

> 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.

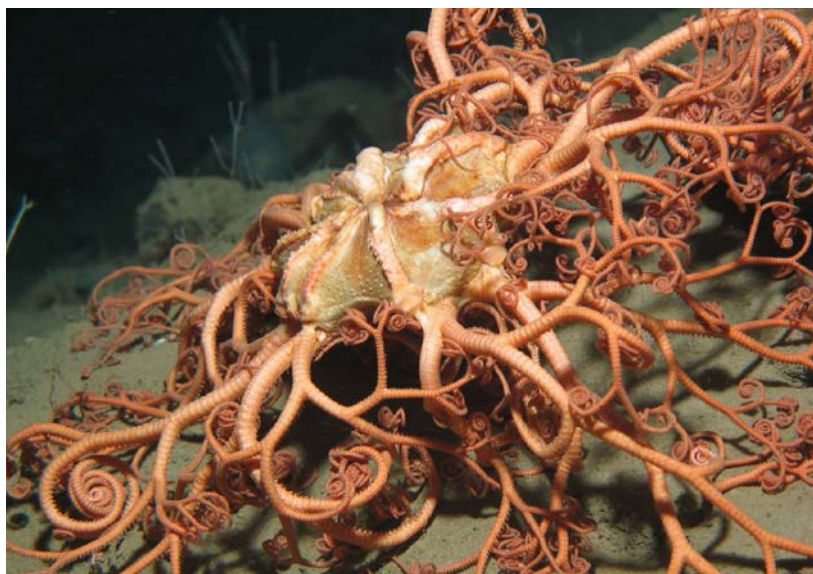
Bien entendu, la régulation des activités minières aura un effet sur ce bilan. L'AIFM ne dispose pas de navires pour inspecter les exploitations, de sorte qu'elle partage cette responsabilité avec les nations parrainant les entreprises minières. Elle ne peut que révoquer le permis d'un pays ou d'une 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



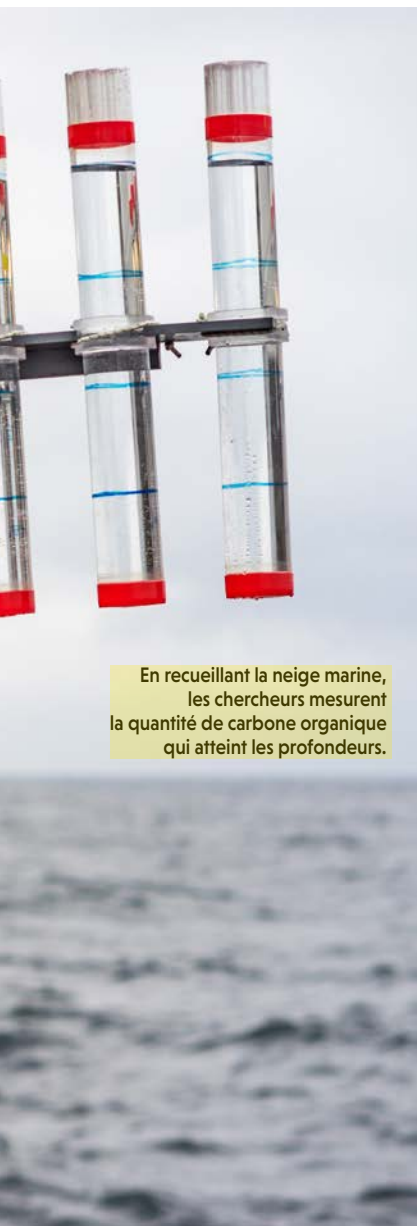
CLARISSA KARTHÄUSER est doctorante à l'institut Max-Planck de microbiologie marine à Brême, en Allemagne.



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.

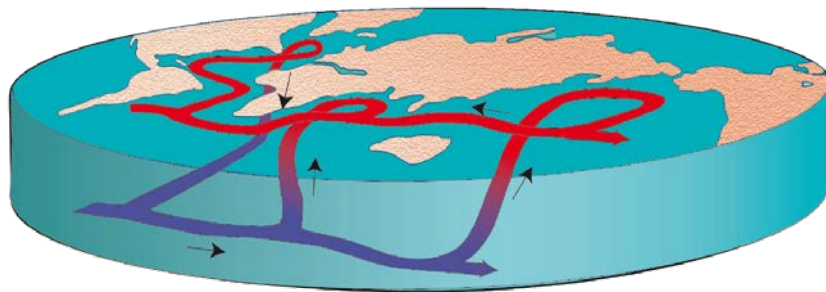
Pendant son voyage, la composition chimique de l'eau change, car il «neige» continuellement de la biomasse morte depuis les zones peu profondes. Et les microorganismes qui s'en nourrissent prélèvent toujours plus d'oxygène. Simultanément, le CO₂ et les nutriments que les algues en surface avaient

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.

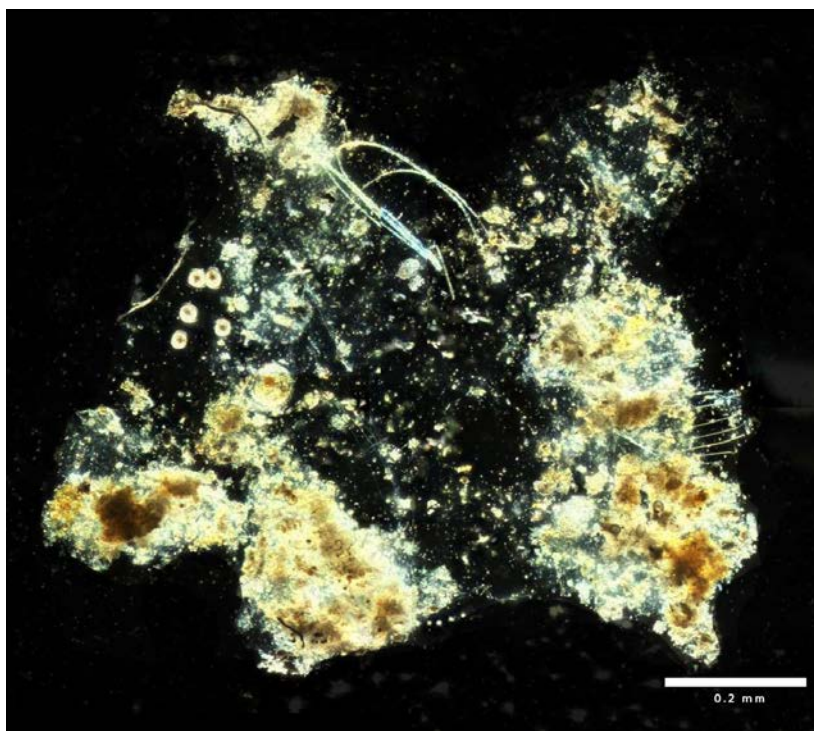
C'est ainsi qu'apparaissent, entre 50 et 1 000 mètres de profondeur, des zones de minimum d'oxygène (ZMO ou OMZ pour l'anglais « Oxygen minimum zone »), parfois nommées zones d'ombre.

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

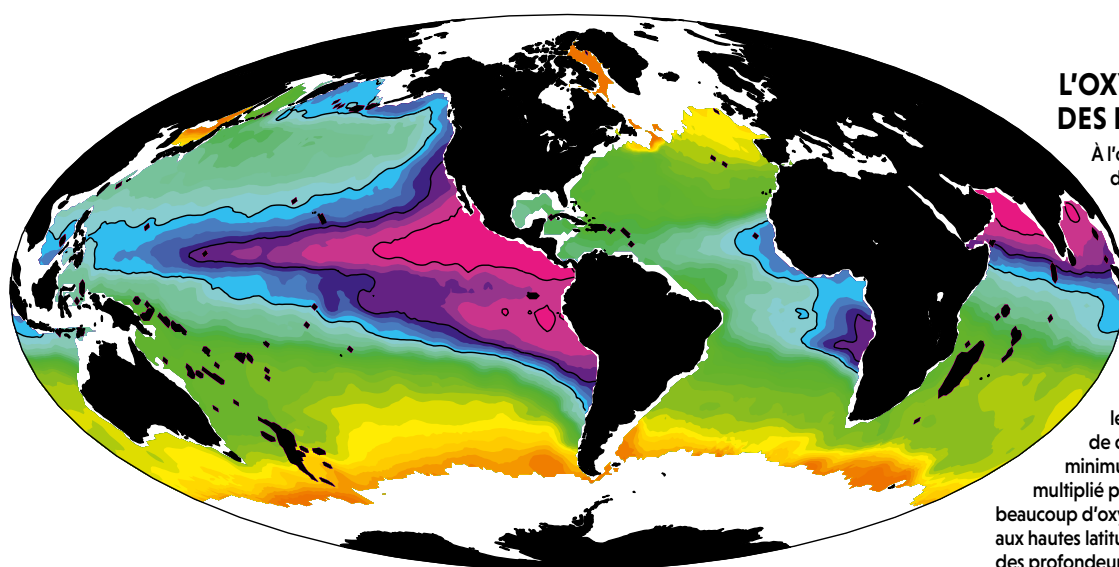
LES ZONES PAUVRES

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.

