

Titre du sujet de thèse :

Impact de la diversité fonctionnelle du mésozooplancton marin sur les flux de carbone: de l'analyse de données à haut débit (imagerie, -omique) à la modélisation

Directrice de thèse HDR : Sakina-Dorothee Ayata (écologie marine, analyse de données)

Mail : sakina-dorothee.ayata@locean.ipsl.fr

Nom du Laboratoire d'accueil : LOCEAN- UMR 7159 (équipe PROTEO)

Adresse: 4 place Jussieu, 75005 Paris

ED et Etablissement de rattachement : ED°129 - Sorbonne Université

Co-directeur de thèse : Frédéric Maps (modélisation individu-centrée, écosystèmes arctiques)

Mail : frederic.maps@bio.ulaval.ca

Nom du Laboratoire : IRL Takuvik

Adresse : Département de Biologie / Pavillon Alexandre-Vachon, 1045, av. de la Médecine, local 2064

Université Laval, Québec (Québec) G1V 0A6, Canada

Etablissement de rattachement : Université Laval

Co-encadrant de thèse : Olivier Aumont (modélisation biogéochimique)

Mail : olivier.aumont@ird.fr

Nom du Laboratoire d'accueil : LOCEAN- UMR 7159 (équipe NEMO)

Adresse: 4 place Jussieu, 75005 Paris

ED et Etablissement de rattachement : ED°129 - Sorbonne Université

Descriptif du projet de recherche doctorale

Contexte

Le mésozooplancton rassemble les organismes planctoniques (qui flottent au grès des courants) hétérotrophes ("animaux") visibles à l'œil nu (de 0,2 mm à 2 cm). Il joue un rôle clef dans le fonctionnement des écosystèmes marins et des cycles biogéochimiques globaux, en particulier à travers l'export du carbone et la production secondaire alimentant les pêcheries. Il est caractérisé par une forte diversité taxonomique et phylogénétique (organismes unicellulaires géants, petits crustacés comme les copépodes et le krill, organismes gélatineux, larves de poissons), mais aussi fonctionnelle (e.g., petits vs. grands organismes, herbivores se nourrissant par courants de filtration vs. carnivores chassant à l'affût, migrations verticales journalières ou saisonnières, production de réserves lipidiques, etc.). Pourtant, le lien entre la diversité du mésozooplancton et le fonctionnement des écosystèmes planctoniques demeure mal compris. Le développement récent de l'acquisition à haut débit de données de séquençage (de l'ADN ou de l'ARN) et d'imagerie (images individuelles) offre une opportunité sans précédent pour répondre à cette question essentielle en écologie marine, en particulier à travers le développement de modèles plus réalistes.

Objectif scientifique

Cette thèse vise à mieux comprendre le lien entre les différentes facettes de la diversité du mésozooplancton (taxonomique, phylogénétique, fonctionnelle) et l'export du carbone dans les océans. Pour cela, elle combine l'analyse de grands jeux de données obtenus par séquençage à haut débit (métabarcoding, métagénomique) et par imagerie quantitative avec de la modélisation couplée biogéochimique.

Le premier objectif de la thèse sera d'identifier les traits fonctionnels du mésozooplancton par leur signature morphologique à partir de l'imagerie in situ et par leur signature génétique et métabolique via les analyses -omiques. Des traits majeurs ciblés sont l'accumulation de réserves lipidiques (productivité des écosystèmes), la myélinisation (stratégies d'alimentation), la synthèse / l'utilisation de pigments photoprotecteurs (résistance au stress), les capacités migratoires. Le second objectif sera d'identifier les principales variables environnementales affectant la diversité fonctionnelle du mésozooplancton. Le troisième objectif sera d'améliorer la représentation de la diversité fonctionnelle du compartiment zooplanctonique dans un modèle d'écosystème marin, i.e. le modèle biogéochimique PISCES développé au LOCEAN, pour quantifier de manière plus réaliste les flux de carbone générés par le mésozooplancton. En particulier, l'impact

Sujet de thèse - Initiatives SU 2022 - SD Ayata - Diversité fonctionnelle du zooplancton

des migrations nyctémérales (jour/nuit) (liées aux stratégies d'alimentation) sur les flux de carbone sera quantifié. L'influence de la stratégie de diapause saisonnière (liée à l'accumulation des lipides) sera également quantifiée pour les copépodes arctiques, qui jouent un rôle central dans la pompe à carbone lipidique.

Justification de l'approche scientifique

Données utilisées: Ce travail utilisera des données déjà disponibles et issues de différentes provinces biogéographiques de l'océan global couvrant un large spectre de gradients environnementaux. Ces données en particulier sont issues : i) de séries temporelles (BATS, Mer des Sargasses : métabarcoding et images Zooscan ; Point-B, Méditerranée : images Zooscan ; ASTAN, Atlantique Nord Ouest: métabarcoding); ii) de campagnes en mer : campagnes GreenEdge et DarkEdge dans l'Arctique (imagerie in situ UVP), campagnes NSF #1948162 dans l'Atlantique Nord et NSF #1948162 dans le Pacifique Nord-Est (métabarcoding et images Zooscan); et iii) des campagnes Tara Océans à l'échelle globale (imagerie in situ UVP, métabarcoding, métagénomique, métatranscriptomique).

Analyses des données omiques et d'imagerie: Des traits fonctionnels seront attribués aux Unités Taxonomiques Opérationnelles (OTU) ou aux Variants de Séquence d'Amplicon (ASV) identifiés dans les données métabarcoding (e.g., ASTAN, BATS ; Blanco-Bercial 2020) à partir de la littérature [e.g., Faure et al. 2019]. Les OTU/ASV seront ensuite regroupés en groupes fonctionnels grâce à des méthodes d'apprentissage non-supervisé (e.g., DBSCAN, Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) [Benedetti et al. 2015]. À l'aide de données d'imagerie Zooscan ou UVP, les traits morphologiques seront estimés en utilisant des Analyses en Composantes Principales (ACP) sur les caractéristiques morphologiques des images individuelles. Les taux de mortalité seront également estimés à partir des images. Durant la thèse de Laure Vilgrain (co-tutelle SU-ULaval, co-encadrants: SD Ayata, F Maps), nous avons appliqué avec succès cette méthode en Arctique [Vilgrain et al. 2021], révélant des signaux non observables avec les méthodes traditionnelles. Un des développements majeurs attendus dans la cadre de la thèse porte sur l'analyse conjointe des données de séquençage et d'imagerie.

Biogéographie fonctionnelle: L'utilisation de régressions de forêts aléatoires et d'analyses multivariées contraintes (RDA, CCA) sur les traits estimés à partir des données permettra d'identifier les principaux facteurs abiotiques (e.g., température, profondeur, saisonnalité, courants), biotiques (e.g., chlorophylle, composition du zooplancton) et anthropiques (directs, e.g., pêche, et indirects, e.g., acidification, réchauffement, hypoxie) responsables de la distribution des traits fonctionnels du mésozooplancton, de l'échelle locale (séries temporelles) aux échelles régionales (campagnes) et globales (Tara Oceans) [Benedetti et al. 2018, Faure et al. 2021]. Si les variables anthropogéniques ne sont pas disponibles, les valeurs moyennes par provinces biogéographiques ou écorégions seront utilisées [e.g., Ayata et al. 2018]. Les compromis ou "trade-offs" entre les traits (e.g., taille vs. régime trophique) et entre les traits et l'environnement (e.g., stratégie d'alimentation vs. disponibilité en nourriture) seront également identifiés.

Modélisation: Au sein du modèle biogéochimique PISCES, développé par O Aumont au LOCEAN, différentes paramétrisations des taux de broutage, de mortalité et de respiration estimés à partir des données seront testées. De nouvelles versions du modèle avec divers degrés de complexité pour le mésozooplancton seront développés et simulés dans une configuration physique 1D (par exemple, BATS, DYFAMED, HOT) [Ayata et al. 2013, 2014]. Des comparaisons seront également effectuées avec le modèle MIT-Darwin PFT en Arctique (modèle d'écosystème marin développé par F Maps à TAKUVIK).

Adéquation à l'initiative/l'Institut

Ce projet s'inscrit dans les thématiques de l'**ISCD** (analyse de données, modélisation mathématique, simulation numérique) et de l'**Institut des Océans** (Axe Changements globaux, risques et adaptations). Ce projet s'inscrit en particulier dans le cadre de l'équipe-projet FORMAL ("From Observing to Modelling Ocean Life") de l'ISCD, pilotée par SD Ayata, et qui vise à mieux prendre en compte les informations sur le plancton obtenues grâce aux données à haut débit dans les modèles d'écosystèmes marins. Il bénéficiera du co-encadrement par Frédéric Maps, professeur agrégé à l'Université Laval et membre de l'IRL Takuvik à Québec, Canada. Enfin, l'expertise apportée par O Aumont sur la modélisation biogéochimique permettra de développer de nouvelles versions du modèle NEMO-PISCES pour mieux quantifier l'impact du mésozooplancton dans les cycles biogéochimiques océaniques et en particulier les flux de carbone.

Encadrement

Rôle de chaque encadrant et compétences scientifiques apportées (sélection de publications) :

SD Ayata : analyse de données (omiques, imagerie), écologie marine, approche par traits fonctionnels

- Orenstein E, Ayata SD, Maps F, et al. Machine learning techniques to characterize functional traits of plankton from image data. En révision pour *Limnology & Oceanography*.
- Irison JO, Ayata SD, Lindsay DJ, Karp-Boss L, Stemmann L. (2022) Machine Learning for the study of plankton and marine snow from images. *Annual Reviews of Marine Sciences*, volume 14.
- Faure E, Ayata SD*, Bittner L* (2021) Towards omics-based predictions of planktonic functional composition from environmental data. *Nature Communications* 12: 4361. *co-last authors.
- Martini S, Faure E, Larras F, Boye A, Aberle N, Bacouillard L, Beisner B, Bittner L, Castella E, Danger M, Gauthier O, Karp-Boss L, Lombard F, Maps F, Stemmann L, Thiébaud E, Usseglio-Polatera P, Vogt M, Laviale M*, Ayata SD* (2021) Trait-based approaches: a common framework for freshwater and marine ecologists. *Limnology & Oceanography* 66: 965-994. *co-las
- Faure E, Not F, Benoiston AS, Labadie K, Bittner L*, Ayata SD* (2019). Mixotrophic protists display contrasted biogeographies in the global ocean. *ISME Journal* 13 : 1072-1083. *co-derniers auteurs.
- Ayata SD*, Irison JO*, Aubert A, Berline L, Dutay JC, Mayot N, Nieblas AE, D'Ortenzio F, Palmiéri J, Reygondeau G, Rossi V, Guieu C (2018) *Progress in Oceanogr.* 163: 7-20. doi:10.1016/j.pocean.2017.09.016*co- first authors
- Benedetti F, Gasparini S, Ayata SD (2016) Identifying copepod functional groups from species functional traits. *Journal of Plankton Research* 38(1): 159 - 166.
- Ayata SD, Lévy M, Aumont O, Resplandy L, Tagliabue A, Sciandra A, Bernard O (2014) Phytoplankton plasticity drives large variability in carbon fixation efficiency. *Geophysical Research Letters* 41: 1-7.
- Ayata SD, Lévy M, Aumont O, Sciandra A, Sainte-Marie J, Tagliabue A, Bernard O (2013) Phytoplankton growth formulation in marine ecosystem models: should we take into account photo-acclimation and variable stoichiometry in oligotrophic areas? *Journal of Marine Systems* 125: 29-40.

F Maps : modélisation écologique, plancton arctique

- Vilgrain L, Maps F, Picheral M, Babin M, Irison JO*, Ayata SD* (2020) Trait-based approach on zooplankton individual images reveals contrasted ecological patterns along ice melt dynamics. *Limnology & Oceanography* 66: 1155-1167. *co-last authors.
- Maps F, BA Zakardjian, S Plourde, FJ Saucier (2011) Modeling the interactions between the seasonal and diel migration behaviors of *Calanus finmarchicus* and the circulation in the Gulf of St. Lawrence (Canada). *Journal of Marine Systems* 88 (2), 183-202
- Bandara K, Ø Varpe, F Maps, R Ji, K Eiane, V Tverberg (2021) Timing of *Calanus finmarchicus* diapause in stochastic environments. *Ecological Modelling* 460, 109739
- Maps F, NR Record (2020) Marine ecosystems model development should be rooted in past experiences, not anchored in old habits. *ICES Journal of Marine Science* 77 (1), 46-57
- Maps F, NR Record, AJ Pershing (2014) A metabolic approach to dormancy in pelagic copepods helps explaining inter-and intra-specific variability in life-history strategies. *Journal of plankton research* 36 (1), 18-30
- Maps F, Pershing, Record (2012) A generalized approach for simulating growth and development in diverse marine copepod species. *ICES J Mar Sci* 69(3):370-379

O Aumont : modélisation biogéochimique, modèle PISCES, biogéochimie

- Kwiatkowski, L., Aumont, O., Bopp, L. (2019) Consistent trophic amplification of marine biomass declines under climate change. *Global Change Biology* 25, 218-229
- Gorgues, T., Aumont, O., & Memery, L. (2019). Simulated changes in the particulate carbon export efficiency due to diel vertical migration of zooplankton in the North Atlantic. *Geophysical Research Letters*, 46, 5387– 5395. <https://doi.org/10.1029/2018GL081748>
- Aumont, O., Maury, O., Lefort, S., & Bopp, L. (2018). Evaluating the potential impacts of the diurnal vertical migration by marine organisms on marine biogeochemistry. *Global Biogeochemical Cycles*, 32, 1622– 1643. <https://doi.org/10.1029/2018GB005886>
- Aumont, Ethé, Tagliabue, Bopp, Gehlen (2015) PISCES-v2: an ocean biogeochemical model for carbon and ecosystem studies. *Geosci Model Dev* 8:2465-2513

Profil recherché de la candidature

Master en sciences de la mer, avec une forte appétence et de solides compétences en analyse de données et modélisation; ou master en modélisation avec une forte appétence pour les sciences de l'environnement en particulier l'océanographie.

Une thèse en co-tutelle pourra être envisagée (1ère et 3ème année de thèse à Sorbonne Université, 2ème année de thèse à l'Université Laval).