

Titre de la thèse	Caractérisation de la variabilité méso-échelle de la circulation dans la zone mesopélagique en Atlantique Nord et ses connexions avec la dynamique en surface
Ecole Doctorale	ED548
Laboratoire	Institut Méditerranéen d’Océanologie (MIO)
Discipline	Océanographie
Directeur(s) de Thèse & Encadrant(s)	Directeur : Bruno Zakardjian, PR1 Université de Toulon MIO Co-encadrants : Anthony Bosse, Physicien adjoint CNAP MIO Pascale Lherminier, CR CNRS LOPS

Description du sujet de recherche

(3 pages maximum - contexte scientifique, objectifs, mots clé, références)

Contexte, originalité et pertinence par rapport à l'état de l'art :

Ce sujet de thèse de doctorat en océanographie physique s’inscrit dans la cadre du projet APERO (**A**ssessing organic matter **P**roduction, **E**xport and **R**emineralisation : from the surface to the dark **O**cean), projet ANR d’envergure international porté par le LEMAR¹, le MIO et le LOV² qui porte sur la pompe biologique de carbone (PBC) dans l’océan, une composante essentielle du climat de la planète. On peut définir rapidement cette PBC comme la conversion du carbone atmosphérique (CO₂) en matière organique carbonée (MOC) par l’écosystème planctonique dans les couches éclairées de l’océan - i.e. la production primaire (photosynthèse) par le phytoplancton assimilée ensuite par les échelons trophiques supérieurs (zooplancton et micronecton) - et son exportation vers les profondeurs de l’océan via la sédimentation des particules détritiques (organismes morts, pelotes fécales...) et la diffusion de métabolites dissous produits par la dégradation de cette MOC. Le carbone ainsi piégé par la PBC reste isolé de l’atmosphère pendant des décennies à des milliers d’années et il est établi que l’Océan a piégé 1/3 du surplus de carbone atmosphérique émis par les activités anthropiques depuis le début de l’ère industrielle (Khatiwala et al., 2013).

Pour autant, la PBC reste encore largement mal comprise dans la mesure où nous ne savons actuellement pas si l’océan continuera à absorber du carbone au même rythme que par le passé, combien de temps le carbone exporté restera isolé de l’atmosphère et comment la pompe biologique répondra au changement climatique (Passow & Carlson 2012, Pörtner et al., 2019). Ces incertitudes sont en grande partie attribuable à la complexité du système et au nombre limité d’observations de la dynamique temporelle et spatiale de cette production planctonique dans les eaux de surface et de la reminéralisation de la matière organique et de la régénération des minéraux biogènes en profondeur (e.g., Burd et al. 2010, Herndl and Reinthaler 2013, Siegel et

1 Laboratoire des sciences de l’Environnement MARin, UMR UBO/CNRS/IRD/Ifremer

2 Laboratoire d’Océanographie de Villefranche UMR Sorbonne Université/CNRS

al. 2016). En particulier, si le rôle critique de la circulation à méso-échelle (10-100km) et subméso-échelle (1-10km), de la subduction et du mélange vertical dans la régulation de la production primaire et de l'exportation de carbone organique hors des couches éclairées de l'Océan est relativement bien connu (McGillicuddy *et al.*, 2003; Benitez-Nelson *et al.*, 2007; Guidi *et al.*, 2012; Lévy *et al.*, 2014), on sait très peu de choses sur leur impact sur les couches plus profondes (200-300 m à 2000 m et plus) de l'Océan. En fait, davantage d'études ont été publiées sur des corps astronomiques éloignés tels que la Lune ou Mars que sur les processus biogéochimiques et physiques qui se produisent dans l'océan profond, domaine pourtant crucial pour le climat mondial (e.g. Levin and Le Bris, 2015).

Dans ce contexte, le projet APERO vise à pouvoir quantifier les connexions physiques, écologiques et biogéochimiques entre les couches de surface et le domaine mésopélagique (200-2000 m) pour une meilleure compréhension de la PBC et de son rôle sur le piégeage du carbone anthropique dans l'océan. Il est construit sur une campagne océanographique intensive (40 jours) en juin-juillet 2023 mobilisant deux unités de la flotte Océanographique Française - le Pourquoi Pas (PP) et la Thalassa (THA) - et impliquant 10 UMR françaises (environ 45 chercheurs et 25 ingénieurs - techniciens) ainsi que de nombreux collaborateurs internationaux (12 équipes du Royaume-Uni, d'Allemagne, d'Espagne, d'Autriche, d'Australie et des États-Unis). Le site d'étude est situé dans l'océan Atlantique Nord-Est à proximité du site d'observation anglais PAP (Porcupine Abyssal Plain, 49°N-16°W) dont la longue histoire (> 20 ans) d'observations aidera à contextualiser l'étude. La stratégie générale de la campagne est basée sur une combinaison d'études de processus biogéochimiques ciblés au travers de deux structures de type front océanique pour un des navires (le PP) et, simultanément sur l'autre navire (la THA), sur une cartographie régionale à haute résolution de la zone (~ 200km) autour de ces sites d'étude intensive des variables physiques et biogéochimiques de premier intérêt pour les mesures des stocks (particules, phyto- et zoo-plancton, micro-necton) et des flux associés. Cette stratégie devrait permettre une acquisition conjointe des variables biologiques, biogéochimiques et physiques essentielles pour caractériser les différents processus associés à la PBC à des résolutions temporelles et spatiales sans précédent pour la région.

L'exploitation scientifique de la campagne est organisée autour de 5 « Work Package », dont le WP2 (Dynamics from regional to sub-mesoscale - Physical context and forcing) est naturellement dédié à la physique qui tient un rôle essentiel dans la problématique posée. Je partage la co-responsabilité de ce WP2 avec P. Lherminier du LOPS et P. Testor du LOCEAN. La présente demande pour un financement doctoral s'inscrit dans le cadre de ce WP 2 et est principalement axée sur l'exploitation des données qui seront récoltées lors de la campagne. La participation du doctorant à la campagne (embarquement sur la THA) est de rigueur, autant pour l'expérience de vie qu'offre ce type d'opération que pour avoir l'opportunité de manipuler les divers instruments mis en œuvre sur le bateau et qui produiront les données utilisées lors de la thèse. Le projet a démarré en mars de cette année et doit durer quatre ans. La campagne étant programmée pour le début de l'été 2023, et il est donc essentiel que le contrat doctoral débute à l'automne 2022.

Objectifs du doctorat:

L'objectif scientifique principal du volet physique du projet (WP2) est de pouvoir quantifier l'impact de la dynamique et de la circulation à méso- et subméso-échelle sur la distribution et l'enfoncement de la MOC particulaire et dissoute, pour finalement obtenir une meilleure estimation de l'exportation et de la séquestration du carbone (MOC et CO₂) en profondeur à l'échelle régionale de la zone d'étude. La station PAP est située juste au sud de la région de transition entre les gyres sub-polaires et sub-tropicaux de l'Atlantique Nord et également dans celle de dispersion vers le nord des eaux intermédiaires d'origine méditerranéenne. La circulation dans cette zone de transition est impactée par de nombreux tourbillons cycloniques comme anticycloniques de méso-échelle (~ 50-100 km) s'étendant souvent sur plusieurs milliers de mètres dans la colonne d'eau. Ces structures ont des durées de vie relativement courtes, de quelques jours à quelques semaines, ce qui pose en premier lieu un problème de synopticités des observations dans la mesure où le temps nécessaire à un navire océanographique (même des plus performant comme la THA) pour assurer une couverture suffisante de ces structures hydrologiques est de l'ordre de 2-3 semaines. Le volet physique du projet repose donc principalement sur la stratégie de la campagne et des moyens d'observation/mesure mis en œuvre sur le navire (CTD/LADCP/UVP, MVP, VM-ADCP, écho-sondeurs multifréquence), sur des plateformes autonomes (planeurs et flotteur-profileurs Argo) qui opéreront dans la zone d'étude et, parallèlement, sur les

services d'océanographie opérationnelle du CMEMS³ (mesures satellitaires de température et Chla de surface, hauteur dynamique, modèles d'analyses océaniques...). L'objectif général de la thèse sera ainsi de contribuer au développement des outils et méthodes qui permettront de combiner toutes ces informations dans un tout cohérent du point de vue physique et représentatif des conditions océanographiques lors de la campagne. Les objectifs spécifiques seront de :

O1 Caractériser la dynamique à méso-échelle de la zone d'étude telle que représentée dans les modèles et observations satellitaires, en mettant l'accent (pour la partie modèle) sur les connexions entre les structures de surface et celles des couches plus profondes ;

O2 Produire une estimation robuste (i.e. incluant une évaluation des erreurs) de la distribution à méso-échelle des structures hydrologiques, des courants associés et des paramètres bio-géochimiques de la région d'étude pendant la période de la campagne et en faire une interprétation critique au regard de la synopticité attendue de ces observations ;

O3 Établir à partir de cette cartographie optimale une estimation des vitesses verticales et des flux associées aux structures hydrologiques, en particulier au voisinage des structures frontales ciblées pour les études de processus sur le PP.

Méthodes :

Le premier objectif sera traité en partie avant la campagne, s'appuyant sur l'existant au CMEMS (principalement), en vue d'anticiper les conditions de la campagne et fera appel à des métriques eulériennes de type Okubo-Weiss, lagrangiennes de type FSLE et à des méthodes d'analyse spectrale spatiale afin de comparer les niveaux d'énergie entre les couches de surface et profondes en fonction de la taille et du type de structures observées. Plusieurs analyses océaniques (modèle assimilant des données) de résolution horizontale croissante (1/12 au 1/36°) sont en accès libre sur le CMEMS. En complément, nous avons accès à au moins deux modèles académiques à plus haute résolution (~ 1km) : une configuration PAP basée sur le modèle ROMS développé au LEMAR (Brest) par L. Memery (PI APERO) et une configuration NEMO 1/60° de l'Atlantique Nord développée par J. Le Sommer à Grenoble (IGE/MEOM).

Le second objectif, nécessairement post-campagne, demandera un travail conséquent de traitement, contrôle de qualité et de mise en forme d'un large jeu de données hétérogènes (température, salinité, courants, oxygènes, Chla, particules...), de mise en place des outils d'interpolation optimale et de modélisation inverse. Des suites logiciels de traitement des données de courant (les plus délicates) et de modélisation inverse existent déjà dans la communauté (généralement sous licence libre) et on utilisera en premier lieu celles développées par IFREMER au LOPS (coll. P. Lherminier, co-PI du WP2).

Pour le troisième volet, on utilisera l'équation dite « Omega », méthode qui permet de calculer les vitesses verticales via les approximations quasi- et semi-géostrophiques (Giordani et al., 2006), à partir des champs cartographiés à l'échelle régionale, incluant des raffinements à haute résolution (grâce aux données du MVP et des planeur sous-marin) dans la zone proche des sites frontaux ciblés pour les études de processus.

Retombées attendues :

Pour la recherche, une contribution significative à la problématique climatique : Les trois objectifs de la thèse devraient produire chacun matière à publication dans des revues internationales et, dans l'ensemble, apporteront une contribution significative regardant le rôle de la physique sur l'export et la séquestration du Carbone dans l'Océan profond, qui reste une des sources majeures d'incertitude des projections climatiques futures.

Pour le doctorant, un cadre de formation de haut niveau : conçu comme un programme multidisciplinaire, complet et multi-échelle (de la sous-mésoéchelle à la région) qui s'appuie sur les développements méthodologiques les plus récents en matière de capteurs et de plateformes autonomes, de protocole expérimentaux embarqués, de techniques "omics" et d'approches de modélisation innovantes, le projet APERO offre d'abord un cadre de formation des plus riches et variés pour un doctorant en océanographie. La composante internationale du projet est l'autre atout majeur pour un jeune doctorant, que ce soit en terme de

³ Copernicus Marine Environments Monitoring Service service européen d'observation de l'environnement marin

réseau de contacts hors la communauté française ou de connaissances des structures internationales d'appui à la recherche océanographiques.

Pour l'Université de Toulon, un rayonnement national et international accru: Le projet APERO bénéficie d'un soutien très conséquent de l'INSU et de l'ANR (budget total dépassant le M€), de la Flotte Océanographique Française (deux navires phares de la flotte mobilisés pendant 40 jours) et d'une reconnaissance internationale de haut niveau, étant une des composante du programme JETZON établi dans le cadre de la Décennie des Nations unies pour l'océanographie au service du développement durable). En sus de ma contribution personnel (co-resp. d'un WP), le soutien de l'Université de Toulon au projet APERO via un contrat doctoral renforcera la position de l'Université au sein du projet et, en conséquence, son rayonnement national et international.

Mots clés : Océanographie physique, Océan profond, Atlantique Nord, cycle du Carbone, Climat, Campagne océanographique

Références citées :

- Benitez-Nelson CR, Bidigare RR, Dickey TD, et al., 2007. Mesoscale eddies drive increased silica export in the subtropical Pacific Ocean. *Science*, 316(5827):1017-1021. doi:10.1126/science.1136221
- Burd AB, et al., 2010. Assessing the apparent imbalance between geochemical and biochemical indicators of meso- and bathypelagic biological activity: What the @\$#! is wrong with present calculations of carbon budgets? *Deep Sea Res II*, 57(16) : 1557-1571, doi :10.1016/j.dsr2.2010.02.022
- Giordani H., Prieur L., Caniaux G., 2006. Advanced insights into sources of vertical velocity in the ocean. *Ocean Dynamics* (2006) 56: 513-524, doi : 10.1007/s10236-005-0050-1
- Guidi, L., et al., 2012. Does eddy-eddy interaction control surface phytoplankton distribution and carbon export in the North Pacific Subtropical Gyre? *J. Geophys. Res.*, 117, G02024, doi:10.1029/2012JG001984
- Herndl GJ, Reinthaler T. Microbial control of the dark end of the biological pump. *Nat Geosci.* 2013;6(9):718-724. doi:10.1038/ngeo1921
- Khatiwalwa S., Tanhua T., Mikaloff Fletcher S., Gerber M., Doney S.C., Graven H.D., Gruber N., McKinley G.A., Murata A., Ríos A.F., Sabine C.L., 2013. Global ocean storage of anthropogenic carbon. *Biogeosciences*, 10 : 2169-2191, doi : 10.5194/bg-10-2169-2013
- Levin L.A., Le Bris N., 2015, The deep ocean under climate change. *Science* 350(6262):766-768, doi: 10.1126/science.aad0126
- Lévy, M., Franks, P.J.S. & Smith, K.S., 2018. The role of submesoscale currents in structuring marine ecosystems. *Nature Com.*, 9, 4758 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07059-3>
- McGillicuddy, D.J., Anderson, L.A., Doney, S.C., and M.E. Maltrud, 2003. Eddy-driven sources and sinks of nutrients in the upper ocean: results from a 0.1 degree resolution model of the North Atlantic. *Global Biogeochemical Cycles*, 17(2), 1035, doi:10.1029/2002GB001987
- Passow U. and Carlson C.C., 2012. The biological pump in a high CO₂ world. *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 470 : 249-271, doi : 10.3354/meps09985
- Pörtner H.-O., Roberts D.C., Masson-Delmotte V., Zhai P., Tignor M, Poloczanska E., Mintenbeck K., Nicolai M., Okem A., Petzold J., Rama B., Weyer N. (Eds.), 2019. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate, <https://www.ipcc.ch/srocc/home/>
- Siegel D. A. et al., 2016. Prediction of the Export and Fate of Global Ocean Net Primary Production: The EXPORTS Science Plan. *Frontiers Mar. Sci.*, 3: 22, doi : 10.3389/fmars.2016.00022

Encadrement et conditions matérielles pour le doctorant

Les frais de déplacements du personnel embarquant sur les navires (départ-retour Brest) sont pris en charge dans le budget du projet APERO, de même qu'une partie des frais de missions pour les meetings, en particulier pour les doctorants. Le MIO assurera un poste de travail (bureau et informatique) pour le doctorant qui aura de plus accès aux moyens de calculs scientifiques du laboratoire (cluster Pytheas à l'AMU et serveur RESPORE de l'UTLN).

Directeur de thèse : **Bruno Zakardjian**, PR1 Université de Toulon
Institut Méditerranéen d'Océanologie MIO, UMR 110 AMU - 7294 CNRS - 235 IRD - UTLN
Campus de la Garde, Bat. X, bureau X116
CS 60584 - 83041 TOULON CEDEX 9

Co-encadrants :**Anthony Bosse**, Physicien adjoint CNAP

Institut Méditerranéen d'Océanologie MIO, UMR 110 AMU - 7294 CNRS - 235 IRD - UTLN
163 avenue de Luminy - Bât. OCEANOMED
13288 Marseille cedex 09 - France

Pascale Lherminier

Laboratoire d'Océanographie Physique et Spatiale LOPS - UMR 6523 Ifremer-CNRS-Univ.
Brest-IRD
Centre Ifremer Bretagne
Bât. Freycinet 214.00.27Bis
1625 route de Sainte-Anne 29280 Plouzané

Compétences attendues et personnes à contacter

Compétences attendues : formation en océanographie physique, dynamique des fluides géophysiques, programmation (Matlab, Python), instrumentation océanographique (CTD, ADCP)

Personne(s) à contacter :

Bruno Zakardjian Tél : 04 94 14 24 57 - courriels : bruno.zakardjian@univ-tln.fr

bruno.zakardjian@mio.osupytheas.fr