

- 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.

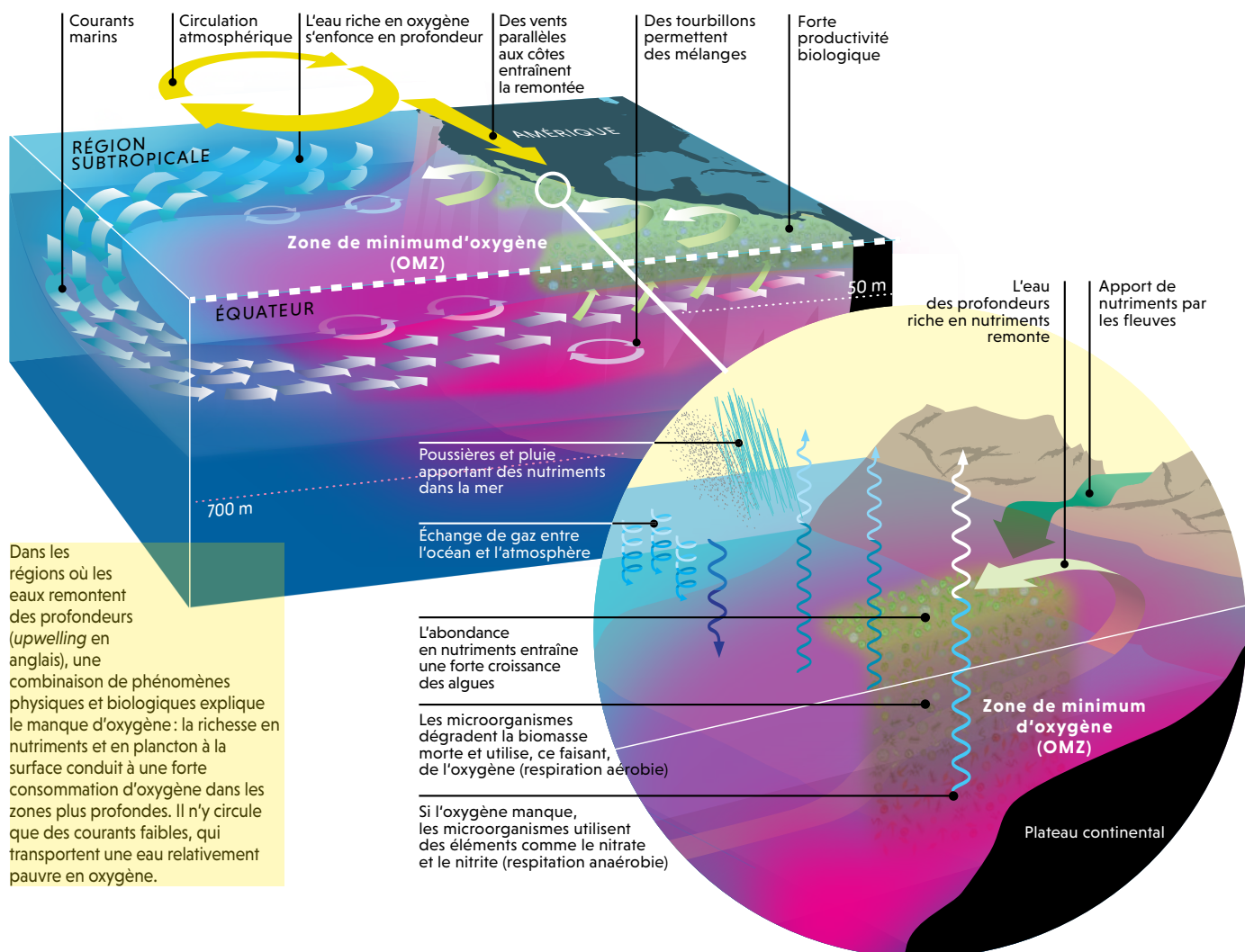
LA NEIGE CARBONIQUE

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