



Les grands fonds océaniques : quels enjeux climatiques ?

L'océan profond de 200 m jusqu'à 11 000 m, représente plus de 98 % des eaux marines en volume. L'image d'un environnement stable et homogène sur de vastes espaces, biologiquement peu actif, ne reflète en fait ni la diversité des écosystèmes profonds ni leur sensibilité aux changements climatiques. Même sur les plaines abyssales, des variations d'abondance de certaines espèces ont été attribuées aux modifications de la productivité photosynthétique à la surface de l'océan. De plus, de nombreux « *hot spots* », points chauds, de biodiversité et de productivité, ainsi que leurs espèces fondatrices comme les coraux profonds pourraient se révéler particulièrement vulnérables aux changements déjà observables dans les grands fonds, comme le réchauffement local ou régional des eaux profondes, leur acidification et leur désoxygénation ainsi qu'aux modifications de la circulation des masses d'eau. Cette vulnérabilité questionne notre capacité à anticiper les conséquences des changements climatiques sur des écosystèmes mal connus et les services qu'ils assurent.

DES ÉCOSYSTÈMES DYNAMIQUES DANS UN ENVIRONNEMENT CONTRASTÉ

Lorsqu'il s'agit de climat, l'océan profond est d'abord perçu comme un vaste réservoir d'eau salée qui permet la distribution de la chaleur à l'échelle planétaire, via la circulation thermohaline. Le piégeage du CO₂ atmosphérique libéré par les activités humaines et par l'excès de chaleur qu'il produit, s'opère sur des échelles séculaires au cours desquelles les eaux, après avoir plongé vers les profondeurs, transitent sur le fond des bassins océaniques avant de migrer à nouveau vers la surface.

On peut considérer que l'océan profond commence à environ 200 m sous la surface, là où il n'y a plus de lumière solaire ni de variations saisonnières de température, et s'étend jusqu'au plancher océanique dont la profondeur maxi-

male atteint 11 000 m. Cet environnement représente plus de 98 % des eaux marines en volume. Il est décrit comme stable et homogène sur de vastes espaces, isolé des continents et de l'atmosphère, et dont les propriétés chimiques (oxygène, nitrate, pH, CO₂) évoluent très lentement au fur et à mesure que la matière organique y est consommée par les micro-organismes.

À cette vision à grande échelle de l'océan correspond celle de grands fonds biologiquement peu actifs, peuplés d'espèces aux métabolismes lents, adaptés aux fortes pressions ainsi qu'à un environnement obscur, froid et pauvre en ressources nutritives. Considérées comme uniforme et quasi-désertiques, ces régions océaniques seraient peu affectées par les changements climatiques en cours, ou seulement à très long terme. Cependant, cette image ne s'accorde pas avec les connaissances que nous avons aujourd'hui des écosystèmes profonds. De plus en plus d'études montrent qu'elle masque, en réa-



lité, l'essentiel des interactions des écosystèmes profonds avec le système climatique. Même les plaines abyssales qui ne sont alimentées que par de faibles résidus de cellules planctoniques et autres débris organiques, connaissent des variations saisonnières. Des variations d'abondance de certaines espèces ont, entre autres, été observées, montrant une dynamique inattendue attribuée aux changements annuels dans la productivité photosynthétique à la surface de l'océan.

Ces vastes espaces sédimentaires occupent 75 % des fonds océaniques, mais il n'est plus possible de négliger d'autres types d'environnements profonds largement aussi importants sur le plan écologique ou sociétal. Le fond des océans possède en effet un relief aussi accidenté que celui des continents (sur 1 100 m comparés aux 8 500 m de l'Everest) sur lequel s'affrontent les courants marins, et qui abrite une mosaïque d'écosystèmes, eux-mêmes formés d'habitats fragmentés (Ramires-Llodra *et al.*, 2010). Les nouvelles techniques d'imagerie satellitaires permettent une vision globale de leur distribution et de leur diversité. Ce relief crée des « grands biomes » équivalents à ceux que dessinent les climats terrestres (toundra, savane, etc.) auxquels se sont adaptées les espèces. Les fonds océaniques présentent eux aussi des « hot spots », points chauds de biodiversité et de productivité, dont le fonctionnement et les services associés pourraient se révéler particulièrement vulnérables aux effets du changement climatique et à l'acidification de l'océan.

À titre exemple, les monts sous-marins qui s'élèvent de plusieurs centaines à milliers de mètres au-dessus des plaines abyssales, favorisent les échanges verticaux de composés chimiques nutritifs vers la surface de l'océan, boostant l'activité photosynthétique et toute la chaîne trophique (Morato *et al.*, 2010). Leurs flancs abritent une grande diversité de coraux profonds (aussi appelés « coraux d'eaux froides » car on les trouve aussi à plus faible profondeur aux hautes latitudes) et de gorgones qui peuvent former des canopées voire même de véritables récifs. Ces espèces protégées au niveau international jouent ainsi un rôle de refuge et nurserie pour de nombreuses espèces de poissons, crustacés, et invertébrés

(Roberts *et al.*, 2006). Les "services rendus" identifiés pour ces écosystèmes sont largement en lien avec les ressources des pêcheries artisanales ou industrielles, mais il est clair que ce patrimoine recèle des richesses encore largement inconnues, comme la biodiversité.

Sur les marges continentales, les canyons sous-marins qui entaillent le plateau continental jouent un rôle similaire lorsqu'ils canalisent les remontées d'eaux profondes (De Leo *et al.*, 2010). Ces vallées profondes peuvent aussi, à l'inverse, accélérer les transferts vers les eaux profondes de matière issue du plateau continental ou des continents.

À cela, il faut ajouter les écosystèmes qui exploitent l'énergie accumulée au cœur du plancher océanique, sous forme de chaleur magmatique ou d'hydrocarbures. Les écosystèmes des sources hydrothermales et des « sources de méthane » ont la particularité de produire localement de la matière organique à partir du CO₂ ou du méthane, grâce à des micro-organismes chimiosynthétiques. Limités aux zones d'échange entre lithosphère et hydrosphère, ils abritent des communautés aussi luxuriantes que les communautés marines photosynthétiques les plus productives. Leur influence dans les grands processus océaniques et en particulier dans le cycle du carbone reste à quantifier, notamment pour le méthane puissant gaz à effet de serre dont une fraction y est piégée sous forme de carbonates. Alors que leur vulnérabilité est mal évaluée, leur valeur patrimoniale sur le plan scientifique (évolution de la vie) et sur le plan des innovations génétiques, (bio-inspiration) est déjà largement démontrée.

PROPRIÉTÉS DES EAUX PROFONDES : QUELS IMPACTS DIRECTS SUR LES ÉCOSYSTÈMES ?

La température des masses d'eau qui alimentent certains bassins profonds a augmenté significativement dans les dernières décennies. Par exemple, sur le site de l'observatoire Hausgarten à la jonction des océans Arctique



et Atlantique, une augmentation moyenne de 0,1 °C a été observée entre 2000 et 2008 à 2500 m (Soltwedel *et al.*, 2005). En Méditerranée orientale une augmentation de 0,2 °C a été observée entre 1995 et 1999. La méconnaissance des fluctuations naturelles dans lesquelles s'inscrivent ces variations limite cependant l'appréciation des impacts possibles. En Méditerranée, le réchauffement observé faisait suite à une diminution de 0,4 °C dans les 4 années précédentes. Ces observations révèlent la possibilité d'un réchauffement progressif des eaux profondes qui pourrait impacter les espèces d'autant plus sensibles qu'elles sont proches de leur seuil de tolérance ; notamment dans les régions polaires où les températures atteignent -1 °C à 1 000 m ou encore en Méditerranée dont la température ne descend pas en dessous de 12 °C.

L'acidification de l'océan, l'autre problème du CO₂, est d'autant plus critique que le pH des eaux profondes est déjà faible du fait du CO₂ produit par la dégradation de la matière organique. Les conditions corrosives anticipées vis-à-vis de l'aragonite pour de larges régions océaniques profondes seront défavorables à la formation des squelettes des coraux froids, même si de récentes expériences *ex situ* montrent que leur sensibilité à l'acidification est complexe. À l'instar des coraux tropicaux, les écosystèmes dont ils sont les « ingénieurs » pourraient subir des dégradations majeures, qui resteront difficiles à anticiper car largement invisibles.

IMPACTS INDIRECTS, COMBINÉS AU CYCLE DU CARBONE ET EFFETS DE SYNERGIE

La pompe biologique qui permet le transfert du carbone vers les grandes profondeurs est aussi la principale source nutritive des communautés abyssales. Les changements de la productivité photosynthétique de surface et de la diversité de composition du phytoplancton sont susceptibles d'affecter ce transfert. La diminution relative des diatomées qui favorisent par effet de ballast la sédimentation pourrait notamment réduire les apports nutritifs sur les fonds. La diminution de

densité de la faune de grande taille (holoturies, échinodermes...) sur le site arctique Hausgarten, ou encore les tendances à long terme sur le site PAP dans la plaine abyssale Porcupine en Atlantique suggèrent que ces phénomènes sont déjà en cours (Glover *et al.*, 2010). En Arctique et Antarctique, ce phénomène est amplifié par la fonte des glaces (banquise ou calotte glaciaire) et influencerait significativement les écosystèmes profonds (Boetius *et al.*, 2012).

D'autres effets indirects peuvent résulter de la diminution de la teneur en oxygène, liée non seulement à l'augmentation de la productivité de surface mais aussi à la réduction de la ventilation des masses d'eau profondes. Par exemple, le bassin caribéen profond est ventilé par le passage d'eaux atlantique froides par un seuil à 1 850 m de profondeur dont le débit semble diminuer depuis les années 1970. De même les eaux au large du Groenland tendent à devenir moins oxygénées, moins froides et plus salées reflétant une ventilation moins efficace (Soltwedel *et al.*, 2005). Les effets d'une réduction faible mais chronique de l'oxygène sur la diversité biologique sont insuffisamment connus. Dans certains cas, des eaux très faiblement oxygénées sont formées conduisant à une réduction majeure de l'habitat pour de nombreuses espèces de poisson pélagiques (marlin, thon) (Stramma *et al.*, 2010). Certaines marges continentales ou mers semi-fermées comme la Mer Noire ont des eaux profondes qualifiées de zones mortes (dead zones) d'où sont exclus tous les organismes marins aérobies (et en particulier toute la faune).

ÉVÉNEMENTS INTERMITTENTS SOUS INFLUENCE ATMOSPHÉRIQUE

L'influence du climat sur les écosystèmes profonds s'exerce aussi au travers de phénomènes intermittents qui affectent la circulation des masses d'eau à l'échelle locale et régionale. L'un des exemples les mieux documentés concerne le phénomène de « *cascading* ». Ces cascades sont formées par les eaux de surface qui lorsqu'elles se refroidissent et s'enrichissent en sel deviennent plus denses que les eaux pro-



fondes, et finissent par « couler » vers les profondeurs en entraînant une couche superficielle de sédiments. Ce phénomène se produit de manière irrégulière et dure quelques semaines. Il a été décrit surtout en Arctique, où il est lié à la formation de la banquise et en Méditerranée, où ces eaux froides et denses sont formées en hiver sous l'effet du vent. Ce sont des événements intenses qui peuvent affecter significativement les écosystèmes en entraînant des quantités importantes de matière organique vers les bassins profonds (Canals *et al.*, 2006).

Plus que les changements à long terme de la circulation océanique, les modifications de l'intensité et de la fréquence de ces événements peuvent affecter le fonctionnement et la stabilité des écosystèmes profonds. Les cycles de perturbation-recolonisation sous l'effet de ces cascades ou d'autres événements extrêmes comme les tempêtes (Puscheddu *et al.*, 2013, Sanchez-Vidal, 2012) commencent tout juste à être décrits.

LES SÉDIMENTS PROFONDS : RÉSERVOIRS OU SOURCE DE GAZ À EFFET DE SERRE (GES) ?

Les marges continentales constituent le plus important réservoir de carbone. Les interfaces continent-océan sont parmi les plus productives et l'essentiel du carbone formé y est rapidement enfoui dans les sédiments. Les écosystèmes benthiques jouent un rôle majeur dans ce piégeage (Levin and Sibuet, 2012).

Le devenir du carbone fossile enfoui sous forme d'hydrocarbures et plus particulièrement de méthane (hydrates et gaz) reste l'une des inconnues majeures. Sous l'effet du réchauffement climatique, la dissociation de ces hydrates pourrait aggraver considérablement la concentration des GES dans l'atmosphère, lorsque ce gaz est émis massivement (train de bulles). Le méthane dissous est lui totalement consommé par des micro-organismes présents dans l'eau et dans les sédiments. La dissociation des hydrates impacte également en cascade les écosystèmes asso-

ciés, par perturbation physique du sédiment (éruption de volcans de boue), limitant l'efficacité de ce filtre biologique.

UNE VISION GLOBALE PLUS DÉTAILLÉE MAIS PEU D'OBSERVATIONS À LONG TERME

Compte tenu de la difficulté d'accéder à un milieu aussi vaste que fragmenté et où les contraintes sont extrêmes pour les instruments comme pour les scientifiques qui les déploient à partir de navires, les données d'observations aux échelles pertinentes au regard du climat sont rares. La situation change cependant rapidement grâce aux technologies actuelles. Les séries de données multi-annuelles qui documentent les paramètres physiques des masses d'eau commencent à être disponibles grâce aux observatoires profonds. Pour autant les observations aux échelles représentatives des impacts climatiques (10-50 ans) sont inexistantes.

Par ailleurs, les satellites d'observation permettent un inventaire de plus en plus précis et détaillé de ces points chauds et des flotilles de flotteurs dérivants, ont apporté une vision large de la dynamique de circulation à échelle régionale et de sa variabilité. Le rôle du relief et de ses hétérogénéités dans les échanges de carbone, et le recyclage des éléments essentiels au plancton (azote, phosphore, fer notamment) commence à être identifié comme majeur sur des échelles locales, même si l'importance de ce relief dans les bilans globaux reste encore à établir.

Aujourd'hui, la connaissance de la variabilité écologique en milieu profond s'appuie sur des séries de données en très petit nombre, issues de campagnes d'échantillonnage. Les avancées technologiques de dernières décennies (ROV, AUV et imagerie HD) ont rendu plus accessibles ces milieux, et favorisent leur exploration. Quelques dizaines de sites profonds ont fait l'objet de suivis multi-annuels permettant une première analyse des causes de leur variabilité (Glover *et al.*, 2010).



NÉCESSITÉ D'ÉTUDES EXPÉRIMENTALES INTÉGRÉES

Pour apprécier l'influence de ces perturbations il est indispensable de mettre en place des sites d'observation et d'expérimentation à long terme permettant d'étudier les effets synergiques entre ces différents phénomènes sur la diversité biologique et fonctionnelle des habitats profonds (Mora *et al.*, 2013). Il est possible d'envisager sur cette base des modèles mécanistes, mais cela nécessite de prendre en compte ces influences multiples sur les organismes et sur la réponse des communautés au changement. Ce dernier point est sans aucun doute le plus difficile à appréhender.

La sensibilité au changement climatique des écosystèmes profonds dépend en effet largement de l'adaptation (plasticité) des espèces et notamment de celles qui sont considérées comme fondatrices ou ingénieures de l'écosystème. Les coraux profonds par exemple jouent un rôle majeur en formant des structures de type récif qui forment l'habitat de nombreuses autres espèces. La sensibilité de ces espèces aux modifications de leur environnement est complexe et commence à peine à être étudiée *in situ*. Les capacités d'acclimatation et d'adaptation

peuvent être variables d'une région à l'autre (comme en Mer Rouge où des adaptations métaboliques permettent de se développer à 20 °C, alors qu'ailleurs la limite est estimée à 13 °C, Roder *et al.*, 2013).

La connectivité entre « *hot spots* » profonds, isolés dans l'espace mais reliés entre eux par la circulation océanique, reste une énigme pour la plupart de leurs espèces endémiques. Là encore le changement climatique apparaît susceptible de jouer un rôle sans qu'on puisse apprécier quelles vont être les conséquences de ses effets conjugués. Les études sur les espèces hydrothermales les plus emblématiques commencent à en donner les clés. Des événements sporadiques dans la circulation des masses d'eaux profondes, induits par des phénomènes atmosphériques comme les cyclones, sont par exemple identifiés parmi les facteurs susceptibles de jouer un rôle dans la distribution des larves. Sous l'influence des oscillations El Niño et La Niña, il a été montré récemment que les épisodes cycloniques au large du Mexique génèrent des tourbillons qui s'étendent de la surface jusqu'à 2500 m de fond, favorisant le transport de larves sur des distances de plusieurs centaines de kilomètres entre écosystèmes habituellement isolés (Adams *et al.*, 2011).



RÉFÉRENCES

- ADAMS D. K., MCGILLICUDDY D. J., ZAMUDIO L., THURNHERR A. M., LIANG X., ROUXEL O., GERMAN C. R. and MULLINEAUX L. S., 2011 – *Surface-Generated Mesoscale Eddies Transport Deep-Sea Products from Hydrothermal Vents*. Science 332, 580 – 583.
- BOETIUS A., ALBRECHT S., BAKKER K., BIENHOLD C., FELDEN J., FERNANDEZ-MENDEZ M., HENDRICKS S., KATLEIN C., LALANDE C., KRUMPEN T., NICOLAUS M., PEEKEN I., RABE B., ROGACHEVA A., RYBAKOVA E., SOMAVILLA R. and WENZHOFFER F., 2013 – *RV Polarstern ARK27-3-Shipboard Science Party. Export of Algal Biomass from the Melting Arctic Sea Ice*. Science 339, 1430 – 1432.
- DE LEO F. C., SMITH C. R., ROWDEN A. A., BOWDEN D. A. and CLARK M. R., 2010 – *Submarine Canyons: Hotspots of Benthic Biomass and Productivity in the Deep Sea*. Proc. R. Soc. B Biol. Sci. 277, 2783 – 2792.
- GLOVER A. G. *et al.*, 2010 – *Temporal Change in Deep-Sea Benthic Ecosystems: a Review of the Evidence from Recent Time-Series Studies*. Advances in Marine Biology. vol. 58, pp. 1-79.
- GUINOTTE J.-M., ORR J., CAIRNS S., FREIWALD A., MORGAN L. and GEORGE R., 2006 – *Will Human-Induced Changes in Seawater Chemistry Alter the Distribution of Deep-Sea Scleractinian Corals?* Frontier in Env. and Ecol., 4 (3): 141 – 146.
- LEVIN L. A. and SIBUET M., 2012 – *Understanding Continental Margin Biodiversity: a New Imperative*. Annu. Rev. Mar. Sci. 4, 79 – 112.
- MORA C. *et al.*, 2013 – *Biotic and Human Vulnerability to Projected Changes in Ocean Biogeochemistry over the 21st Century*. PLoS Biol. 11, e1001682.
- RAMIREZ-LLODRA E. *et al.*, 2010 – *Deep, diverse and definitely different: unique attributes of the world's largest ecosystem*. Biogeosciences 7, 2851 – 2899.
- RODER C., BERUMEN M. L., BOUWMEESTER J., PAPATHANASSIOU E., AL-SUWAILEM A. and VOOLSTRA C. R., 2013 – *First Biological Measurements of Deep-Sea Corals from The Red Sea*. Sci. Rep. 3.
- SOLTWEDEL T. *et al.*, 2005 – *Hausgarten: Multidisciplinary Investigation at a Deep-Sea Long-Term Observatory*. Oceanography 18 (3). 46-61.
- STRAMMA L., SCHMIDTKO S., LEVIN L. A. and JOHNSON G. C., 2010 – *Ocean Oxygen Minima Expansions and their Biological Impacts*. Deep Sea Res. Part Oceanogr. Res. Pap. 57, 587 – 595.