



Plaidoyer pour une attention spécifique à l'océan profond dans le contexte du changement climatique

Lisa A. Levin,
Nadine Le Bris, Erik Cordes,
Yassir Eddebbar, Rachel M. Jeffreys,
Kirk N. Sato, Chih-Lin Wei
et le groupe de travail sur le
changement climatique de DOSI
Deep-Ocean Stewardship Initiative

Avec 95 % de son volume habitable, l'océan profond a un rôle important dans l'équilibre climatique, et sa mise sous pression dans les années à venir doit attirer notre attention. Entre stockage et redistribution de la chaleur et du carbone émis dans l'atmosphère par les activités anthropiques, il assure divers services écosystémiques utiles à l'homme. Ces services jouent un rôle dans la séquestration du CO₂ et du CH₄ à plus long terme, ainsi que dans le cycle des nutriments sur lequel reposent toutes les chaînes alimentaires, et donc certaines activités économiques comme les pêcheries. L'absorption de chaleur et sa redistribution impactent la distribution des espèces exploitées par l'homme. Absorbant déjà de nombreux polluants et déchets, l'océan profond va devenir le théâtre de nouvelles activités comme l'extraction minière. Mettre en place les mesures clés de l'adaptation au changement climatique demandera l'acquisition de nouvelles connaissances, ainsi qu'un cadre législatif abouti et des outils de gestion performants.

Couvrant plus de la moitié de la planète, et représentant 95 % de son volume habitable, l'océan profond (> 200 m) mérite une attention spécifique dans le contexte du changement climatique, et ce pour plusieurs raisons importantes :

- Les eaux profondes et les fonds océaniques jouent un rôle prédominant dans le stockage de la chaleur et du carbone excédentaires. Ils sont étroitement liés à la surface de l'océan et à l'atmosphère via le mélange vertical des eaux marines, les migrations d'espèces, la sédimentation de particules, et abritent une large variété d'écosystèmes. Toutes ces raisons font des régions profondes une composante essentielle pour analyser le rôle de l'océan dans l'adaptation et l'atténuation au changement climatique.
- L'océan profond assure une large variété de services écosystémiques qui commencent seulement à être inventoriés : régulation des gaz à effet de serre, support de biodiversité (y compris la diversité génétique), approvisionnement de nourriture et production d'énergie.
- L'océan profond est de plus en plus affecté par les activités humaines, notamment par l'accumulation de polluants, la surpêche, et les perturbations liées aux activités extractives sur le plancher océanique. À l'heure actuelle, les connaissances manquent pour comprendre comment ces pressions vont interagir avec les facteurs de stress climatiques.



PROTÉGER L'OCÉAN PROFOND NÉCESSITE D'AGRANDIR NOS CONNAISSANCES

Mettre en place les mesures clés d'adaptation au changement climatique nécessitera l'acquisition de nouvelles connaissances, notamment par l'élargissement des programmes d'observation en eaux profondes. Cela permettra de concevoir des aires marines protégées englobant les régions vulnérables, et d'éclairer la gestion environnementale des activités industrielles et le développement de nouvelles politiques ciblant les eaux profondes nationales et internationales.

Intégrer l'océan profond dans la science et les politiques marines est une nécessité nouvelle. Mieux connaître l'hydrologie et l'hydrographie des eaux profondes, ainsi que l'écologie du milieu pélagique et du plancher océanique, est crucial pour les prédictions climatiques et l'évaluation des impacts sociaux (e.g., Mora et al. 2013), en prenant en compte la forte connectivité entre les océans, l'atmosphère et le milieu terrestre. Les nouvelles régulations internationales (par exemple pour l'extraction minière) et les traités (par exemple sur la biodiversité), ainsi que la gestion environnementale et la planification spatiale devront intégrer le rôle de l'océan profond dans le climat et ses processus.

LE FUTUR DE L'OCÉAN PROFOND EN QUELQUES ÉLÉMENTS CLÉS

Nous attirons l'attention sur les thèmes suivants, qui donnent une légitimité à ce plaidoyer pour l'océan profond :

Les services écosystémiques

La vie dans l'océan profond fournit ou régule de nombreux services utiles pour la planète (Armstrong et al. 2012 ; Thurber et al. 2014). Parmi ceux-ci, les plus importants sont la séquestration du CO₂ et du méthane (CH₄), le recyclage des nutriments, et la disponibilité d'abris et de nourriture, qui en font des nourrisseries pour les pêcheries et le support d'une biodiversité importante grâce à des habitats variés. L'océan profond est le plus grand réservoir de

carbone sur Terre, et constitue le dépôt ultime pour la plupart du carbone anthropogénique. La contribution biogénique du carbone dans les eaux profondes est mal quantifiée, mais les écosystèmes chimiosynthétiques, qui possèdent des taux élevés de fixation de CO₂ sous forme de carbone organique transféré vers les espèces pélagiques, pourraient également contribuer à la séquestration du « carbone bleu » (Marlow et al. 2014 ; Trueman et al. 2014 ; James et al. 2016).

Bilans d'énergie thermique

L'océan absorbe 90 % de la chaleur additionnelle piégée par les émissions de gaz à effet de serre anthropogéniques. De celle-ci, 30 % sont stockés à des profondeurs supérieures à 700 m (5^e rapport d'évaluation du GIEC). L'océan est donc un indicateur plus précis du réchauffement planétaire que la température moyenne de surface du globe (Victor and Kennel, 2015). Dans cet environnement stable et majoritairement froid (à l'exception de la Méditerranée, et dans les zones bathyales des régions tropicales), les limites thermiques structurent la distribution des espèces. Les conséquences du réchauffement sur les eaux profondes vont largement influencer les écosystèmes et leur biodiversité. Par exemple, des changements rapides dans les écosystèmes benthiques des eaux profondes ont déjà été documentés, dans les zones de plongée des eaux de surface vers les profondeurs (*downwellings*), ou au contraire de remontée des eaux profondes (*upwellings*), ainsi que dans les régions polaires (e.g., Danovaro et al., 2004 ; Smith et al., 2012 ; Soltwedel et al., 2016). Cependant, discriminer les cycles naturels des impacts anthropiques sur le climat dans l'océan profond nécessite des séries temporelles suffisamment longues (plusieurs décennies) qui manquent encore pour le moment (Smith et al., 2013).

Perturbations biogéochimiques

L'océan profond assure des fonctions majeures de recyclage des éléments chimiques. On s'attend à ce que ces processus subissent des changements importants. Une diminution de la teneur en oxygène, du pH et du taux de saturation de l'aragonite a été observée, et devrait impacter largement les eaux de profondeur intermédiaire (autour de quelques centaines de mètres à 1 km de profondeur) selon tous

les scénarios d'émissions futures (Bopp *et al.*, 2013). L'oxygénation des eaux profondes est étroitement liée à la circulation thermohaline, et les modifications de la teneur en oxygène reflètent les changements de la circulation océanique, à l'échelle de bassins et à l'échelle globale. En tant que régulateur des cycles biogéochimiques de l'azote, du fer, du phosphore et du soufre, l'oxygène peut être central dans la mise en synergie de ces perturbations. Par exemple, la production de N_2O devrait s'accroître à mesure que l'oxygène décline (Codispoti, 2010), induisant un effet de rétroaction de ce gaz à effet de serre sur le climat, même si de larges incertitudes demeurent sur son importance (Martinez-Rey *et al.*, 2015).

Impacts cumulés

De nombreux facteurs de stress dus au changement climatique affectent les fonctions des écosystèmes des eaux profondes (Levin and Le Bris 2015). Ces derniers pourraient être particulièrement vulnérables au changement, en raison de leur stabilité environnementale, des liens étroits qu'ils entretiennent avec la productivité de surface, et avec le régime hydrodynamique. La diversité biologique de l'océan profond est largement façonnée par l'export vers le fond de matière produite par photosynthèse en surface (Woolley *et al.*, 2016); et les modèles CMIP5 prédisent un déclin général de cette productivité primaire avec le changement

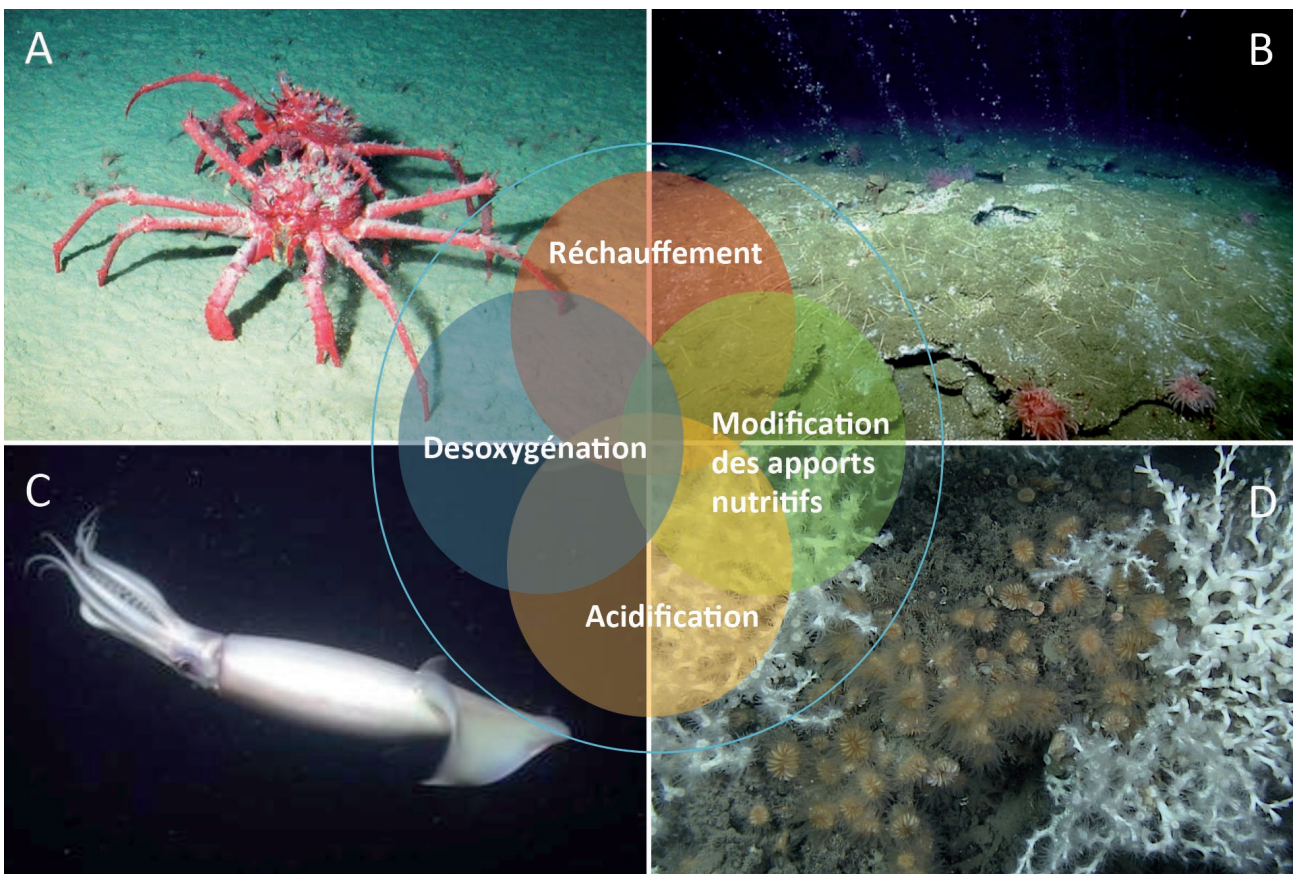


Figure adaptée de Levin and Le Bris 2015. Espèces profondes exposées à différents facteurs de stress climatique, susceptibles d'induire des changements écologiques majeurs. (A) Crabe royal envahissant la marge Antarctique grâce au réchauffement des eaux (9). (B) Faune des sources de méthane dont les émissions sont accélérées par le réchauffement sur la marge de l'est Atlantique. (C) Calamar 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.



climatique. Des diminutions importantes dans les tropiques et l'Atlantique nord (Bopp *et al.*, 2013), suggèrent des impacts négatifs sur la diversité dans les eaux profondes. Il faudra évaluer comment et dans quelles régions marines ces changements cumulés (réchauffement, acidification, conditions corrosives vis-à-vis de l'aragonite, réduction du flux de nutriments et désoxygénation) peuvent altérer la stabilité des écosystèmes et leur capacité à s'adapter (Lunden *et al.*, 2014 ; Gori *et al.*, 2016). Cela implique de rassembler des connaissances suffisantes sur les effets cumulés des multiples facteurs de stress spécifiques aux régions profondes, afin de construire des scénarios précis de vulnérabilité des écosystèmes.

Des observations nécessaires

Le nombre réduit des observations dans l'océan profond et leur couverture spatiale limitée, conjugués à une résolution spatiale des modèles très large, conduit à des incertitudes importantes. Ces dernières concernent par exemple la variabilité naturelle de l'environnement auquel sont confrontés les organismes des grands fonds, le couplage entre les cycles climatiques et biogéochimiques, et les réponses des *hotspots* de biodiversité aux changements de la circulation hydrodynamique (e.g., monts sous-marins et canyons). De plus, la diversité de la vie dans l'environnement pélagique profond est encore largement inexplorée, bien qu'il représente plus de 95 % du volume habitable de la planète. Les observatoires sur les fonds

marins, et les séries temporelles à long terme qu'ils permettent d'acquérir, commencent à fournir des indications sur la manière dont les écosystèmes des eaux profondes répondent aux perturbations climatiques (Soltweddel *et al.*, 2016 ; Smith *et al.*, 2013). Des études écologiques intégrées de long terme, englobant des écosystèmes d'eaux profondes variés et les *hotspots* les plus vulnérables, sont nécessaires afin d'identifier les menaces qui pèsent sur les services écosystémiques essentiels, et les possibles rétroactions sur le système climatique et les humains.

Synergies des facteurs de stress induits par les activités humaines

Outre les multiples facteurs de perturbation, les écosystèmes de l'océan profond font face à l'accumulation de polluants et de déchets, à des pressions de pêche accrues, et au développement vers les plus grandes profondeurs d'activités d'extraction de ressources énergétiques (Mengerink *et al.*, 2014). A cette liste pourrait s'ajouter à l'avenir des activités d'extractions minières sur le plancher océanique profond. Les efforts déployés pour développer les réglementations, définir et appliquer les études d'impact environnemental, développer des indicateurs de bon état écologique, établir la planification spatiale et créer des aires marines protégées en eaux profondes, nécessiteront d'intégrer le changement climatique à l'analyse, en prenant en compte l'interaction de facteurs de stress cumulés sur les écosystèmes et leur biodiversité.



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.
- BOPP L., RESPLANDY L., ORR J. C., DONEY S. C., DUNNE J. P., GEHLEN M., HALLORAN P., HEINZE C., ILYINA T., SEFERIAN R. and TJIPUTRA J., 2013 – *Multiple Stressors of Ocean Ecosystems in the 21st Century: Projections with Cmp5 Models*. *Biogeosciences*, 10, 6225 – 6245. doi: 10.5194/bg-10-6225-2013.
- 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.
- GORI A., FERRIER-PAGÈS 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. and LE BRIS N., 2015 – *Deep Oceans under Climate Change*. *Science* 350: 766-768.
- 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.
- MARTINEZ-RAY J., BOPP L., GEHLEN M., TAGLIABUE A. and GRUBER N., 2015 – *Projections of Oceanic N₂O Emissions in the 21st Century Using the IPSL Earth System Model*. *Biogeosciences* 12, 4133-4148.
- MENERINK K. J., VAN DOVER C. L., ARDRON J., BAKER M., ESCOBAR-BRIONES E., GJERDE K., KOSLOW J. A., RAMIREZ-LLODRA E., LARA-LOPEZ A., SQUIRES D., SUTTON T., SWEETMAN A. K. and LEVIN L. A., 2014 – *A Call for Deep-Ocean Stewardship*. *Science* 344: 696-698.
- MORA C., WEI C.-L., ROLLO A., AMARO T., BACO A. R., BILLETT 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.
- 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.
- SMITH K. L., RUHL H. A., KAHRU M., HUFFARD C. L. and A. SHERMAN A., 2013 – *Deep Ocean Communities Impacted by Changing Climate over 24 Y in the Abyssal Northeast*. *PNAS* 110: 19838-41.
- SOLTWEDEL T., BAUERFEIND E., BERGMANN M., BRACHER A., BUDAIEVA 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: 3941-3963.
- 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.
- VICTOR D. and KENNEL C., 2014 – *Ditch the 2 °C Warming Goal*. *Nature* 514: 30-31.
- WOOLLEY S. N. C., TITTENSOR D. P., DUNSTAN P. K., GUILLERA-ARROITA G., LAHOZ-MONFORT J. J., WINTLE B. A., WORM B. and O'HARA T. D., 2016 – *Deep-Sea Diversity Patterns Are Shaped by Energy Availability*. *Nature* 533: 393-396.