

Sujet de Thèse

Simuler la diversité fonctionnelle du mésozooplancton à l'échelle de l'océan mondial – Quelle capacité d'adaptation face au changement climatique ?

Contexte. Le zooplancton marin (l'ensemble des petits organismes non-photosynthétiques qui dérivent au gré des courants) est un acteur essentiel de la pompe de carbone biologique^{1,2}. Bien que l'influence du zooplancton sur le cycle du carbone océanique dépende largement des caractéristiques physiologiques du zooplancton (e.g., taille³⁻⁵, stœchiométrie⁶, niche thermique^{3,7,8}) les données d'observation actuelles ne permettent pas de mesurer celles-ci avec une résolution suffisamment fine pour évaluer les mécanismes biologiques (dynamiques écologiques, évolution) et/ou physiques (mélange, transport) qui les façonnent ou de traduire simplement cette diversité en termes de fonctionnement des écosystèmes et de la biogéochimie océanique. Le modèle **NEMO-PISCES-Evo** développé par Boris Sauterey⁹ au LOCEAN permet de simuler à l'échelle globale des océans la détermination de la niche thermique du mésozooplancton (i.e., le "gros" zooplancton, plus particulièrement impliqué dans la pompe de carbone) et de sa diversité par l'effet combiné de la sélection naturelle et de la physique des océans. L'objectif de cette thèse est d'utiliser et de généraliser cette approche afin de **simuler la composition et la diversité fonctionnelle du mésozooplancton et prédire leurs évolutions dans un contexte de changement climatique**. Ce travail portera d'abord sur la niche thermique, puis sera étendu à la taille et au rapport eau:carbone (la "gélatineusité") du mésozooplancton, d'autres traits fonctionnels du mésozooplancton susceptibles d'influencer le fonctionnement des écosystèmes et la biogéochimie océanique.

Cette thèse menée conjointement au LOCEAN et au LMD, avec une collaboration prévue avec le LOV, se situe à l'intersection entre écologie marine, biogéochimie océanique et sciences du climat. Le projet s'appuiera sur les expertises combinées des encadrants (Laurent Bopp : climat / biogéochimie océanique ; Boris Sauterey : biogéochimie océanique / écologie marine ; Fabien Lombard : mesure in situ de la diversité fonctionnelle du plancton) ainsi que sur le travail préliminaire d'analyse des prédictions de NEMO-PISCES-Evo sur l'émergence de la diversité de la niche thermique du mésozooplancton en conditions préindustrielles. Ce travail récent a été produit par un étudiant de Master 2, qui pourrait par ailleurs représenter un candidat idéal pour mener ce projet à bien.

Axe 1) Évolution de la niche thermique du mésozooplancton dans un contexte de changement climatique. Dans un premier temps, le modèle NEMO-PISCES-Evo sera couplé (couplage offline) aux scénarios de changement climatiques produits par l'IPSL-CM dans le cadre du Coupled Model Intercomparison Project (CMIP). NEMO-PISCES-Evo permettra ainsi de simuler l'adaptation de la niche thermique du mésozooplancton aux conditions environnementales préindustrielles puis son évolution darwinienne en réponse au changement climatique. Le·a candidat·e analysera les sorties du modèle couplé afin d'évaluer comment la composition et la diversité de la niche thermique des communautés de mésozooplancton se structurent dans les conditions climatiques actuelles, comment cette structure évolue sous l'effet du changement climatique, puis l'impact global de cette évolution sur la biogéochimie océanique (productivité primaire, export de carbone) en utilisant notamment comme point de comparaison des simulations utilisant une version standard de NEMO-PISCES. L'objectif du·de la candidat·e sera dans un second temps d'identifier les mécanismes physiques (transport, mélange, stratification) et biologiques (tolérance physiologique au stress, compétition en populations, adaptation) clés de cette évolution.

Axe 2) Généraliser l'approche aux traits fonctionnels principaux du mésozooplancton. La taille^{3-5,12} et la teneur en eau^{6,12} ("gélatineusité") ont aussi une influence majeure sur la physiologie du zooplancton. Le·a candidat·e inclura ces deux traits d'intérêt dans NEMO-PISCES-Evo afin de simuler l'émergence simultanée de la diversité de chacun d'entre eux. Cette complexification de NEMO-PISCES-Evo est rendue possible par l'utilisation de l'approche SPEAD permettant de simuler

l'évolution simultanée de plusieurs traits à l'échelle globale pour un coût computationnel faible¹³⁻¹⁵. L'objectif sera dans un premier temps de comparer, en conditions préindustrielles, les patterns émergents de diversité de chacun des traits et de mesurer leur influence respective sur le cycle du carbone océanique. Dans un second temps, le·e candidat·e évaluera la capacité du mésozooplancton à adapter chacune de ces caractéristiques physiologiques aux nouvelles conditions environnementales produites par le changement climatique et son importance concernant la résilience des communautés planctoniques et des flux biogéochimiques océaniques principaux.

Axe 3) Lier modélisation et observation des aires de répartition du mésozooplancton. La niche thermique, la taille et la gélatineusité influencent la physiologie du mésozooplancton et donc l'activité et les aires de répartition des populations^{3,7,8}. Ces traits détermineront par ailleurs dans une large mesure l'évolution de ces aires de répartition sous l'effet du changement climatique¹⁰. Dans ce dernier axe, l'objectif du·de la candidat·e sera d'établir un lien entre les prédictions de NEMO-PISCES-Evo sur la composition fonctionnelle du mésozooplancton et les aires de répartition observées des populations de mésozooplancton¹¹. Pour cela, le·a candidat·e développera des outils statistiques (e.g., approche d'inférence bayésienne ABC) permettant d'inférer sur la base des prédictions de modèle la niche thermique probable de populations réelles en fonction de leur aire de répartition observée. Le·a candidat·e pourra ensuite produire un ensemble de prédictions sur l'évolution de la distribution spatiale des habitats potentiels de ces populations. Cette nouvelle approche constituera une méthode alternative et plus mécaniste aux modèles de distribution spatiale (SDMs) actuellement utilisés.

Impacts attendus. Les résultats permettront de mieux contraindre le rôle du mésozooplancton dans la pompe biologique de carbone, en intégrant explicitement l'adaptation évolutive de ses traits fonctionnels (niche thermique, taille, gélatineusité). En quantifiant l'effet de ces adaptations sur l'export de carbone et la reminéralisation, le projet améliorera les estimations de l'efficacité de la pompe biologique et des rétroactions climat-carbone. Il contribuera ainsi potentiellement à réduire les incertitudes des projections issues des modèles du système Terre, notamment ceux qui utilisent le modèle PISCES comme composante du cycle du carbone (en particulier le modèle système terre de l'IPSL), en précisant si l'adaptation du zooplancton amortit ou amplifie l'affaiblissement attendu du puits de carbone océanique.

Au-delà du cycle du carbone, les modifications de la diversité fonctionnelle du mésozooplancton pourraient transformer la structure des réseaux trophiques marins. Les changements de taille ou de composition physiologique influencent la qualité et la quantité de matière transférée vers les niveaux trophiques supérieurs (poissons, prédateurs pélagiques), avec des conséquences potentielles pour la productivité halieutique. En anticipant l'évolution des aires de répartition et des habitats favorables, le projet éclairera les risques de désynchronisation trophique et de redistribution des ressources marines sous changement climatique. Ces avancées informeront la gestion écosystémique des pêches et la préservation des services écosystémiques associés (sécurité alimentaire, stockage du carbone, régulation climatique), contribuant à une meilleure adaptation des sociétés aux changements globaux.

References. 1. Boyd, *Nature* 568, 327–335 (2019); 2. Pinti, *Biogeosciences* 20, 997–1009 (2023); 3. Chiba, *Ecology and Evolution* 5, 968–978 (2015); 4. Gillooly, *Journal of Plankton Research* 22, 241–251 (2000); 5. Lombard, *Marine Micropaleontology* 70, 1–7 (2009); 6. Lombard, Ubiquity of inverted 'gelatinous' ecosystem pyramids in the global ocean. Preprint at <https://doi.org/10.1101/2024.02.09.579612> (2024); 7. Sasaki, *Journal of Plankton Research* 43, 598–609 (2021); 8. Sasaki, *Global Change Biology* 25, 4147–4164 (2019); 9. Sauterey, *Zooplankton adaptation to temperature determines global carbon export efficiency* (in prep.); 10. Anderson, *Nature Communications* 12, 1–9 (2021); 11. Benedetti, *Nature Communications* 12, 5226 (2021); 12. Lemoine, *Limnology and Oceanography* 70, 2673–2687 (2025); 13. Sauterey, *Maladaptation of marine phytoplankton to its environment affects the global patterns of primary productivity* (in rev.); 14. Le Gland, *Geoscientific Model Development* 14, 1949–1985 (2021); 15. Le Gland, *Circulation and resource limitation control global pattern of phytoplankton diversity: Insights from a trait-based model* (in prep.).