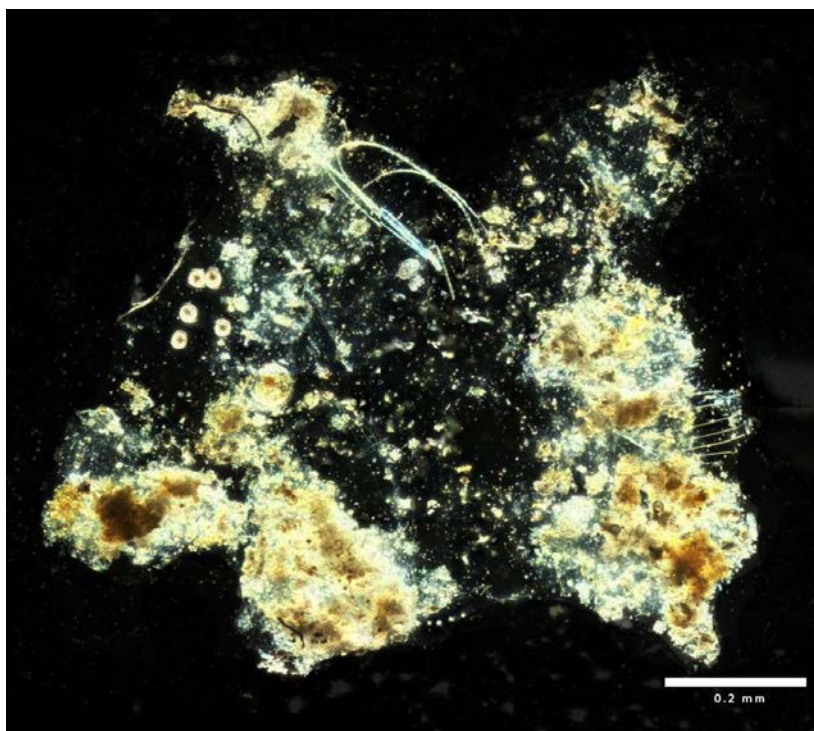
C'est ainsi qu'apparaissent, entre 50 et 1 000 mètres de profondeur, des zones de minimum d'oxygène (ZMO ou OMZ pour l'anglais « Oxygen minimum zone »), parfois nommées zones d'ombre.

LE VAMPIRE DES ZONES MORTES

On trouve des concentrations particulièrement faibles en oxygène, cet élément si important pour la vie, près des côtes du Pérou, du Chili, de la Namibie ainsi que dans le nord de l'océan Indien. C'est aussi le cas dans d'autres régions où circulent des courants faibles, des régions côtières avec de forts apports de nutriments depuis la terre ou dans les mers intérieures. Un exemple, la mer Baltique dans laquelle les fleuves apportent de grandes quantités d'azote d'origine agricole dont profitent les algues. En outre, on trouve dans cette mer une couche stable composée d'une eau de surface chaude et pauvre en sel et, plus bas, d'une eau plus froide et plus salée, qui ne se mélangent presque pas. L'oxygène n'atteint pas les profondeurs.

L'oxygène a aujourd'hui totalement disparu du centre de la plupart des OMZ, au Pérou par exemple. Un écosystème particulier s'y développe : des microbes anaérobies prospèrent, grâce à un métabolisme qui ne nécessite pas, ni même parfois ne tolère, d'oxygène. La plupart des autres animaux ne peuvent survivre longtemps dans ces couches d'eau ; ce sont des zones mortes.

Pourtant, elles ne sont pas désertes. Certains organismes se sont adaptés à la teneur très basse en oxygène et s'y protègent des prédateurs. C'est le cas de *Euphausia mucronata*, le type de krill le plus courant dans la zone de remontée des eaux (on parle aussi de *upwelling*) du courant de Humboldt, le long de l'Amérique du Sud. Ces petites crevettes passent la journée dans les profondeurs et ne s'aventurent vers le haut qu'à la faveur de l'obscurité, pour manger des algues et chercher de l'air. Différents poissons et copépodes (des



Un flocon de neige marine est un agrégat de biomasse morte coulant vers le fond de la mer.

petits crustacés) survivent dans les zones mortes grâce à un métabolisme ralenti.

Les mammifères marins qui plongent en profondeur, comme les éléphants de mer, chassent préférentiellement dans les zones hypoxiques. C'est aussi le cas du vampire des abysses *Vampyroteuthis infernalis* (un poulpe), qui descend de 600 à 900 mètres de profondeur. Il y survit grâce à la grande surface de ses branchies et à l'hémocyanine, une hémoglobine bleue qui se lie efficacement à l'oxygène à des concentrations faibles. À long terme, tous ces animaux ont néanmoins besoin d'oxygène pour survivre.

LES AVATARS DE L'AZOTE

Pour de nombreux microorganismes, cette règle ne s'applique pas : quand l'oxygène s'amenuise, ils passent simplement à la respiration anaérobie. Certains couvrent leurs besoins en énergie et en CO_2 en oxydant des composés organiques, comme du sucre ou des acides aminés. Ce faisant, ils réduisent le nitrate (NO_3^-) en nitrite (NO_2^-), puis en protoxyde d'azote (N_2O) et enfin en azote moléculaire (N_2). D'autres utilisent des ions fer, manganèse ou sulfates (SO_4^{2-}) à la place de l'oxygène. Certains habitants unicellulaires des zones hypoxiques sont en mesure de fixer le CO_2 perdu dans l'eau, comme les algues avec la photosynthèse. Au lieu d'utiliser les rayons du soleil, ils utilisent de l'énergie de liaison chimique, stockée dans les composés anorganiques réduits, comme l'ammonium (NH_4^+) et le sulfure d'hydrogène (H_2S). Leur oxydation libère de l'énergie qui permet aux organismes de synthétiser du sucre et d'autres molécules nécessaires à leur croissance à partir du CO_2 .

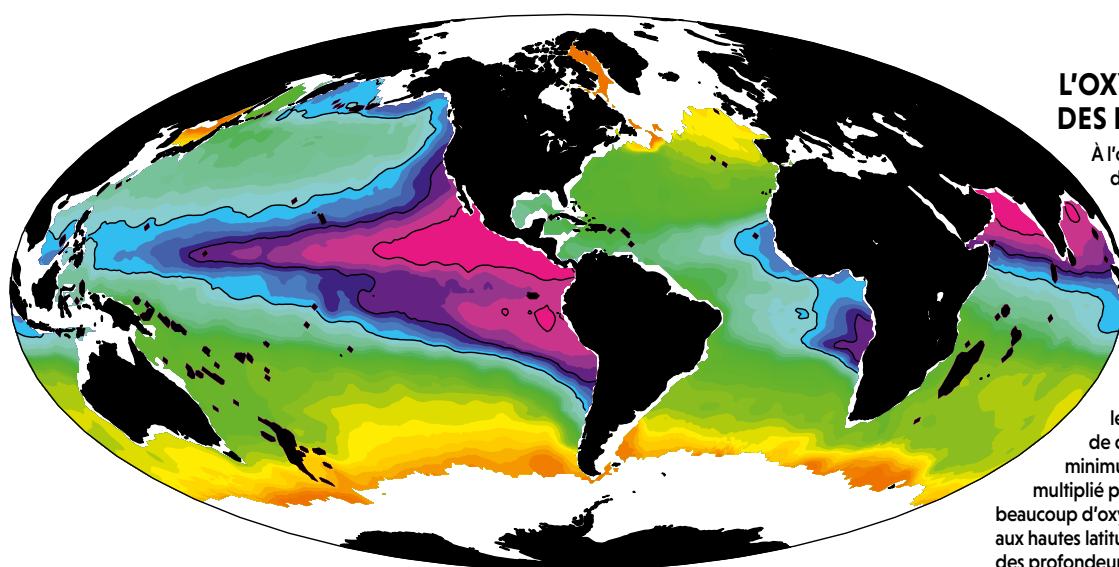
Les processus microbiens dans les OMZ jouent un rôle central dans le cycle de certains

éléments indispensables à la vie, comme l'azote. Dans l'air, qu'il compose à 78%, il se présente principalement sous la forme de molécule N_2 inutilisable pour la plupart des êtres vivants. Seuls quelques unicellulaires peuvent rompre la liaison et transformer l'azote de l'air en ammoniac pour, par exemple, synthétiser des acides aminés.

Les animaux et les plantes absorbent l'azote biologiquement disponible. Lorsqu'ils meurent, les microorganismes recyclent leur biomasse et relâchent de nouveau l'azote, principalement sous forme d'ammonium et de nitrate. Deux groupes de bactéries, abondants dans les zones hypoxiques, retransforment les nitrates et l'ammonium en N_2 . Il s'agit, pour les unes, des bactéries dénitrifiantes, qui oxydent le carbone organique à l'aide des nitrates, et pour les autres, des bactéries anammox (abréviation de «*anaerobic ammonium oxidation*», soit oxydation anaérobie de l'ammonium) découvertes à la fin des années 1990. Ces dernières utilisent l'ammonium et les nitrates pour récupérer de l'énergie nécessaire à la fixation du CO_2 .

La grande disponibilité en nutriments et la pauvreté en oxygène créent des conditions optimales pour ces processus : 20 à 40% de la ➤

LE VAMPIRE DES ABYSSES SURVIT DANS LES ZONES PAUVRES EN OXYGÈNE GRÂCE À L'HÉMOCYANINE, UNE HÉMOGLOBINE BLEUE



L'OXYGÈNE DES PROFONDEURS

À l'ouest de l'Atlantique et du Pacifique, au niveau des tropiques, comme dans le nord de l'Océan indien, à 400 mètres de profondeur, s'étendent d'immenses zones pauvres en oxygène (en rose). Au cours des cinquante dernières années, le volume mondial de ces zones dites de minimum d'oxygène a été multiplié par quatre. On trouve beaucoup d'oxygène (en orange) aux hautes latitudes. C'est là que l'eau des profondeurs océaniques prend sa source.

- > consommation en azote disponible dans l'océan se produiraient dans les zones anoxiques, bien qu'elles représentent moins de 1% du volume total. Les zones mortes régulent ainsi sur le long terme la productivité maritime. En effet, l'eau retourne à un moment ou un autre en surface et, souvent, la quantité d'azote biologiquement disponible qu'elle contient contraint la croissance des algues.

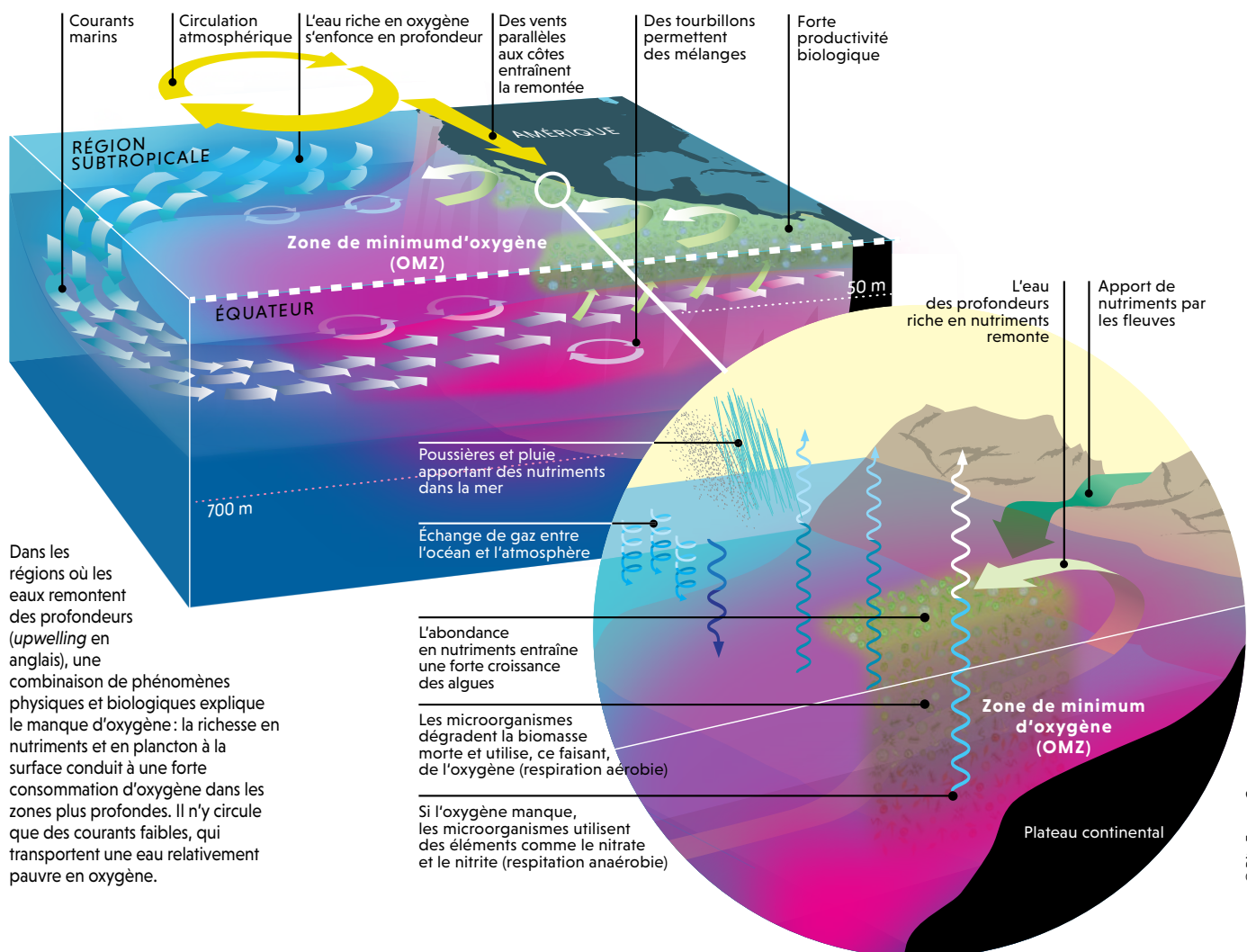
LA NEIGE CARBONIQUE

Les eaux remontantes sont aussi importantes dans le cycle global du carbone, car en surface, de grandes quantités de CO_2 sont fixées par la photosynthèse puis envoyées dans les profondeurs sous forme de neige marine. En moyenne, à peine 1% du CO_2 atteint le fond marin. Le reste est de nouveau relâché sous forme de CO_2 libre par des microorganismes tandis qu'il traverse des centaines voire des milliers de mètres de la colonne d'eau. En l'absence d'oxygène, le processus est plus lent, si

bien que dans les zones hypoxiques ou anoxiques, davantage de dioxyde de carbone organique fixé atteint le fond et sort du cycle que dans d'autres zones marines.

Les émissions de gaz à effet de serre, de CO_2 en particulier, mais aussi de méthane et de protoxyde d'azote, augmentent la température de l'atmosphère et donc de celle de l'océan. La diminution concomitante de la solubilité de l'oxygène dans l'eau de mer entraînera l'extension des OMZ dans les décennies à venir. De fait, leur volume mondial a déjà été multiplié par quatre depuis le milieu du XX^e siècle. La solubilité réduite n'explique pourtant que moins de la moitié de l'appauvrissement en oxygène. L'essentiel est lié à l'affaiblissement de la circulation océanique, une autre conséquence du réchauffement de l'océan : l'eau de surface devenant moins dense, elle plonge moins et la colonne d'eau devient plus stable. L'oxygénation des profondeurs de l'océan diminue.

NAISSANCE DES ZONES MORTES



En outre, les humains modifient le contenu en nutriments des mers, en y ajoutant d'énormes quantités d'azote *via* les fleuves où sont déversés les engrais chimiques et le lisier. Près des côtes en particulier, les populations d'algues et donc la consommation d'oxygène explosent. En un temps très court, la surfertilisation peut faire d'un habitat riche en biodiversité une étendue d'eau hostile à toute vie.

À long terme, les OMZ contrebalancent en partie la surcharge en nutriments. En effet, des processus microbiens y relâchent de l'azote N_2 sans « valeur » à partir des nitrates et de l'ammonium des engrais. Cet effet tampon dépend toutefois d'autres facteurs, comme la solubilité et la température de l'eau. Sur le moment, la dégradation des nutriments n'est pas propice aux organismes à branchies. Mais sur la durée, elle permet toutefois aux écosystèmes de se régénérer, notamment en établissant un nouvel équilibre entre apport et perte d'azote.

LE POISON DU POISSON

En Allemagne, les côtes de la mer Baltique illustrent ce qui se passe au niveau mondial lorsque la teneur en oxygène diminue : les populations de poissons meurent en masse quand l'eau chauffe beaucoup en été. Cela s'est produit à l'automne 2017 où des milliers de cabillauds, de poissons plats et d'autres animaux marins morts ont été rejetés sur la plage d'Eckernförde. La cause principale était un vent du sud, fort et persistant, qui a poussé l'eau de surface riche en oxygène de la côte vers le large. De l'eau pauvre en oxygène est remontée des profondeurs, ce qui a visiblement surpris les poissons. Pour les cabillauds, le manque croissant d'oxygène est problématique pour une autre raison. Les œufs de cabillaud ont une densité qui correspond à celle de l'eau profonde de la Baltique : ils flottent un peu au-dessus du fond. Si cette zone n'est plus suffisamment alimentée par l'eau qui arrive de la mer du Nord, riche en oxygène et plus lourde que celle de la Baltique, les embryons meurent d'asphyxie.

Un autre danger est l'enrichissement des régions pauvres en oxygène en sulfure d'hydrogène toxique. Ce composé se forme dans les sédiments, où il est retransformé par des microorganismes, en présence d'oxygène, en sulfate non toxique. Lorsque l'oxygène manque, le composé toxique s'échappe dans l'eau et occasionne des morts en masse. La libération de sulfure d'hydrogène du fond marin s'est produite à maintes reprises près des côtes namibiennes.

DE L'EAU PAUVRE EN OXYGÈNE EST REMONTÉE DES PROFONDEURS. SURPRIS, LES POISSONS SONT MORTS.

L'événement de ce type le plus important jamais documenté a entraîné la mort d'un nombre incalculable de poissons dans les eaux côtières du Pérou en 2009. Avec l'expansion croissante des OMZ, de tels événements surviendront plus fréquemment.

Au large, les populations de poissons sont aussi touchées par la quantité toujours plus faible d'oxygène. Un exemple : le thon rouge de l'Atlantique, un sportif de l'extrême qui parcourt de longues distances et fait des pointes à 80 kilomètres par heure. De telles performances demandent beaucoup d'oxygène. C'est pourquoi les thons – dont les populations sont déjà fortement décimées par la surpêche – sont menacés par le réchauffement des océans et la solubilité décroissante de l'oxygène dans l'eau de mer.

UN CERCLE VICIEUX

L'élargissement des zones mortes bouleversera tout autant les microorganismes. Des chercheurs de l'institut Max-Planck de microbiologie marine, à Brême, et de l'université du Danemark du Sud ont plongé des détecteurs ultrasensibles en 2016 dans les eaux du golfe du Bengale, qui borde la côte orientale indienne. Résultat : l'endroit est presque totalement anoxique. Le *presque* est important, car les microorganismes, qui utilisent le nitrate et l'ammonium, sont souvent inhibés par des traces d'oxygène. Mais si ce composé devait totalement disparaître, par exemple si la température de l'eau monte, les bactéries dénitrifiantes et anammox pourraient devenir particulièrement actives et transformer davantage de nutriments en N_2 . Une modification même faible de la teneur en oxygène dans la région aurait ainsi des conséquences importantes.

Lors de l'expansion des OMZ, des processus dits de rétroaction positive, c'est-à-dire qui se renforcent seuls, surviennent. Le phosphate (PO_4^{3-}), l'élément le plus abondant dans l'océan avec le nitrate, est l'un des composants de la neige marine. Quand l'oxygène est présent, il se concentre dans les sédiments où il se lie à des particules, organiques ou non. Lorsque l'oxygène se raréfie, le phosphate retourne dans la colonne d'eau proche du fond.

Un cercle vicieux se met alors en place : si l'oxygène manque, le phosphate devient disponible, remonte dans la couche d'eau supérieure, éclairée par le soleil, et favorise la croissance des algues. Les cyanobactéries, qui peuvent fixer l'azote de l'air, profitent particulièrement du phosphate. Ainsi, davantage de biomasse est produite, puis coule et est décomposée par les microorganismes qui consomment de l'oxygène. L'anoxie s'étend, et des surfaces

- toujours plus grandes libèrent du phosphate. De tels mécanismes de rétroaction sont difficiles à stopper. Ils ont lieu par exemple dans la Baltique où, malgré la réduction de l'apport en nutriments, les zones anoxiques s'étendent.

L'ANOXIE DU CRÉTACÉ

Que pouvons-nous apprendre sur l'avenir des océans de l'histoire de la Terre marquée par l'alternance de périodes chaudes et froides? Les événements anoxiques des océans ont eu lieu principalement au cours des périodes de réchauffement global rapide et étaient liés à de fortes concentrations de CO₂ atmosphérique. On trouve la trace de tels événements au Crétacé (entre 145 et 66 millions d'années). Ils sont probablement dus à l'éruption de volcans qui auraient libéré de grandes quantités de gaz à effet de serre et réchauffé l'atmosphère. Les courants marins se sont modifiés. Les hautes températures ont aussi intensifié le cycle global de l'eau, un phénomène qui s'est accompagné d'une érosion accrue des roches et d'apports massifs de nutriments dans les océans, sous forme de phosphate. Au bout du compte, la quantité d'oxygène dans les mers a diminué considérablement. L'un de ces événements anoxiques, survenu il y a environ 91,5 millions, a engendré une importante extinction de masse.

Le Crétacé fut marqué par des processus qui font naître, encore aujourd'hui, des zones pauvres en oxygène: mélange insuffisant de l'eau des profondeurs combiné à une solubilité de l'oxygène réduite en raison de la hausse de la température de l'océan et des nutriments abondants. Une couche très fertile s'est formée près de la surface de la mer, recouvrant une immense zone anoxique. La matière organique s'y dégradant plus lentement, une quantité supérieure à celle d'aujourd'hui atteignait le fond. Pendant des millions d'années, ce dépôt s'est transformé en combustible fossile, que nous réintroduisons désormais dans le cycle du carbone.

En quoi contribuons-nous à l'expansion de régions marines pauvres en oxygène? Et pouvons-nous empêcher que de nouvelles zones mortes se forment? Nous avons deux leviers d'influence: le réchauffement global et l'apport massif de nutriments.

Le changement climatique est un problème complexe qui ne peut être résolu qu'au niveau international. La disponibilité en nutriments dans la mer est à l'inverse un souci d'ordre régional. L'importante production de biomasse près de la côte péruvienne résulte certes d'un processus naturel, la remontée d'eau profonde riche en nutriments, mais dans la Baltique ou le golfe du Bengale, les nutriments proviennent, pour une part non négligeable, des eaux domestiques, de l'industrie et de l'agriculture. On peut donc agir en



Près du Pérou, les eaux riches en nutriments fournissent aux algues (en vert) des conditions idéales de croissance.

© Jeff Schmitz, MODIS Rapid Response Team, NASA/GSFC

BIBLIOGRAPHIE

D. BREITBURG ET AL., Declining Oxygen in the Global Ocean and Coastal Waters, *Science*, vol. 359, eaam7240, 2018.

L. BRISTOW ET AL., N₂ Production Rates Limited by Nitrite Availability in the Bay of Bengal Oxygen Minimum Zone, *Nature Geoscience*, vol. 10, pp. 24-29, 2017.

R. DUCE ET AL., Impacts of Atmospheric Anthropogenic Nitrogen on the Open Ocean, *Science*, vol. 320, pp. 893-897, 2008.

S. SCHMIDTKO ET AL., Decline in Global Oceanic Oxygen Content during the Past Five Decades, *Nature* vol. 542, pp. 335-339, 2017.

L. STRAMMA ET AL., Expansion of Oxygen Minimum Zones May Reduce Available Habitat for Tropical Pelagic Fishes, *Nature Climate Change*, vol. 2, pp. 33-37, 2012.

réduisant l'épandage d'engrais et en construisant des stations d'épuration.

Au large, les produits de dégradation de l'azote, comme les oxydes, constituent une source de nutriments supplémentaire et en progression. Produits dans les régions industrielles et aux transports nombreux, ils se répartissent tout autour du globe et rejoignent la mer à la faveur des pluies. L'apport d'azote atmosphérique dans l'océan correspondrait à la quantité déversée par les fleuves près des côtes au niveau mondial.

TOMBE LA NEIGE...

Depuis une décennie, les chercheurs comprennent de mieux en mieux l'écologie et la dynamique des zones pauvres en oxygène. Toutefois, des questions sur leur apparition, le transport et la dégradation du matériel organique en conditions anoxiques restent en suspens. Sans ces informations, les simulations informatiques ne peuvent que difficilement faire des prévisions. Ainsi, la perte d'oxygène moyenne réelle de la mer est environ deux fois supérieure à celle annoncée par des modélisations.

Cet écart résulte-t-il d'une mauvaise estimation de la circulation océanique et de ses modifications? D'une compréhension incomplète des processus biologiques et chimiques? On l'ignore. Des expéditions sur le long terme sont encore nécessaires, ainsi que des observations de la neige qui tombe sur le fond des océans. ■

VOYAGE UNIQUE AU CŒUR DES OCÉANS

NOUVEAU

CET ÉTÉ VENEZ VIVRE

XPERIENSEA

Parcours immersif
et technologique
au cœur des abysses

Du 13 juillet au 25 août,
Océanopolis vous propose des
expériences immersives et interactives
pour découvrir la mer autrement.
Vous pensiez avoir tout vu ?
Ne manquez pas XperienSea.

Suivez notre actualité sur

oceanopolis.com



brest'aim

Océanopolis
Brest



Demain l'océan : des milliers d'initiatives pour sauver la mer... et l'humanité

HUGO VERLOMME

ALBIN MICHEL, 2018
(400 PAGES, 22,50 EUROS)

L'océan est notre futur, le protéger, c'est sauver l'humanité. Armés d'une planche de surf ou d'un smartphone, à bord de voiliers low-tech ou de navires à hydrogène futuristes, ils sont des millions, connus ou inconnus, à sauver requins et baleines, dauphins ou hippocampes, à cultiver le corail ou les algues, à dialoguer avec les cachalots ou à créer des sanctuaires. Autant de lanceurs d'espoir qui inventent des techniques et des métiers pour dépolluer l'océan, le guérir, ou capter son inépuisable énergie.



La belle aventure de l'océan

PIERRE ROYER ET

JEAN-BAPTISTE DE PANAFIEU

DUNOD, 2018
(216 PAGES, 29 EUROS)

L'océan mondial, qui abrite la majorité des espèces vivantes sur Terre, génère aussi une grande part de l'oxygène que nous respirons. Il régule le climat de la planète et joue un rôle majeur dans la température terrestre. C'est aussi par la mer que circulent les hommes et les marchandises, permettant aux économies de se développer. De l'apparition de l'eau liquide, il y a plus de 4 milliards d'années, aux bateaux autonomes et aux robots plongeurs, cet ouvrage retrace en 100 dates l'histoire mouvementée de l'océan et de son exploration.



Tara : 500 jours de dérive arctique

MICHÈLE AULAGNON-PONSONNET

ET FRANCIS LATREILLE

GALLIMARD, 2008
(188 PAGES, 29 EUROS)

En septembre 2006, la goélette *Tara* se laisse emprisonner par la banquise, au nord de la Sibérie pour un étrange voyage : la traversée de l'océan glacial Arctique, au gré de la dérive des glaces. L'expédition va durer plus de 500 jours. Confronté à la puissance des éléments, au jour permanent puis à la nuit polaire, l'équipage devra survivre dans des conditions extrêmes et remplir coûte que coûte sa mission : étudier les effets du changement climatique. Car le navire est une plate-forme de recherche pour le programme scientifique européen Damoclès.



Deep

JAMES NESTOR

BELIN, 2018
(336 PAGES, 23 EUROS)

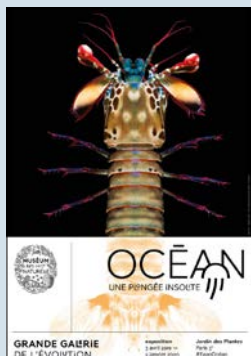
Durant deux ans, l'auteur, qui a passé sa vie sur l'océan, mais ignorait tout de ce qui se trouve sous la surface, a parcouru le globe en quête des secrets des apnéistes, pour comprendre ce qui nous connecte – physiologiquement, spirituellement – à l'océan et aux créatures qui l'habitent. Il a rencontré des personnages hors-norme, qui ont révolutionné les connaissances sur l'océan en marge des laboratoires et de la recherche académique. Un périple aux frontières de la science à couper le souffle qui transforme notre vision de l'océan.

EXPOSITION

OCÉAN, UNE PLONGÉE INSOLITE

MUSÉUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE, PARIS

JUSQU'AU 5 JANVIER 2020



La nouvelle grande exposition du Muséum, au Jardin des plantes, nous plonge dans les profondeurs de l'océan ! Ce territoire qui recouvre 71% de la surface de la Terre abrite une immense biodiversité encore insoupçonnée. Au fil d'un parcours immersif, vous pourrez explorer des milieux insolites à la rencontre d'espèces aux caractéristiques étonnantes. Un voyage sous la surface qui invite à prendre conscience de la richesse du milieu marin et alerte sur les menaces que les activités humaines font peser sur lui.

RENDEZ-VOUS

P. 114

DONNÉES À VOIR

DES INFORMATIONS
SE COMPRENNENT MIEUX
LORSQU'ELLES SONT MISES EN IMAGES



P. 118

SPÉCIMEN

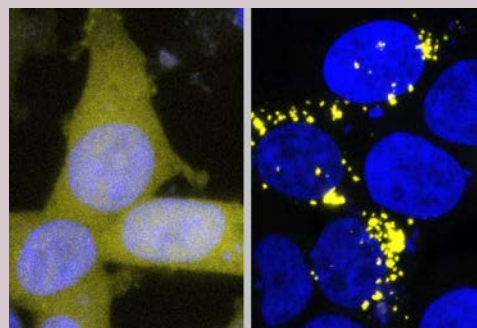
UN ANIMAL ÉTONNANT CHOISI
PARMI CEUX PRÉSENTÉS SUR
LE BLOG «BEST OF BESTIOLES»



P. 110

REBONDISSEMENTS

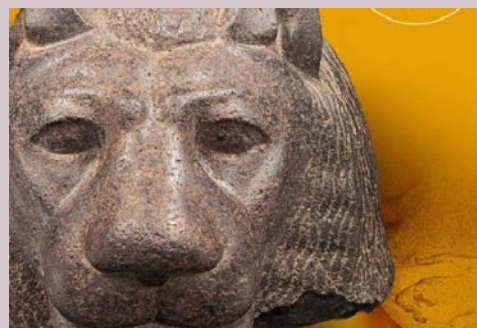
DES ACTUALITÉS SUR
DES SUJETS ABORDÉS
DANS LES HORS-SÉRIES PRÉCÉDENTS



P. 116

LES INCONTOURNABLES

DES LIVRES, DES EXPOSITIONS,
DES SITES INTERNET, DES VIDÉOS,
DES PODCASTS... À NE PAS MANQUER



P. 120

ART & SCIENCE

COMMENT UN ŒIL SCIENTIFIQUE
OFFRE UN ÉCLAIRAGE INÉDIT
SUR UNE ŒUVRE D'ART

