



Océan, biodiversité et climat

Gilles Boeuf

L'OCÉAN ?

L'océan constitue le plus grand espace de vie de la planète et recouvre à l'heure actuelle 70,8 % de la surface de la Terre, soit 361 millions de km². Mais il faut en fait beaucoup plus penser l'océan en volume, soit de l'ordre de 1370 millions de km³. La profondeur moyenne est autour de 3800 m et la principale caractéristique de ce gigantesque milieu est sa continuité, ce qui nous amène à beaucoup plus penser en océan global. Parlons de l'océan, et non « des océans », il est unique et en connectivité ! Un autre trait particulier est, par rapport au reste des eaux libres sur la planète, sa salinité. Celle-ci est extrêmement stable au large (35 psu (*), 1050 mOsm.l⁻¹) et la composition de l'eau océanique au large est presque la même partout, et ceci depuis des dizaines de millions d'années, l'océan est ainsi beaucoup plus stable que les autres milieux de vie.

La biodiversité ne saurait être assimilée à une simple liste d'espèces peuplant un écosystème particulier, elle est considérablement plus qu'un catalogue ou un inventaire. C'est en fait tout l'ensemble des relations établies entre les êtres vivants, entre eux, et avec leur environnement. Nous pouvons la définir simplement comme étant la fraction vivante de la nature. Elle est issue d'une chimie prébiotique, bâtie sur une géodiversité antérieure, et elle s'est diversifiée dans l'océan ancestral vers 3,9 milliards

d'années. La vie est finalement apparue assez rapidement, après le refroidissement initial et la condensation des masses d'eau.

C. De Duve, Prix Nobel en 1974, dit dans « Poussière de vie » en 1996, que la Terre était si idéalement positionnée par rapport au soleil que la vie ne pouvait pas ne pas y apparaître (elle devait donc le faire !) et J. Monod parlait d'hypothèse improbable ! Les plus anciennes roches sédimentaires connues (île d'Akilia, au Sud du Groenland) contenant du carbone d'origine biologique sont datées à 3850 millions d'années (Ma). Il faut imaginer la vie primitive très simple au début, à partir d'un monde ARN et de proto-cellules. Les gisements actuels de stromatolithes, ces roches précipitant le bicarbonate, avec de très beaux gisements en Australie, et récemment découverts au Groenland (3700 Ma) sont très précieux car ils contiennent dans leurs parties silicifiées les plus anciens fossiles de micro-organismes connus, des cyanobactéries. Celles-ci sont parties à la conquête généralisée de l'océan vers 3700-3200 Ma, alors sans aucun oxygène atmosphérique. Grâce à leurs pigments spécifiques, ces cellules, en présence d'eau, ont alors développé la photosynthèse, qui produit de l'oxygène et des sucres à partir de la lumière et du dioxyde de carbone (CO₂), et ceci avant 3500 Ma. L'oxygène a ensuite commencé à diffuser hors du milieu aquatique, la composition de l'atmosphère actuelle avec ses 21 % d'oxygène datant d'environ 100 Ma, au Crétacé.



Dans cet océan ancestral se sont produits des événements déterminants pour le vivant et la biodiversité : (1) l'apparition de la membrane nucléaire et du noyau individualisé (transition procaryote-eucaryote) vers 2 200 Ma ; (2) la capture de cyanobactéries ambiantes qui deviendront des symbiotes et les organites de la cellule, la mitochondrie et le plaste, avec leur propre petit ADN, respectivement vers 2 100 et 1 400 Ma ; (3) l'apparition des pluricellulaires et métazoaires vers 2 100 Ma. Il s'y produira aussi un fait exceptionnel, dans cet océan ancestral, c'est l'apparition de la sexualité, tout d'abord chez les procaryotes, plus tard aussi chez les eucaryotes, qui se révélera si importante pour l'explosion de la biodiversité. La reproduction sexuée permet un brassage génétique créateur de nouveauté et d'une diversité sans précédent : tous les individus sont différents. Une population pourvue de sexualité évolue beaucoup plus vite. De plus, la prévalence de la sexualité permet le développement de la « course aux armements » des parasites et de leurs hôtes (coévolution et dialogue moléculaire), le brassage génétique permettant à terme plus rapidement de « désarmer » le parasite et une sélection sexuelle, bien différente de la sélection naturelle.

Les conséquences physiques des « flux » osmotiques (eau et électrolytes) en environnement marin ont conduit le vivant à deux types de stratégies : (1) dans l'immense majorité des cas, de la première cellule initiale aux crustacés, une régulation isosmotique intracellulaire, entraînant pour l'organisme vivant, séparé de l'eau de mer par une membrane biologique, la même pression osmotique (de l'ordre de 1 000 mOsm.l⁻¹) à l'intérieur (milieu intracellulaire et « intérieurs », extra-cellulaire) que celle de l'eau de mer, (2) plus tard, à partir des arthropodes, une régulation anisosmotique extra-cellulaire pour laquelle les cellules et fluides internes sont beaucoup moins concentrés (3-400 mOsm.l⁻¹) que l'eau de mer. Ceci permettra la sortie de l'océan. Le comportement perpétuel de boisson en mer, chez un poisson osseux par exemple, associé à des mécanismes très actifs d'excrétion des électrolytes par la branchie, l'amène constamment à trouver un délicat compromis, entre une surface maximale de branchie à développer pour aller capter l'oxygène dans un milieu pauvre et très

changeant et par ailleurs une surface minimale pour éviter de graves déséquilibres hydro- minéraux.

Pour la température, bien plus tard, au Trias, vers 210 Ma, après la troisième grande crise d'extinction des espèces vers 251 Ma, les prémices de la thermorégulation se sont développées et ont trouvé leur efficacité optimale chez les grands dinosauriens, puis surtout chez les oiseaux et les mammifères. Aujourd'hui 12 phyla sont exclusivement marins chez les animaux et n'ont jamais quitté l'océan (Echinodermes, Brachiopodes, Chaetognathes...). Par ailleurs, les biomasses peuvent être considérables en mer, les seules bactéries de la couche de sub-surface de l'océan représentant à elles seules plus de 10 % de toute la biomasse carbonée de la planète. L'environnement marin a donc joué un rôle déterminant dans l'histoire de la Vie et l'océan actuel garde son rôle primordial dans l'évolution de la vie et du climat.

SPÉCIFICITÉS DE LA BIODIVERSITÉ MARINE

La biodiversité marine est bien particulière. La diversité spécifique reconnue dans les océans ne dépasse pas 13 % de l'ensemble des espèces vivantes actuellement décrites, soit moins de 280 000. Ceci est peu et peut être lié à deux raisons. La première c'est que les connaissances, surtout pour les zones profondes et pour les micro-organismes, bactéries et protistes divers, ne sont encore que très partielles : nous sous-estimons donc considérablement la biodiversité océanique. Les nouveaux moyens, comme le couplage entre la cytométrie en flux et les sondes moléculaires permettent la découverte d'une extraordinaire diversité biologique. Les séquençages massifs actuels de la masse d'eau océanique, le « séquençage de mers » (C. Venter, séquençage de tout l'ADN dans un volume d'eau de mer filtrée) apportent des données apparaissant pour la plupart inconnues. La navigation circum-océanique Tara Océans nous a fourni en 2015 des informations très précieuses sur l'abondance et la variété des virus, bactéries et protistes, en particulier des dinoflagellés. Ces protistes pourraient représenter près d'un million d'espèces.



Pour tous les procaryotes et les très petits eucaryotes, les approches moléculaires (séquençages de l'ARN ribosomal 16S ou 18S entre autres) apportent chaque jour des connaissances étonnantes. Par ailleurs, et c'est la seconde raison, il est aussi clair que les écosystèmes marins et le mode de vie dans un milieu continu (à travers la dispersion des gamètes et des stades larvaires) des espèces qui les peuplent, prédisposent moins à l'endémisme strict que dans les biotopes terrestres. Il existe beaucoup plus de barrières et d'isolats favorables à la spéciation (processus évolutif par lequel de nouvelles espèces vivantes apparaissent) sur terre qu'en mer. Ceci entraîne des différences importantes en matière de diversité spécifique, les niches écologiques marines au large n'atteignant pas la richesse des terrestres, beaucoup plus morcelées et favorisant beaucoup plus les spéciations nouvelles. La stabilité de l'océan ouvert, au moins depuis 100 millions d'années, est aussi tout à fait extraordinaire : pH (il varie peu), pression osmotique et salinité, températures, pressions hydrostatiques liées à la profondeur, contenus en gaz dissous... Les activités humaines sont en train de changer cela et nous y reviendrons plus loin. Cette stabilité est moins génératrice d'espèces nouvelles.

Par contre, les biomasses marines peuvent être considérables et la seule performance du phytoplancton dans sa capacité à se renouveler peut dépasser les 50 % de la productivité totale de la planète. Si aujourd'hui, il existe de 5 à 7 fois plus de taxons continentaux reconnus, comparativement aux mers et océan, nous pouvons bien sûr nous interroger sur cette question, car initialement la vie fut exclusivement marine, avant les sorties massives, plusieurs fois, en différents endroits sous différentes formes, de l'océan vers 440 Ma pour les métazoaires « élaborés ». La grande crise d'extinction Permien-Trias jouera un rôle primordial avec 96 % d'extinction d'espèces, tant marines que continentales vers 251 Ma. L'explosion des espèces de plantes à fleurs, des insectes et de beaucoup d'autres groupes sur Terre vers 130-110 Ma fut déterminante après les radiations (explosions du nombre d'espèces à partir d'une seule, ancestrale) initiales dès le Dévonien puis surtout le Carbonifère. La coévolution entre plantes et pollini-

sateurs, l'apparition d'une infinité de nouvelles niches ont souvent été proposées pour expliquer l'accélération de la spéciation dans les environnements continentaux à cette époque. Il est également clair que les phénomènes de dispersion des produits sexuels et des larves en mer jouent un rôle considérable dans la répartition des espèces et la biogéographie actuelles. L'endémisme est nettement plus limité dans l'océan au large, la stabilité et la continuité de ce gigantesque milieu expliquant cela. Si sur terre il n'est pas rare de trouver des espèces vivant sur quelques km² nous ne connaissons pas d'exemples d'espèces aussi confinées en mer. La très grande variété des modes de reproduction en mer tire aussi parti des phénomènes de dispersions dans les masses d'eau, mâle et femelle n'étant pas toujours contraints d'être proches ! Ainsi, connectivité et variations bien plus faibles des facteurs environnementaux créent-elles la grande stabilité de l'océan au large et des caractéristiques bien spécifiques de la biodiversité qu'il abrite. Les systèmes côtiers, intermédiaires avec de fortes influences terrigènes sont, eux, soumis à des variations beaucoup plus grandes.

Enfin, n'oublions pas que la biodiversité est bien plus que la seule diversité spécifique, incluant à la fois les espèces et leur abondance relative. Le sens du mot « biodiversité » a été diversement explicité mais exprime globalement « l'information génétique que contient chaque unité élémentaire de diversité, qu'il s'agisse d'un individu, d'une espèce ou d'une population ». Ceci détermine son histoire, passée, présente et future. Même, cette histoire est déterminée par des processus qui sont eux-mêmes des composantes de la biodiversité. En fait, aujourd'hui on regroupe diverses approches sous ce terme : (1) l'étude des mécanismes biologiques fondamentaux permettant d'expliquer la diversité des espèces et leurs spécificités et nous obligeant à davantage étudier les mécanismes de la spéciation et de l'évolution, (2) les approches plus récentes et prometteuses en matière d'écologie fonctionnelle et de bio-complexité, incluant l'étude des flux de matière et d'énergie et les grands cycles biogéochimiques, (3) les travaux sur la nature « utile » pour l'humanité dans ses capacités à fournir des aliments, des substances à haute



valeur ajoutée pour des médicaments, produits cosmétiques... des sondes moléculaires ou encore à offrir des modèles ancestraux et originaux pour la recherche fondamentale et finalisée, afin de résoudre des questions agronomiques ou biomédicales et enfin (4) la mise en place de stratégies de conservation pour préserver et maintenir un patrimoine naturel constituant un héritage naturellement attendu par/pour les générations futures.

À partir de cette biodiversité, les humains pêchent depuis des temps ancestraux, certainement des dizaines de milliers d'années. Dès qu'ils sont parvenus sur des rivages, ils se sont mis à collecter des coquillages, des algues, à piéger des poissons... Comme en agriculture et dans les milieux continentaux, l'humain s'est aussi mis à élever certaines espèces marines sur les littoraux et ceci depuis au moins 4000 ans (Égypte, Chine...). L'exploitation des ressources vivantes aquatiques renouvelables est en plein essor, mais avec de sérieuses inquiétudes sur sa durabilité. Les derniers chiffres disponibles de la FAO en 2013, pour l'année 2012, donnent des valeurs de 79,9 millions de tonnes (Mt) pour les pêches maritimes, 11,5Mt pour les pêches continentales, 19 Mt pour les algues (dont seulement 1 pour la pêche) et 65,6 Mt pour l'aquaculture (dont 20,3 Mt pour la mer), soit un total, tout confondu pour tous les groupes et tous les milieux aquatiques, d'environ 176 Mt. Phénomène lié au réchauffement de la masse d'eau, les stocks halieutiques remontent en moyenne de 72 km vers le nord tous les 10 ans dans l'hémisphère nord et la surpêche mondiale est très préoccupante : on a extirpé de l'océan entre 50 et 90 % de tous les grands individus des poissons pélagiques en 15 ans ! Les $\frac{3}{4}$ de tous les stocks sont pleinement exploités ou surexploités (31 %). L'aquaculture est en plein essor mais pose toujours les questions d'impacts environnementaux, de transplantations d'espèces et, pour certains types d'activités, d'usage de protéines animales dans l'alimentation des espèces d'intérêt (elles sont carnivores). L'océan vivant, ce ne sont pas que ces ressources vivantes, ce sont aussi de l'ordre de 26 000 molécules d'intérêt pharmacologique (anticancéreux, antibiotiques, immunostimulants, immunosuppresseurs, facteurs de croissance, sondes molé-

culaires...) ou cosmétique et d'extraordinaires et forts pertinents modèles pour la recherche scientifique et les applications biomédicales ou agronomiques qui en découlent. Par exemple, la phagocytose et les molécules clés de la cancérisation ont été découvertes grâce à des oursins et étoiles de mer, les bases moléculaires de la mémoire grâce à une limace de mer, la transmission de l'influx nerveux grâce au nerf du calmar, le choc anaphylactique grâce au venin de méduse... Toutes ces découvertes ont valu à leurs auteurs un Prix Nobel.

OCÉAN ET CLIMAT

L'océan et l'atmosphère sont en intime connexion et échangent de l'énergie sous forme de chaleur et d'humidité. L'océan absorbe la chaleur (93 %) beaucoup plus que les surfaces de glace ou les continents et stocke l'énergie beaucoup plus efficacement. Il relargue cette chaleur plus lentement que les continents et contribue au climat plus tempéré des zones côtières. L'océan est ainsi un formidable régulateur du climat. Des changements dans la balance énergétique entre atmosphère et océan jouent un rôle important dans le changement climatique. La circulation océanique est affectée par la circulation atmosphérique et les courants de surface sont sous la dépendance des vents. Ils mélangent les eaux de surface jusqu'à la thermocline sous laquelle les forces essentielles de circulation sont liées à la température et à la salinité, influençant la densité de l'eau. L'océan alimente ainsi les gigantesques quantités d'énergie libérées accompagnant la genèse des tempêtes et cyclones affectant aussi les continents et les populations humaines. Les upwellings, remontées d'eau froide profonde sur les côtes, riches en nutriments, modifient profondément les climats côtiers et leurs fluctuations sont aussi essentielles, à prendre en compte pour comprendre le système climatique. Les trois premiers mètres de l'océan stockent à eux seuls plus d'énergie que la totalité de l'atmosphère et l'océan a de gigantesques capacités d'inertie thermique et dynamique. Ce service de redistribution des masses d'eau en transportant les eaux chaudes des tropiques vers les pôles et vice versa est fondamental. L'océan profond joue



un rôle considérable dans ces capacités de stockage et de relargage de chaleur, cet immense réservoir de chaleur confère à l'océan un extraordinaire rôle de modérateur des variations climatiques. Il contrôle la formation des vents et des pluies. L'océan piège et stocke également le CO₂ (26-30 %) et évite ainsi un trop prononcé effet de serre dans l'atmosphère, mais malheureusement, en contrepartie, il s'acidifie à cause de la production d'acide carbonique. Il est aujourd'hui 30 % plus acide qu'il y a 250 ans. Le phytoplancton océanique stocke également du CO₂ dans la couche de surface ainsi que tous les bio-calcifieurs. Les transports océaniques redistribuent ainsi chaleur et salinité, ces deux effecteurs contrôlant grandement la machine climatique. Les courants des bordures ouest et est des continents jouent un rôle déterminant et leurs fluctuations dans le passé ont conduit aux alternances des phases glaciaires.

Si l'océan joue ainsi un rôle essentiel sur le climat, les pertes en diversité biologique et les pollutions altèrent aussi l'océan et causent des conditions de changement climatique en retour. La quantité de dioxyde de carbone dans l'atmosphère et dans l'océan augmente. Les températures moyennes de l'air de la couche inférieure de l'atmosphère (près de la surface du globe) et de la surface de l'océan sont en hausse. Et le niveau moyen de l'océan se relève trois fois plus vite qu'il y

a une cinquantaine d'années. Les changements rapides de la composition chimique de l'eau de mer ont un effet délétère sur les écosystèmes océaniques qui étaient déjà stressés par la surpêche et la pollution. Cette pollution est massive et généralisée, dans tous les endroits du globe, l'humain étant capable de contaminer des zones où il n'est même pas (Arctique et Antarctique)! Les microparticules de plastiques se sont accumulées, sous l'influence des gyres océaniques en gigantesques concentrations dans cinq zones de l'océan mondial. Aucun effluent souillé ne devrait plus parvenir à la mer! C'est un océan vivant qui peut jouer tous ces rôles.

Ainsi, si le changement climatique joue un rôle direct sur les pertes de diversité biologique, celles-ci contribuent aussi en retour au dérèglement lui-même! Et n'oublions pas que les effets de ce climat trop rapidement changeant s'ajoutent à ceux liés à la destruction et à la pollution des littoraux, aux surexploitations systématiques des ressources vivantes accélérées et à la dissémination anarchique d'espèces (dont les ballastages de grands navires). Il est aussi très important de légiférer astucieusement avant toutes exploitations minérales profondes, le milieu profond étant particulièrement fragile (très longue stabilité).

Cela fait beaucoup et il est grand temps de réagir!