



L'océan profond dans le contexte du changement climatique

Nadine Le Bris

Le plus large espace de la planète occupé par la vie se situe à plus de 200 m sous la surface des mers et océans, où l'obscurité est quasi totale. Ces profondeurs océaniques jouent un rôle majeur dans l'atténuation du changement climatique par la séquestration de la chaleur et du CO₂ d'origine anthropique. Au réchauffement et à l'acidification progressifs des eaux profondes qui en résultent, s'ajoute l'affaiblissement de leur ventilation qui réduit la disponibilité de l'oxygène. Enfin, les modifications de la production phytoplanctonique en surface altèrent la quantité et la qualité des ressources nutritives disponibles en profondeur. Quelles seront les conséquences engendrées par ces perturbations sur ce vaste territoire encore largement inexploré? Les modèles posent le cadre et définissent les tendances à 50-80 ans mais peinent à donner des réponses sur le futur proche. Alors que les observations révèlent des changements plus rapides que les prédictions des modèles, l'adaptation des activités humaines est nécessaire au regard des risques potentiels. De multiples services écosystémiques sont liés aux échanges entre les écosystèmes des fonds marins et de la surface de l'océan. Ces écosystèmes jouent un rôle dans la séquestration à long terme du CO₂ et du CH₄, en piégeant ce carbone sous forme de carbonates ou de matière organique (organismes vivants, débris ou particules, composés dissous dans l'eau). L'augmentation de la température, la diminution de l'oxygène et du pH affectent la distribution des espèces et plus généralement l'ensemble du cycle des nutriments sur lequel reposent les activités économiques durables comme les pêcheries artisanales. Sans une meilleure compréhension de ces phénomènes dans l'espace et dans le temps, anticiper les effets des perturbations climatiques sur la biodiversité et les écosystèmes profonds reste très difficile, autant qu'évaluer les impacts d'activités industrielles nouvelles dont les pressions se combinent aux perturbations climatiques. Mettre en place les mesures clés de l'adaptation au changement climatique doit s'appuyer sur un effort sans précédent portant sur l'acquisition de nouvelles connaissances indispensables à l'établissement d'un cadre législatif et d'outils de gestion efficaces.



UN TAMPON THERMIQUE POUR LE CLIMAT

Couvrant près des deux tiers de la planète et représentant 98 % du volume de l'océan, les profondeurs marines apparaissent toujours comme un espace inaccessible, "à la marge". L'empreinte des activités humaines y croît pourtant très rapidement et l'océan profond se retrouve aujourd'hui au cœur d'enjeux majeurs du développement durable. On connaît les problèmes posés par les activités extractives, dont la pêche dite "profonde", l'évolution de l'exploration et de l'exploitation du pétrole et du gaz de plus en plus profond ou encore les projets d'exploitation minière dans les grands fonds, par définition "non durables". On sait moins que les canyons, monts sous-marins et autres "forêts animales" de gorgones, éponges et coraux profonds, sont essentiels au maintien de certaines d'espèces de poissons, soutiennent certaines pêcheries locales et font partie intégrante des conditions de leur durabilité. Ce que certains appellent "services écosystémiques" et cherchent à quantifier sur le plan économique, impliquent beaucoup d'autres fonctions de ces écosystèmes. À l'échelle planétaire, les eaux profondes et les fonds océaniques jouent un rôle prédominant dans l'atténuation du changement climatique, le volume des eaux profondes jouant un rôle de tampon thermique pour le climat. Près de 30 % des émissions anthropiques de CO₂ sont stockés dans les océans, dont la moitié est séquestrée à plus de 400 m de profondeur et le quart en dessous de 1 000 m (Gruber *et al.* 2019). 90 % de la chaleur accumulée par effet de serre a été absorbée par l'océan. Près de la moitié de cette chaleur est stockée à plus de 700 m de profondeur (42 % du total, Abraham *et al.* 2013).

CE QUE DISENT OU NE DISENT PAS LES MODÈLES CLIMATIQUES SUR LES CHANGEMENTS EN PROFONDEUR

Les modèles climatiques décrivent, avec de plus en plus de finesse, le réchauffement et l'acidification des eaux profondes qui résultent de l'accumulation du CO₂ et de la chaleur. Ils simulent aussi le transport vers

les profondeurs de la matière organique produite en surface, dont les modèles prédisent un déclin général, ainsi que sa consommation progressive par la faune marine et par les micro-organismes au cours de la sédimentation (Bopp *et al.* 2013). Selon les scénarios d'émission de CO₂ dans l'atmosphère, les prochaines décennies devraient voir une diminution du pH, de l'oxygène et de la quantité de particules organiques exportées en profondeur pour la plupart des couches profondes de l'océan. La vitesse et l'amplitude de ces changements sont très variables selon les régions océaniques, et surtout ils se combinent aux variations naturelles des eaux marines dont le pH, la teneur en oxygène et en particules diminue plus ou moins fortement avec la profondeur. En cumulant les modifications prédites par ces modèles, les pressions exercées sur les écosystèmes des fonds marins ont pu être comparées et leur vulnérabilité mieux évaluée (Mora *et al.* 2013, Sweetman *et al.* 2017). Ces modèles commencent même à être utilisés pour prédire et intégrer ces risques dans l'établissement des zones de protections, comme les Écosystèmes Marins Vulnérables dans lesquels la FAO limite les activités de pêche (FAO, 2019).

Les facteurs susceptibles d'avoir un impact significatif sur la biodiversité et les fonctions qu'elle assure dépendent en fait du type d'écosystème. Les scientifiques ont très tôt donné l'alerte sur la vulnérabilité des écosystèmes abritant des colonies abondantes de coraux profonds (Guinotte 2006). En l'absence de photosynthèse, les eaux profondes sont naturellement plus riches en CO₂ et plus acides que les eaux de surface. Dans de nombreuses régions, l'augmentation du CO₂ en profondeur, confirmée par les séries de mesures, place les différentes espèces de coraux profonds dont le squelette calcaire est formé d'aragonite dans des conditions corrosives. Gehlen *et al.* 2015 prédit que dans l'Atlantique nord la plupart des sommets de monts sous-marins seront touchés par ce phénomène. Les plaines abyssales, pauvres en ressources nutritives, pourraient quant à elles perdre une large part de leur macrofaune en conséquence d'une ressource nutritive plus rare liée au changement de production de phytoplancton en surface. Enfin, la diminution de l'oxygène reste sans aucun doute l'une

des menaces les plus importantes sur la biodiversité de l'océan profond et les fonctions qu'elle assure. La situation est particulièrement critique aux profondeurs intermédiaires (200-700 m), où la teneur en oxygène est déjà réduite à cause de la consommation de l'oxygène par les micro-organismes qui dégradent la matière organique. La concentration en oxygène atteint parfois des seuils au-delà desquels toute vie animale est exclue. Ces "dead zones" ou "zones mortes" où ne prolifèrent que des micro-organismes s'étendent horizontalement et s'épaississent, réduisant d'autant l'habitat de nombreuses espèces de poissons ou invertébrés (Gilly *et al.* 2013).

Ces estimations sont encore très incertaines pour de nombreuses régions profondes où les mesures sont trop rares pour caler les modèles. Pour autant, les observations confirment que la quantité d'oxygène dans l'océan a diminué de près de 2 % par décennie depuis 1960, et que la plus faible ventilation des eaux profondes, explique en grande partie la diminution continue de la concentration moyenne en oxygène observée au delà de 1 000 m (Schmidtko *et al.* 2017). Plus important encore, l'extension des zones de minimum d'oxygène dépasse les prédictions des modèles, et la diminution de l'oxygène peut atteindre jusqu'à -4 % par décennie en périphérie de certaines zones de

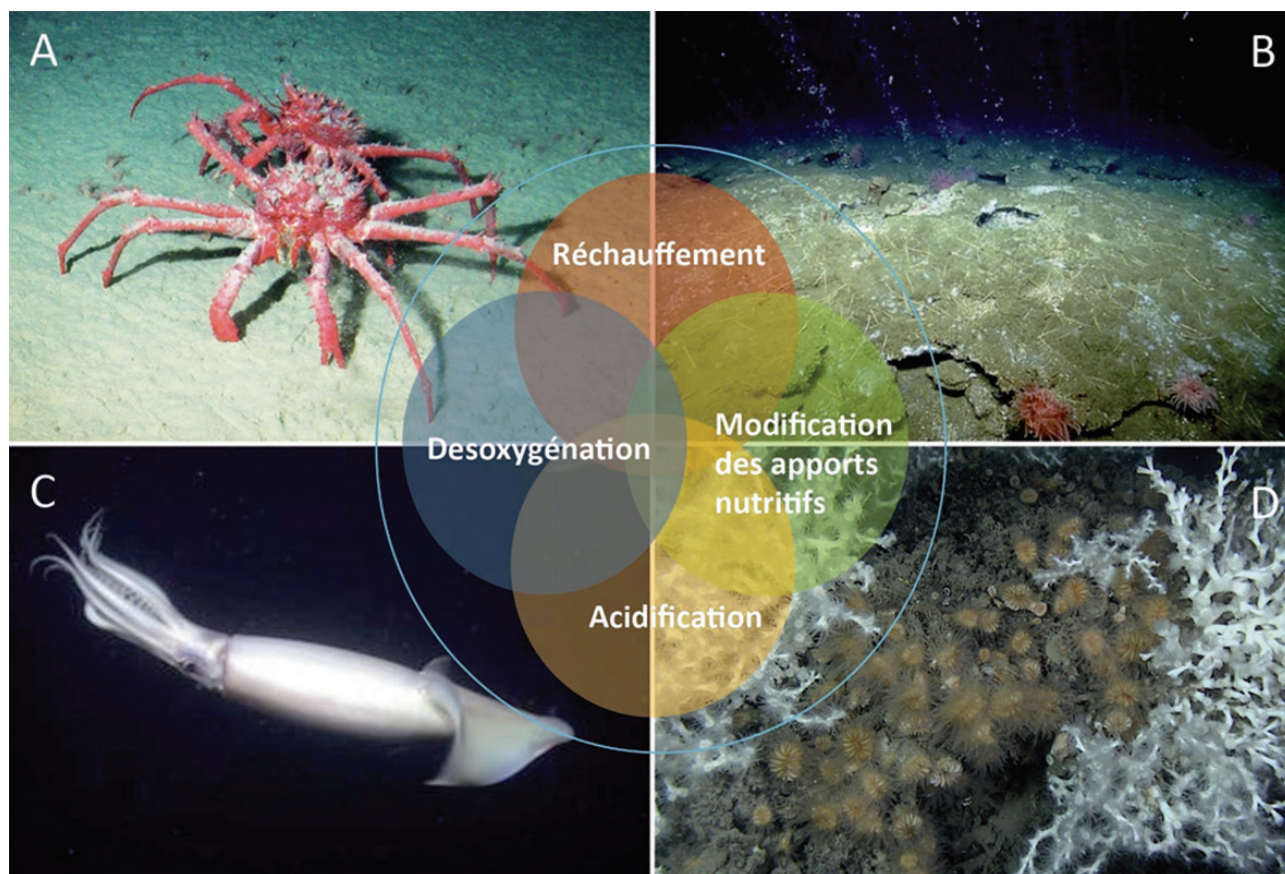


Fig.1 — Espèces profondes exposées à différents facteurs de stress climatique, susceptibles d'induire des changements écologiques majeurs. (A) Crabe royal envahissant la marge de la péninsule Antarctique grâce au réchauffement des eaux de l'Atlantique. (B) Faune des sources de méthane dont les émissions sont accélérées par le réchauffement sur la marge de l'est Atlantique. (C) Calmar de Humboldt favorisé par la diminution des teneurs en oxygène dans les eaux intermédiaires sur l'est Pacifique. (D) Coraux d'eaux froides soumis à l'acidification des eaux et particulièrement sensibles au réchauffement des eaux en Méditerranée.

Crédits photographiques: (A) K. Heirman and C. Smith, NSF LARISSA and Ghent University HOLANT projects. (B) Deepwater Canyons 2013 – Pathways to the Abyss, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) – Office of Exploration and Research, Bureau of Ocean Energy Management, and U.S. Geological Survey. (C) N. Le Bris, Laboratoire d'Ecogéochimie des Environnements Benthiques (LECOB), Fondation Total – UPMC. (D) R. Starr, NOAA – Cordell Bank National Marine Sanctuary. Figure adaptée de Levin and Le Bris 2015.



minimum d'oxygène où des seuils critiques sont alors dépassés (Schmidtko *et al.* 2017). En conséquence, de nombreuses espèces voient leur habitat se réduire, comme certaines espèces du zooplancton qui migrent de la surface au profondeur au cours de la journée ou les grands poissons pélagiques qui peuvent plonger à plusieurs centaines de mètres pour se nourrir mais ont de forts besoins en oxygène pour se déplacer (Stramma *et al.* 2010, Gilly *et al.* 2013). D'autres, comme le calmar de Humbolt qui chasse ses proies à la frange des eaux hypoxiques y a largement gagné.

En fait, les changements qui se produisent en surface, physiques, chimiques ou biologiques, peuvent se propager vers les profondeurs plus rapidement que ne le laisse supposer la circulation des grandes masses d'eau océanique sur laquelle se basent les modèles climatiques. Les écosystèmes des profondeurs océaniques sont étroitement liés à ce qui se passe en surface. La sédimentation de particules (la neige marine), les dépôts massifs d'organismes de grande taille (salpes), les migrations journalières ou saisonnières du necton (poissons, crustacés et invertébrés capables de nager), les tourbillons ou encore les plongées d'eaux de surface vers les abysses sous l'influence des vents sont autant de phénomènes épisodiques qui répercutent directement en profondeur les perturbations des écosystèmes de surface.

Le relief du fond joue aussi un rôle dans cette propagation mais souvent à l'échelle du kilomètre, une résolution trop fine pour être prise en compte dans les modèles climatiques. En favorisant localement le mélange vertical des masses d'eau, les remontées d'eau profondes riches en nutriments, l'accélération des courants, le transport des sédiments vers les abysses, les monts sous-marins, canyons, vallées et failles des dorsales océaniques créent une mosaïque d'habitats rocheux et sédimentaires dont les communautés biologiques sont dépendantes entre elles et avec celles de la colonne d'eau. Au relief des fonds, il faut ajouter les multiples structures hydrologiques qui favorisent les échanges sur différentes gammes de profondeur tels les fronts, tourbillons, upwelling, convections profondes et cascades d'eaux denses. Toutes ces interactions dynamiques sont influencées

par de multiples facteurs liés au climat et qui rendent la démarche scientifique particulièrement complexe quand il s'agit de comprendre ce qui se passera localement. Et ce d'autant plus que moins de 10 % du plancher océanique a fait l'objet d'une cartographie bathymétrique détaillée, c'est-à-dire impliquant une description fine de son relief avec une résolution inférieure à 100 m représentative des habitats profonds.

POURQUOI S'EN PRÉOCCUPER DANS UN CONTEXTE DE DÉVELOPPEMENT DURABLE ?

Les fonds océaniques et les eaux profondes sont déjà affectés à des degrés divers par les activités humaines, du talus continental aux fosses les plus profondes, notamment par l'accumulation de polluants persistants et de déchets, la modification du paysage et la destruction massive d'habitats par le chalutage, les rejets miniers en mer et l'immersion de déchets toxiques. Pour autant, ces environnements sont souvent absents des discussions sur les impacts du changement climatique, de la protection de la biodiversité, ou des enjeux du développement durable. Au delà des régulations imposées à l'exploitation des ressources, cet "océan profond" mérite-t-il une attention spécifique ou son altération doit-elle être considérée comme mineure du fait qu'elle ne prive pas directement les humains d'habitat ou de nourriture ?

En 1840, des chercheurs avaient décrété que la vie elle-même disparaissait au-delà de 550 m, l'absence de nourriture fraîchement produite par les micro-algues planctoniques ne permettant pas aux espèces marines d'y survivre. L'exploration des profondeurs marines depuis les grandes explorations de la fin du XIX^e a révélé au contraire la grande diversité de ces habitats 'obscur's dont le nombre ne cesse d'augmenter avec la robotisation des méthodes d'exploration et de cartographie. Les fonds marins et les eaux profondes abritent une biodiversité exceptionnelle aussi diversifiée que la nourriture disponible en profondeur, de la neige marine pauvre en énergie, aux bactéries chimiosynthétiques capables d'exploiter les composés chimiques issus du plancher océanique, en passant par les carcasses de cétacés



et bois coulés retrouvés jusqu'aux plaines abyssales. L'inventaire des services associés à ces écosystèmes commence juste mais la richesse des innovations métaboliques des lignées profondes confrontées à des conditions environnementales extrêmes (température, acidité, stress toxiques, corrosifs ou hyperoxydants) constitue un patrimoine exceptionnel (Armstrong et al. 2012; Thurber et al. 2014).

Parmi ces services écosystémiques, la séquestration du CO₂ et du méthane (CH₄), le recyclage des nutriments, et la disponibilité d'abris et de nourriture pour les juvéniles de nombreuses espèces sont les plus cités. L'océan profond est le plus grand réservoir de carbone sur Terre. Les écosystèmes des fonds océaniques contribuent à la séquestration de ce carbone de plusieurs manières, par la transformation du méthane et du CO₂ en roches carbonatées ou par la biomasse profonde (Marlow et al. 2014; Trueman et al. 2014; James et al. 2016). Ce "carbone bleu" profond longtemps ignoré apparaît aujourd'hui comme une composante importante dans la séquestration du CO₂ anthropique (Boyd et al. 2019).

QUELLES CONNAISSANCES POUR ÉVALUER LES MENACES ET DÉFINIR DES MESURES DE PROTECTION EFFICACES ?

Sur la vulnérabilité du vivant et des écosystèmes terrestres ou marins aux facteurs de stress climatique, la recherche a déjà apporté de nombreuses réponses et mis en évidence la complexité des réponses physiologiques et capacités d'acclimatation et d'adaptation, en fonction des cycles de vie des espèces, de la possibilité de migration des populations, des aires géographiques concernées. Pour les espèces marines, la combinaison du réchauffement et d'autres facteurs de stress est un élément essentiel. Les seuils de tolérance physiologique des espèces à l'hypoxie dépendent, notamment de la température et du CO₂ (Pörtner 2010). L'adaptation à l'acidification, mise en évidence pour plusieurs espèces de coraux profonds, est cependant mise à mal par l'augmentation de la température (Lunden et al., 2014; Gori et al., 2016).

La combinaison des facteurs climatiques, température, acidité, oxygène et ressources nutritives, doit donc être établie à l'échelle des habitats qu'occupent actuellement ces espèces et ceux qui pourraient les abriter à l'avenir, et prendre en compte leur variabilité naturelle. La distribution spatiale des espèces profondes est fortement influencée par les transitions abruptes entre eaux pauvres en oxygène et les eaux de surface ou abyssales mieux oxygénées, le long du talus continental, sur les flancs de monts sous marins et canyons. Des changements, même mineurs des gradients de température et d'oxygène en profondeur peuvent provoquer une succession d'espèces dominantes et modifier toute la structure de l'écosystème. C'est que qui a été suggéré pour la péninsule Antarctique où le réchauffement de deux dixièmes de degré en 30 ans a permis l'invasion de l'écosystème par une espèce de crabe royal, un prédateur dont l'aire de répartition sur la marge continentale s'est ainsi étendue au détriment de nombreuses espèces (Smith et al. 2014).

Établir des mesures de gestion environnementale des activités industrielles, soutenir le développement d'activités économiques durables ou mettre en place des politiques de conservation d'habitats profonds dans les eaux nationales et internationales comporte de nombreuses inconnues. L'état des connaissances est aujourd'hui trop fragmentaire pour anticiper précisément les impacts du changement climatique et nécessite l'élargissement des programmes d'observation en eaux profondes sur des échelles pertinentes, tant spatiales que temporelles. Aujourd'hui compte tenu des outils utilisés, de leur coût très élevé et de la nécessité d'expertises techniques pointues partagées par trop peu de pays, cette cartographie des risques est hors de portée. Les « hotspots » de biodiversité et de productivité sur les fonds océaniques sont formés pour la plupart d'assemblages de quelques dizaines de mètres à quelques kilomètres de maille. La plupart des écosystèmes profonds sont soumis à des phénomènes saisonniers et des phénomènes épisodiques qui déterminent leur bon fonctionnement comme les apports de nourriture ou la ventilation des eaux profondes (Danovaro et al., 2004; Smith et al., 2012; Soltwedel et al., 2016). À l'heure actuelle,



les connaissances manquent pour mieux comprendre comment ces événements intermittents influent sur les interactions des espèces entre elles et avec leur milieu. On manque notamment d'études écologiques suffisamment longues (plusieurs décennies) pour les écosystèmes les plus vulnérables qui font face aux pressions cumulées de l'exploitation et des changements liés au climat (Smith *et al.*, 2013). Construire des scénarios de vulnérabilité réalistes et les intégrer à la définition de politiques publiques marines est un défi à relever pour répondre aux enjeux

du développement durable et évaluer efficacement les impacts des activités humaines à grande échelle sur les espaces marins profonds. Les nouvelles réglementations internationales (par exemple pour l'extraction minière) et les traités (par exemple sur la biodiversité en dehors des eaux sous juridictions nationales), ainsi que la gestion environnementale et la planification spatiale devront intégrer le rôle de l'océan profond dans le climat et ses processus.

RÉFÉRENCES

- ARMSTRONG C. W., FOLEY N. S., TINCH R. and VAN DEN HOVE S., 2012 – *Services from the Deep: Steps towards Valuation of Deep Sea Goods and Services*. *Ecosyst. Serv.*, 2, 2 –13.
- BOPPL.,RESPLANDYL.,ORRJC.,DONEYS.C.,DUNNEJ.P.,GEHLENM.,HALLORANP.,HEINZEC.,ILYINA T., SEFERIAN R. and TJIPUTRA J., 2013 – *Multiple Stressors of Ocean Ecosystems in the 21st Century : Projections with C mip5 Models*. *Biogeosciences*, 10, 6225 – 6245. doi :10.5194/bg1062252013.
- BOYD, P.W., CLAUSTRE, H., LEVY, M., SIEGEL, D.A. and WEBER T., 2019 – *Multi-Faceted Particle Pumps Drive Carbon Sequestration in the Ocean*. *Nature* 568, 327–335.
- DANOVARO R., DELL'ANNO A. and PUSCEDDU A., 2004 – *Biodiversity Response to Climate Change in a Warm Deep Sea : Biodiversity and Climate Change in the Deep Sea*. *Ecology Letters* 7, 821–828.
- GILLY W. F., BEMAN J. M., LITVIN S. Y. and ROBISON B. H., 2013 – *Oceanographic and Biological Effects of Shoaling of the Oxygen Minimum Zone*. *Annual Review of Marine Science* 5, 393–420. doi:10.1146/annurev-marine-120710-100849.
- GORI A., FERRIERPAGÈS C., HENNIGE S. J., MURRAY F., ROTTIER C., WICKS L. C. and ROBERTS J. M., 2016 – *Physiological Response of the Cold-Water Coral *Desmophyllum Dianthus* to Thermal Stress and Ocean Acidification*. *PeerJ* 4, e1606. doi :10.7717/peerj.1606.
- JAMES R.H., BOUSQUET P., BUSSMANN I., HAECKEL M., KIPFER R., LEIFER I., NIEMANN H., OSTROVSKY I., PISKOZUB J., REHDER G., TREUDE T., VIELSTÄDTE L. and GREINERT J., 2016 – *Effects of Climate Change on Methane Emissions from Seafloor Sediments in the Arctic Ocean. A Review: Methane Emissions from Arctic Sediments*. *Limnology and Oceanography*.
- LUNDEN J.J., MCNICHOLL C.G., SEARS C.R., MORRISON C.L. and CORDES E.E., 2014 – *Acute Survivorship of the Deep-Sea Coral *Lophelia Pertusa* from the Gulf of Mexico under Acidification, Warming, and Deoxygenation*. *Frontiers in Marine Science* 1.
- LEVIN L A., LE BRIS N., 2015 – *Deep Oceans under Climate Change*. *Science* 350:766768.
- MARLOW J. J., STEELE J. A., ZIEBIS W., THURBER A. R., LEVIN L. A. and ORPHAN V. J., 2014 – *Carbonate-Hosted Methanotrophy Represents an Unrecognized Methane Sink in the Deep Sea*. *Nature Communications* 5,5094.
- MENERINK K.J., VANDOVER C.L., ARDRON J.,BAKER M., ESCOBAR-BRIONES E., GJERDE K., KOSLOWJ .A., RAMIREZLLODRA E., LARA-LOPEZ A., SQUIRES D., SUTTON T., SWEETMAN A.K. and LEVIN L.A., 2014 – *A Call for Deep-Ocean Stewardship*. *Science* 344 :696698.
- MORA C., WEI C.-L., ROLLO A., AMARO T., BACO A.R., BILLET D., BOPP L., CHEN Q., COLLIER M., DANOVARO R., GOODAY A.J., GRUPE B.M., HALLORAN P.R., INGELS J., JONES D.O.B., LEVIN L.A., NAKANO H., NORLING K., RAMIREZ-LLODRA E., REX M., RUHL H.A., SMITH C.R., SWEETMAN A.K., THURBER A.R., TJIPUTRA J.F., USSEGLIO P., WATLING L., WU T. and YASUHURA M., 2013 – *Biotic and Human Vulnerability to Projected Changes in Ocean Biogeochemistry over The 21st Century*. *PLoS Biology* 11 (10) : e1001682. doi :10.1371/journal.pbio.1001682.



- PÖRTNER H., 2012 – *Integrating Climate-Related Stressor Effects on Marine Organisms: Unifying Principles Linking Molecule to Ecosystem-Level Changes*. Marine Ecology Progress Series 470, 273–290. <https://doi.org/10.3354/meps10123>
- SMITH C.R., GRANGE L.J., HONIG D.L., NAUDTS L., HUBER B., GUIDI L. and DOMACK E., 2011 – *A Large Population of King Crabs in Palmer Deep on the West Antarctic Peninsula Shelf and Potential Invasive Impacts*. Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences, rspb20111496. doi: 10.1098/rspb.2011.1496.
- SCHMITKO S., STRAMMA L. and VISBECK M., 2017 – *Decline in Global Oceanic Oxygen Content during the Past Five Decades*. Nature 542, 335–339.
- SMITH K.L., RUHL H.A., KAHRU M., HUFFARD C.L. and SHERMAN A., 2013 – *Deep Ocean Communities Impacted by Changing Climate over 24 Y in the Abyssal Northeast*. PNAS 110 :1983841.
- SOLTWEDEL T., BAUERFEIND E., BERGMANN M., BRACHER A., BUDAEVA N., BUSCH K., CHERKASHEVA A., FAHL K., GRZELAK K., HASEMANN C., JACOB M., KRAFT A., LALANDE C., METFIES K., NÖTHIG E.M., MEYER K., QUÉRIC N.-V., SCHEWE I., WŁODARSKA-KOWALCZUK M. and KLAGES M., 2016 – *Natural Variability or Anthropogenically-Induced Variation? Insights from 15 Years of Multidisciplinary Observations at the Arctic Marine LTER Site HAUSGARTEN*. Ecological Indicators 65, 89 –102.
- THURBER A.R., SWEETMAN A.K., NARAYANASWAMY B.E., JONES D.O.B., INGELS J. and HANSMAN R.L., 2014 – *Ecosystem Function and Services Provided by the Deep Sea*. Biogeosciences 11 : 39413963.
- TRUEMAN C.N., JOHNSTON G., O’HEA B. and MACKENZIE K. M., 2014 – *Trophic Interactions of Fish Communities at Midwater Depths Enhance Long-Term Carbon Storage and Benthic Production on Continental Slopes*. Proceedings of the Royal Society B : Biological Sciences 281, 20140669 –20140669.