

Proposition de sujet de thèse 2024

(A remplir par les équipes d'accueil et à retourner à Isabelle HAMMAD :

hammad@cerege.fr

*à renseigner obligatoirement pour la validation du sujet, (1) : A remplir lors de la campagne d'attribution des allocations, à l'issue de la session de juin des Masters

Sujet de doctorat proposé *: Impact des structures océaniques de fine échelle sur la distribution de nutriments dans l'océan oligotrophe

Encadrant(s), nom, prénom, adresse mail *:

Elvira PULIDO, elvira.pulido@mio.osupytheas.fr

Andrea DOGLIOLI, andrea.doglioli@univ-amu.fr

Laboratoire *: MIO, équipes BIOGEOCHIMIE et ECOMAD

Tableau récapitulatif du sujet

Candidat(e) ⁽¹⁾		
Nom - Prénom :		
Date de naissance :		
Licence (origine, années, mention) : Mention et classement au Master 1 année (Xème sur Y)		
Mention et classement au S3 du Master 2 (Xème sur Y)		
Mention et classement au S4 du Master 2 (Xème sur Y)		
Mention et classement au M2 (année) (Xème sur Y)		
MASTER (nom, université)		
Sujet de doctorat proposé*		Impact des structures océaniques de fine échelle sur la distribution de nutriments dans l'océan oligotrophe
Encadrants (2 max, indiquer si HDR ou pas)*		PULIDO Elvira (HDR en préparation), DOGLIOLI Andrea (HDR)
Laboratoire*		MIO
Programme finançant la recherche (indiqué si obtenu ou envisagé) (1)		BioSWOT-AdAC –(CNES) et BioSWOT (ANR) obtenu

Sujet de doctorat proposé*

Intitulé* : **Impact des structures océaniques de fine échelle sur la distribution de nutriments dans l'océan oligotrophe**

1. Contexte scientifique

Disponibilité nutritive et pompe biologique de carbone

L'océan absorbe près de $25 \pm 2\%$ du CO_2 anthropique émis dans l'atmosphère (Gruber et al., 2023) jouant un rôle majeur dans la régulation du climat, notamment via le stockage à long terme de carbone assimilé en surface par photosynthèse (pompe biologique à carbone). La croissance du phytoplancton est contrôlée par la disponibilité de nutriments présents dans la couche éclairée de l'océan tel que l'azote (N) et le Phosphore (P). Ainsi la disponibilité de ces éléments joue un rôle majeur dans l'efficacité de la pompe biologique de carbone (Falkowski et al., 1998; Moore et al., 2013), en particulier dans l'océan oligotrophe qui représente 60% de la surface globale (Figure 1). Étudier la distribution des nutriments dans l'océan oligotrophe de surface et les processus agissant sur leur disponibilité est indispensable pour mieux comprendre les facteurs de contrôle de la pompe biologique dans un contexte de changement global.

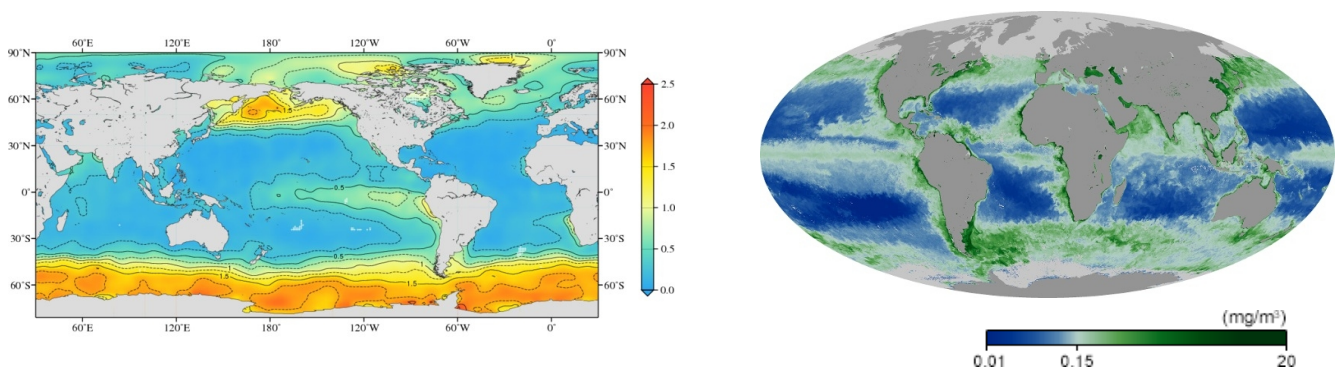
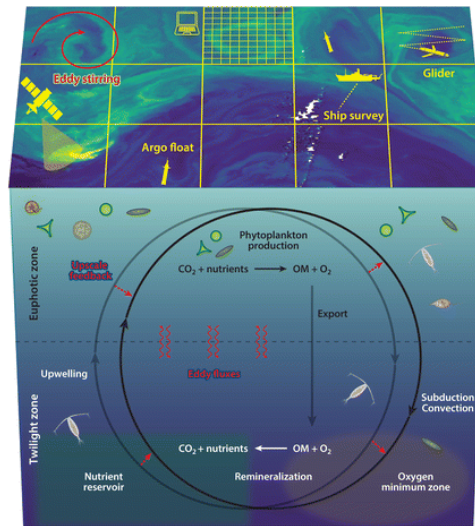


Figure 1. (Gauche) Climatologie moyenne annuelle de la concentration en phosphate ($\mu\text{mol/kg}$) de l'année 2018 (source: WOA). (Droite) Climatologie moyenne mensuelle de la concentration en chlorophylle de surface pour Novembre 2022 (source: NASA Earth Observatory).

La dynamique océanique de fine échelle

Les structures océaniques de fine échelle sont des structures dynamiques d'une taille de 1 à 100 km et d'une durée de vie de quelques jours à quelques semaines. Ces structures affectent la physique océanique et la biogéochimie marine jusqu'à l'échelle climatique, malgré leur durée de vie courte, due aux gradients forts créés par leur dynamique (Ferrari and Wunsch, 2009; Figure 2).

L'échelle temporelle des mouvements et processus verticaux et horizontaux associée à la fine échelle est similaire à celle de nombreux processus et caractéristiques océanique comme la production primaire (Mahadevan, 2016; McGillicuddy, 2014) ou la biodiversité (Lévy et al. 2015, 2018; d'Ovidio al. 2010). Des études basées sur la modélisation couplée physique-biogéochimie montrent un impact de ces structures sur la distribution en nutriments et la répartition du phytoplancton dans la colonne d'eau (Lévy et al., 2012). Alors que l'impact de la fine échelle sur la production primaire est reconnu à l'heure actuelle, son rôle sur la taxonomie du phytoplancton, la diversité des groupes fonctionnels et l'export de carbone et de nutriments associé reste peu étudié (Lévy et al. 2024). De plus, face à l'avancée récente de la modélisation pour caractériser le rôle de la dynamique de fine échelle, les évidences empiriques restent rares.



Lévy M. et al. 2024
Annu. Rev. Mar. Sci. 16:191-215

Figure 2: Schéma de l'influence des fines échelles (en rouge) sur les cycles biogéochimiques marins. En haut, vue de surface de la chlorophylle à la surface de la mer le 22 avril 2007 (données du satellite MODIS-Aqua à 1 km de résolution). Les grilles utilisées dans les modèles de circulation générale des océans à haute résolution et les modèles du système terrestre à résolution grossière sont superposées. Les échelles résolues par les plateformes de surveillance (en jaune) sont également représentées. En bas, vue en coupe montrant une représentation schématique des cycles biogéochimiques océaniques entraînés par la circulation à grande échelle (grande boucle grise). Les échelles fines influencent ces cycles par le biais de flux turbulents locaux et d'une rétroaction vers le haut qui modifie le transport à grande échelle. Tirée de Lévy et al 2024.

La Méditerranée: un laboratoire naturel idéal

Malgré sa petite taille (0.6 % de la surface et 0.3% du volume de l'océan global), la mer Méditerranée, mer semi-fermée entourée de continents, est un modèle d'océan miniature. Elle est divisée en deux bassins principaux (Occidental et Oriental) séparés par le détroit de Sicile et communique avec l'Atlantique via le détroit de Gibraltar. Comparée à des régions où la circulation océanique de surface est très énergétique, comme les courants océaniques de bord Ouest ou les upwellings de bord Est, la mer Méditerranée est une région paradigmatique de circulation faiblement énergétique. Dans cette région, l'existence de provinces biogéochimiques contrastées (Ayata et al. 2018) suggère que la circulation, même si faible par rapport à d'autres régions, est capable de créer une structuration spatiale des communautés microbiennes. En effet, une étude in situ récente a montré que les structures à fine échelle en Méditerranée Occidentale, malgré leur faible énergie et leur courte durée de vie, influencent de manière significative la distribution et la structuration des communautés phytoplanctoniques (Tzortzis et al., 2021, 2023).

D'un point de vue biogéochimique, la mer Méditerranée est une région océanique oligotrophe qui montre un sévère appauvrissement en éléments nutritifs (Moutin and Raimbault, 2002), en particulier de P (Pulido-Villena et al. 2010, Djaoudi et al. 2018) ce qui limite fortement l'activité biologique. En même temps la Méditerranée, malgré sa petite taille, montre une biodiversité parmi les plus élevées au monde (Nike Bianchi and Morri 2000, Coll et al. 2010). Ces caractéristiques font de la Méditerranée un laboratoire naturel idéal pour explorer l'effet des structures océaniques de fine échelle sur la redistribution des nutriments et la réponse biologique associée.

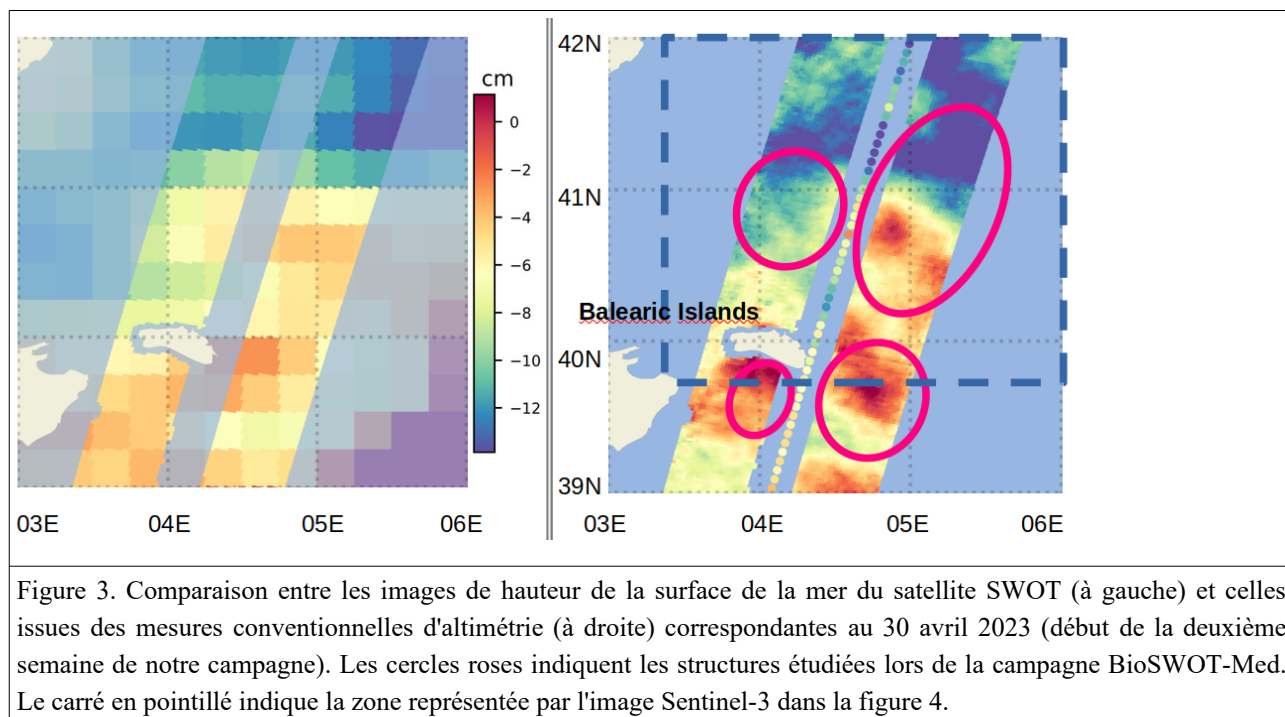
SWOT: une nouvelle mission satellite

Afin d'améliorer la connaissance empirique des dynamiques de fine échelle, la communauté scientifique internationale a concentré ses efforts sur le développement de nouvelles plateformes. Dans ce cadre, le lancement du satellite SWOT (Surface Water and Ocean Topography, <https://swot.jpl.nasa.gov/>), développé conjointement par la NASA et le CNES, reste la mission la plus novatrice pour les sciences océaniques dans un futur proche. SWOT a été lancé avec succès le 16 décembre 2022 pour fournir une variable dynamique clef de l'océan, la hauteur de la surface de la mer, à une résolution et une précision sans précédent. SWOT permet les premières observations synoptiques des structures de fine échelle, au sein de fauchées d'étendus

~150 km. Compte tenu des perspectives ouvertes par SWOT (d'Ovidio et al., 2019 ; Morrow et al, 2019), un consortium international (SWOT-AdAC, "Adopt A Crossover", www.swot-adac.org) a été créé en 2019 pour fédérer des campagnes océanographiques portant sur la fine échelle dans différentes régions du monde, afin de construire une image complète du rôle de la fine échelle sur l'océan global. Les observations de SWOT dans les zones de croisement des traces à terre pendant la phase à échantillonnage rapide en début de la mission, ont permis pour la première fois d'obtenir des cartes journalières dans des zones d'activité de fronts (qui sont connues pour engendrer des vitesses verticales) et ainsi les comparer à des mesures de terrain sur ces mêmes zones.

BioSWOT-Med: une campagne dédiée au couplage physique-biogéochimie à fine échelle

Parmi les campagnes du cosortium SWOT-AdAC, la campagne BioSWOT-Med (<https://doi.org/10.17600/18002392>; PIs : A. Doglioli et G. Grégori) s'est focalisée sur l'étude du couplage physique-biogéochimie à fine échelle. BioSWOT-Med a été réalisée à bord du R/V L'Atalante du 21 avril au 14 mai 2023 dans une zone située à environ 100 km au nord-est de l'île de Minorque (Espagne), le long d'une des traces à terre de la Méditerranée nord-ouest du satellite SWOT. Les images préliminaires en temps quasi réel de la hauteur de la surface de la mer à partir de SWOT ont mis en évidence des structures dynamiques qui étaient tout simplement invisibles sur les cartes DUACS standard (Figure 3).



Les données SWOT, combinées aux cartes de chlorophylle de surface à haute résolution provenant du capteur OLCI-Sentinel 3 (Figure 4), ont fortement aidé la mise en place de notre stratégie d'échantillonnage adaptative (i.e. basée sur l'information provenant des images satellite en temps quasi-réel) et Lagrangienne (i.e. en dérive en suivant les masses d'eau) du Front Nord Baléares et des structures à fine échelle associées. Les vents forts du nord, la Tramontane et le Mistral, ont créé des conditions difficiles pour les opérations à bord du navire, mais aussi un cadre idéal pour étudier la transformation des masses d'eau locales et la réponse du plancton associée.

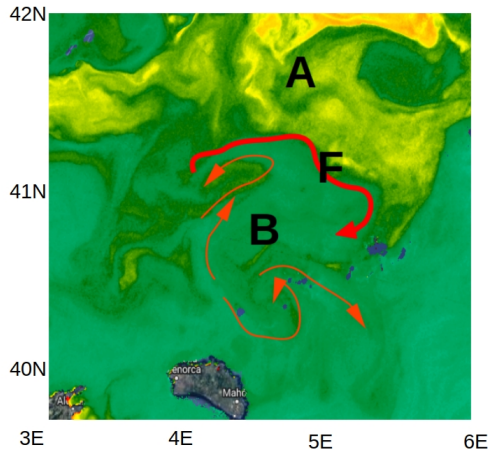


Figure 4. Image Sentinel-3 à haute résolution de la concentration en chlorophylle (vert foncé: 0.1 µg/l, rouge: 1µg/l) montrant notre zone d'étude le premier jour de la campagne (21 avril 2023). Les trois régions principales étudiées sont indiquées: A (des eaux atlantiques modifiées avec une plus forte salinité, une plus faible température et plus productive), région B (des eaux atlantiques plus récentes, moins salées, plus chaudes et moins productives) et la zone F (zone frontal qui sépare A et B).

La stratégie d'échantillonnage a consisté en une série de transects horizontaux à travers les deux masses d'eau (A, B) séparées par le front (F) suivis par des stations verticales dans chacune des masses d'eau (Figure 5). Lors de stations verticales, deux types de prélèvements ont été réalisés: à l'aide d'une rosette (24 bouteilles Niskin) entre 0 et 500 m et à l'aide d'un système de pompage propre afin d'acquérir des profils à haute résolution dans la couche de surface (entre 0 et 50 m avec une résolution tous les 2 ou 4 m).

Ainsi pendant trois semaines, une grande quantité de données multidisciplinaires et multiplateformes a été collectée in-situ afin d'étudier la dynamique océanique à fine échelle et son impact sur la biogéochimie et la diversité du plancton (voir le catalogue complet des métadonnées à l'adresse suivante https://people.mio.osupytheas.fr/~doglioli/BioSWOT/BioSWOT-Med_2023/BioSWOT-Med_metadata.pdf).

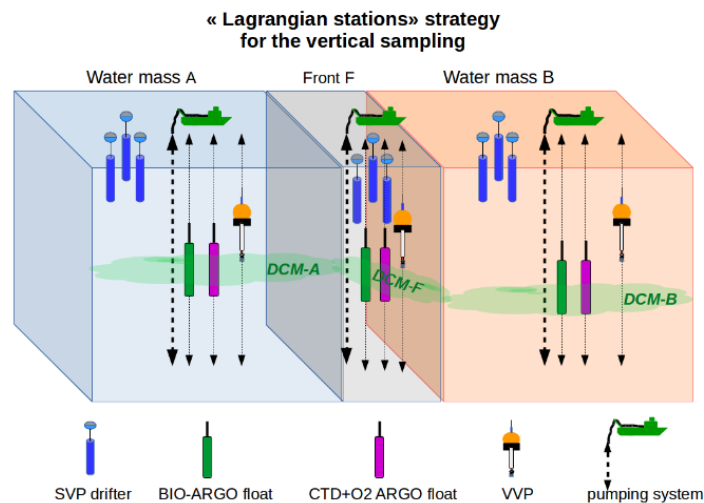


Figure 5 : Schéma de la stratégie d'échantillonnage Lagrangienne pour étudier deux masses d'eaux différentes séparées par un front et marquées par des bouées (floats) et des drifters qui permettront de suivre leurs déplacements (source : A.Doglioli, G.Grégori et al., BIOSWOTMed cruise, 2021).

2. Objectifs du projet de thèse

L'objectif de cette thèse est de quantifier et caractériser l'impact des structures océanique de fine échelle sur la dynamique de nutriments (N et P) dans une région océanique oligotrophe, la mer Méditerranée, à travers une approche couplée physique-biogéochimie.

Plus précisément, ce projet de thèse propose d'exploiter les données issues de la campagne BIOSWOT-Med pour répondre aux objectifs spécifiques suivants:

- 2.1. Impact d'un front océanique sur la distribution horizontale et verticale de la concentration de N et P
- 2.2. Quantification des flux de nutriments vers la couche éclairée associés au front océanique
- 2.3. Contribution de la reminéralisation à l'apport de nutriments à la couche éclairée

2.1. Impact d'un front océanique sur la distribution horizontale et verticale de N et P

L'étude de la distribution de nutriments pendant la campagne BIOSWOT-Med représente un double défi: tout d'abord, la région d'étude est caractérisée par des faibles concentrations en nutriments et, deuxièmement, la dynamique océanique de fine échelle peut provoquer des changements faibles (à l'échelle nanomolaire) et rapides de la concentration en nutriments. Les deux défis ont été abordés à travers un ensemble de mesures de nutriments à haute fréquence et haute précision analytique qui va permettre d'obtenir un jeu de données inédit composé de:

- Concentration de nitrate, nitrite, phosphate et silicate mesurée avec des techniques standards sur tous les déploiements de rosette effectués pendant la campagne, soit un total de 48 profils (16 profondeurs entre 0 et 500 m).
- Concentration de phosphate mesurée avec la technique CFA-LWCC (i.e., Zhang and Chi, 2002; Djaoudi et al., 2018, Martiny et al. 2019, Pulido-Villena et al. 2021) qui atteint des limites de détection de 1 nM contre 20 nM pour les méthodes classiques, sur tous les prélèvements rosette (10 profondeurs entre 0 et 200 m) et les prélèvements pompage (20 profondeurs entre 0 et 50 m).
- Profils à très haute résolution de concentration de nitrates obtenus à l'aide d'un flotteur PROVOR CTS4 SUNA WMO 1902606. Le flotteur a été déployé par l'équipe de l'OGS (Trieste, Italie) le 28 avril dans la masse d'eau B et capturé à l'intérieur du tourbillon. Le flotteur est équipé de capteurs CTD, oxygène, radiomètre, fluoromètre et SUNA (Submersible Ultraviolet Nitrate Analyzer) pour les nitrates.

Cet ensemble de données sera exploité pendant la première année de thèse afin de calculer les gradients de concentration horizontaux et verticaux associés aux structures de fine échelle identifiées.

2.2. Quantification des flux de nutriments vers la couche éclairée associés au front océanique

L'étude de structure de fine échelle implique l'utilisation de techniques de mesure physique haute résolution afin d'avoir accès aux perturbations de la colonne d'eau engendrées par celle-ci. Pendant la campagne BIOSWOT-Med, la diffusivité diapycnal (K_z) a été mesurée grâce à un profileur en chute libre de microstructure vertical (VMP250) nous donnant ainsi accès à des estimations directes in situ du coefficient K_z à chacune des profondeurs où nos mesures de nutriments ont été effectuées. Ainsi, les données concomitantes de mélange turbulent associé aux structures de fine échelle et des gradients nanomolaires de concentration (section 2.1.) rendra possible la quantification du flux diffusif turbulent (Bouruet-Aubertot et al., 2018; Pulido-Villena et al., 2021) associé aux structures de fine échelle ainsi que l'advection verticale. Cela nous permettra de prendre en compte les deux effets (advection et diffusion) lors de la caractérisation du flux vertical de nutriments. Ce travail sera réalisé en collaboration avec pascale Bouruet-Auberot et Robin Rolland (LOCEAN).

Enfin, les données issues de cette deuxième partie de la thèse vont permettre d'évaluer, pour la première fois en mer Méditerranée, la contribution des flux nanomolaires de nutriments vers la couche euphotique au soutien de la production primaire et à la structuration des communautés phytoplanctoniques comme ça a été observé dans le Pacifique Nord sub-tropical (Hashihama et al. 2021). Ce travail sera réalisé en collaboration avec Gérald Gregori et Laurina Oms (MIO).

2.3. Contribution de la reminéralisation à l'apport de nutriments à la couche éclairée

Comme énoncé en introduction, la mer Méditerranée montre un appauvrissement particulièrement sévère en phosphore. Cette caractéristique biogéochimique est présente dans d'autres régions océaniques comme l'Atlantique subtropical (Wu et al. 2000, Martiny et al. 2019). Dans ce régions, le réservoir de P organique (DOP, de l'anglais, dissolved organic phosphorus) représente une source alternative de phosphate pour les micro-organismes (Karl, 2014). Pour accéder au phosphate, la plupart de micro-organismes marins synthétisent des enzymes phospho-hydrolytiques, dont la plus répandue est la phosphatase alcaline (PA), pour casser les liaisons C-O-P dans les phospho-esters et libérer du phosphate. Des fortes activités de PA sont typiquement mesurées dans l'Atlantique subtropical (Mather et al. 2008, Lomas et al. 2010) et en Mer

Méditerranée (Van Wambeke et al 2002, Pulido-Villena et al. 2021), ce qui suggère une reminéralisation accrue du DOP dans ce régions pour palier au manque de phosphate.

Dans ce contexte, la troisième partie de la thèse vise à quantifier les flux de P à la couche éclairée à travers la minéralisation du DOP. Ce troisième objectif repose sur l'hypothèse que, si les structures de fine échelle conduisent à une redistribution verticale et horizontale de P (Objectif 1) et engendrent des flux verticaux de P (Objectif 2), ceci peut conduire à une modification de l'utilisation du DOP comme source de phosphate.

Pour répondre à cette question, pendant la campagne BIOSWOT-Med, de données d'activité de PA et de la concentration de P et N organique ont été collectées. L'activité de la PA a été mesurée à bord grâce à une méthode fluorimétrique à l'aide d'un substrat modèle fluorogénique, le 4-methylumbelliferyl phosphate (MUF-P) (Hoppe, 1983). De plus, des échantillons prélevés à différentes profondeurs dans toutes les stations ont été conservées pour analyse ultérieure de la concentration de N et P organique dans la fraction dissoute et particulaire. Au laboratoire, ces échantillons seront soumises à une digestion chimique d'après la méthode de Raimbault et al. (1999) pour transformer les formes organiques de N et P en nitrate et phosphate qui seront analysés selon la méthode LWCC. Ce travail sera réalisé en collaboration avec Solange Duhamel (University of Arizona).

3. Résultats attendus

Le travail de thèse proposé va produire un jeu de données original et novateur incluant des variables physiques et biogéochimiques concomitantes à une résolution sans précédent permettant de paramétriser les relations entre la dynamique océanique de fine échelle et la distribution et les flux de nutriments dans la couche éclairée. Les résultats obtenus vont contribuer à améliorer la compréhension des facteurs qui contrôlent la structuration spatiale du phytoplancton autour des structures de fine échelle dans les régions océaniques oligotrophes, fortement influencées par des modifications dans la dynamique des nutriments. Dans la perspective d'un océan de plus en plus stratifié et oligotrophe (IPCC, 2021), cette thèse peut apporter une contribution cruciale aux connaissances sur les facteurs de contrôle de l'efficacité de la pompe biologique de carbone océanique.

4. Calendrier prévisionnel de la thèse

	Année 1				Année 2				Année 3			
	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
OBJ 1. Impact d'un front océanique sur la distribution de N et P												
1.1. Traitement des données de sels nutritifs												
1.2. Traitement des données phosphate nanomolaire												
1.3. Estimation de gradients horizontaux et verticaux de concentration												
1.4. Rédaction article 1												
OBJ 2. Quantification des flux de nutriments vers la couche éclairée												
2.1. Couplage des gradients de concentration en phosphate avec profils de Kz												
2.2. Couplage des gradients de concentration en nitrate avec profils de Kz												
2.3. Rédaction article 2												
OBJ 3. Contribution de la reminéralisation												
3.1. Estimation de paramètres de Michaelis-Menten pour la PA												
3.2. Digestion chimique et analyse des échantillons de DON/DOP et POP/PON												
3.3. Traitement de données DON/DOP et POP/PON												
3.4. Rédaction article 3												
GENERAL												
Communication (congrès ED, conférences, réunions BIOSWOT)												
Collaboration dans articles en tant que co-auteur												
Enseignement/Encadrement												

5. Intégration au sein du MIO et collaborations

Ce projet de thèse répond au défi transverse 3 du MIO: Identification des liens entre biodiversité, cycles biogéochimiques et phénomènes physiques. Les activités de recherche proposées dans cette thèse vont s'appuyer de façon importante sur la Plateforme "Éléments Biogènes en Océanographie".

Ce sujet de thèse est un pilier fondamental du programme BIOSWOT-Med et va faire le lien entre les processus physiques décrits et leur impact sur la biodiversité du phytoplancton. Le/a doctorant/e va donc

bénéficier d'un réseau de collaborations très riche, au sein du MIO, mais aussi dans d'autres laboratoires en France (Pascale Bouruet-Aubertot, Francesco d'Ovidio, LOCEAN) et à l'étranger.

En particulier, parmi nos collaborations internationales, ce travail de thèse bénéficiera de la coopération avec Solange Duhamel (U. Arizona) pour les mesures de polyP, avec M. Menna et M. Pacciaroni (OGS, Trieste) pour les mesures biogéochimiques par flotter profileur et avec M. Bellacicco (CNR-ISMAR, Rome) et M. Berta (CNR-ISMAR, La Spezia) pour les mesures biogéochimiques par bouée dérivante de surface.

6. Bibliographie

- Ayata, S.D. et al. (2018), Regionalisation of the Mediterranean basin, a MERMEX synthesis, *Progress in Oceanography*, 163, 7–20, doi:10.1016/j.pocean.2017.09.016.
- Bouruet-Aubertot, P., Cuypers, Y., Doglioli, A., Caffin, M., Yohia, C., de Verneil, A., Petrenko, A., Lefèvre, D., Le Goff, H., Rougier, G., Picheral, M., Moutin, T., 2018. Longitudinal contrast in turbulence along a $\sim 19^\circ$ S section in the Pacific and its consequences for biogeochemical fluxes. *Biogeosciences* 15, 7485–7504. <https://doi.org/10.5194/bg-15-7485-2018>
- Djaoudi, K., Van Wambeke, F., Coppola, L., D'ortenzio, F., Helias-Nunige, S., Raimbault, P., Taillandier, V., Testor, P., Wagener, T., and Pulido-Villena, E.: Sensitive determination of the dissolved phosphate pool for an improved resolution of its vertical variability in the surface layer: New views in the P-depleted Mediterranean Sea, *Frontiers in Marine Science*, 5, 234, <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00234>, 2018.
- d'Ovidio, F., Pascual, A., Wang, J., Doglioli, A.M., Jing, Z., Moreau, S., Grégori, G., Swart, S., Speich, S., Cyr, F., Legresy, B., Chao, Y., Fu, L., Morrow, R.A., 2019. Frontiers in Fine-Scale in situ Studies: Opportunities During the SWOT Fast Sampling Phase. *Front. Mar. Sci.* 6. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00168>
- Du, C., Liu, Z., Kao, S., Dai, M., 2017. Diapycnal Fluxes of Nutrients in an Oligotrophic Oceanic Regime: The South China Sea. *Geophys. Res. Lett.* 44, 11,510–11,518. <https://doi.org/10.1002/2017GL074921>
- Falkowski, P. G., Barber, R. T., and Smetacek, V.: Biogeochemical Controls and Feedbacks on Ocean Primary Production, *Science*, 281, 200–206, <https://doi.org/10.1126/science.281.5374.200>, 1998.
- Hashihama, F., Yasuda, I., Kumabe, A., Sato, M., Sasaoka, H., Iida, Y., Shiozaki, T., Saito, H., Kanda, J., Furuya, K., Boyd, P.W., Ishii, M., 2021. Nanomolar phosphate supply and its recycling drive net community production in the subtropical North Pacific. *Nat Commun* 12, 3462. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23837-y>
- Hoppe, H.-G.: Significance of exoenzymatic activities in the ecology of brackish water: measurements by means of methylumbelliferyl-substrates, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 11, 299–308, <https://doi.org/10.3354/meps011299>, 1983.
- IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, doi:10.1017/9781009157896.
- Karl, D. M.: Microbially mediated transformations of phosphorus in the sea: New views of an old cycle, *Ann. Rev. Mar. Sci.*, 6, 279–337, <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010213-135046>, 2014.
- Lévy, M., Ferrari, R., Franks, P. J. S., Martin, A. P., and Rivière, P. (2012), Bringing physics to life at the submesoscale, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L14602, <https://doi.org/10.1029/2012GL052756>.
- Lévy, M., Damien Couespel, Clément Haëck, M.G. Keerthi, Inès Mangolte, Channing J. Prend (2024). The Impact of Fine-Scale Currents on Biogeochemical Cycles in a Changing Ocean. *Annual Review of Marine Science* 2024 16:1, 191-215.
- Lomas, M. W., Burke, A. L., Lomas, D. A., Bell, D. W., Shen, C., Dyhrman, S. T., and Ammerman, J. W.: Sargasso Sea phosphorus biogeochemistry: an important role for dissolved organic phosphorus (DOP), *Biogeosciences*, 7, 695–710, <https://doi.org/10.5194/bg-7-695-2010>, 2010.

- Martiny, A. C., Lomas, M. W., Fu, W., Boyd, P. W., Chen, Y.-I. L., Cutter, G. A., Ellwood, M. J., Furuya, K., Hashihama, F.,
- Kanda, J., Karl, D. M., Kodama, T., Li, Q. P., Ma, J., Moutin, T., Woodward, E. M. S., and Moore, J. K.: Biogeochemical controls of surface ocean phosphate, *Science Advances*, 5, eaax0341, <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax0341>, 2019.
- Mather, R. L., Reynolds, S. E., Wolff, G. A., Williams, R. G., Torres-Valdes, S., Woodward, M. S., Landolfi, A., Pan, X., Sanders, R., and Achrterberg, E. P.: Phosphorus cycling in the North and South Atlantic Ocean subtropical gyres, *Nat. Geosci.*, 1, 439-443, <https://doi.org/10.1038/ngeo232>, 2008.
- Moore, C. M., Mills, M. M., Arrigo, K. R., Berman-Frank, I., Bopp, L., Boyd, P. W., Galbraith, E. D., Geider, R. J., Guieu, C., Jaccard, S. L., Jickells, T. D., Roche, J. L., Lenton, T. M., Mahowald, N. M., Marañón, E., Marinov, I., Moore, J. K., Nakatsuka, T., Oschlies, A., Saito, M. A., Thingstad, T. F., Tsuda, A., and Ulloa, O.: Processes and patterns of oceanic nutrient limitation, *Nature Geoscience*, 6, 701–710, <https://doi.org/10.1038/ngeo1765>, 2013.
- Morrow, R., Fu, L.-L., Arduin, F., Benkiran, M., Chapron, B., Cosme, E., d'Ovidio, F., Farrar, J.T., Gille, S.T., Lapeyre, G., Le Traon, P.-Y., Pascual, A., Ponte, A., Qiu, B., Rascle, N., Ubelmann, C., Wang, J., Zaron, E.D., 2019. Global Observations of Fine-Scale Ocean Surface Topography With the Surface Water and Ocean Topography (SWOT) Mission. *Front. Mar. Sci.* 6. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00232>
- Moutin, T. and Raimbault, P.: Primary production, carbon export and nutrients availability in western and eastern Mediterranean Sea in early summer 1996 (MINOS cruise), *J. Marine Syst.*, 33–34, 273–288, [https://doi.org/10.1016/s0924-7963\(02\)00062-3](https://doi.org/10.1016/s0924-7963(02)00062-3), 2002.
- Pulido-Villena, E., Desboeufs, K., Djaoudi, K., Van Wambeke, F., Barrillon, S., Doglioli, A., Petrenko, A., Taillandier, V., Fu, F., Gaillard, T., Guasco, S., Nunige, S., Triquet, S., Guieu, C., 2021. Phosphorus cycling in the upper waters of the Mediterranean Sea (PEACETIME cruise): relative contribution of external and internal sources. *Biogeosciences* 18, 5871–5889. <https://doi.org/10.5194/bg-18-5871-2021>
- Pulido-Villena, E., Rérolle, V., Guieu, C., 2010. Transient fertilizing effect of dust in P-deficient LNLC surface ocean: *Geophys. Res. Lett.* 37, n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2009GL041415>
- Raimbault, P., Diaz, F., Pouvesle, W., and Boudjellal, B.: Simultaneous determination of particulate organic carbon, nitrogen and phosphorus collected on filters, using a semi-automatic wet-oxidation method, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 180, 289–295, <https://doi.org/10.3354/meps180289>, 1999.
- Tzortzis, R., Doglioli, A. M., Messié, M., Barrillon, S., Petrenko, A. A., Izard, L., Zhao, Y., d'Ovidio, F., Dumas, F., and Gregori, G.: The contrasted phytoplankton dynamics across a frontal system in the southwestern Mediterranean Sea, *Biogeosciences*, 20, 3491–3508, <https://doi.org/10.5194/bg-20-3491-2023>, 2023.
- Van Wambeke, F., Christaki, U., Giannakourou, A., Moutin, T., and Souvemerzoglou, K.: Longitudinal and vertical trends of bacterial limitation by phosphorus and carbon in the Mediterranean Sea., *Microb. Ecol.*, 43, 119–133, <https://doi.org/10.1007/s00248-001-0038-4>, 2002.
- Wu, J., Sunda, W., Boyle, E. A., and Karl, D. M.: Phosphate Depletion in the Western North Atlantic Ocean, *Science*, 289, 759–762, <https://doi.org/10.1126/science.289.5480.759>, 2000.

Détail du Programme finançant la recherche* :

La campagne BIOSWOT-Med contribue au projet **BIOSWOT-AdAC** (PI F.d'Ovidio, A.Doglioli, G.Gregori, S.Speich et P.Garreau), financé par l'appel conjoint NASA-CNES pour l'équipe scientifique SWOT. BIOSWOT-AdAC se concentre sur les opportunités spécifiques de la phase d'échantillonnage rapide SWOT, en promouvant le consortium international SWOT-AdAC (<https://www.swot-adac.org/>) soutenu par CLIVAR et coordonnant plusieurs campagnes sur le terrain pendant cette période spécifique de la mission satellite. Les travaux de thèse seront également financés par l'**ANR BioSWOT** (PI Francesco d'Ovidio).

Directeur(s) de thèse proposé(s)*

(limiter au plus à deux personnes principales, dont au moins une titulaire de l'HDR)

Directeur HDR proposé*

Nom - Prénom : *DOGLIOLI Andrea*

Corps : *MCF*

Laboratoire(i.e. formation contractualisée de rattachement, éventuellement équipe au sein de cette formation) : *MIO*

Adresse mail : andrea.doglioli@univ-amu.fr

Choix de cinq publications récentes (souligner éventuellement les étudiants dirigés co-signataires) :

Tzortzis, R., Doglioli, A. M., Messié, M., Barrillon, S., Petrenko, A. A., Izard, L., Zhao, Y., d'Ovidio, F., Dumas, F., and Gregori, G.: The contrasted phytoplankton dynamics across a frontal system in the southwestern Mediterranean Sea, Biogeosciences, 20, 3491–3508, <https://doi.org/10.5194/bg-20-3491-2023>, 2023.

Messié, M., Petrenko, A., Doglioli, A.M., Martinez, E., Alvain S. (2022). Basin-scale biogeochemical and ecological impacts of islands in the tropical Pacific Ocean. Nat. Geosci., doi: 10.1038/s41561-022-00957-8.

Tzortzis, R., Doglioli, A.M., Barrillon, S., Petrenko, A. A., d'Ovidio, F., Izard, L., Thyssen, M., Pascual, A., Barceló-Llull, B., Cyr, F., Tedetti, M., Bhairy, N., Garreau, P., Dumas, F., and Grégori, G. (2021). Impact of moderately energetic fine-scale dynamics on the phytoplankton community structure in the western Mediterranean Sea. Biogeosciences, 18, 6455-6477, doi: 10.5194/bg-18-6455-2021. hal-03485758

Costa, A., Martin González, A., Guizien, K., Doglioli, A.M., Gómez, J.M., Petrenko, A.A., Allesina S. (2019). Ecological networks: Pursuing the shortest path, however narrow and crooked., Sci.Rep., 9, 17826, doi:10.1038/s41598-019-54206-x. hal-02454786 doi biorxiv: 10.1101/475715

Rousselet, L., Doglioli, A.M., de Verneil, A., Pietri, A., Della Penna, A., Berline, L., Marrec, P., Grégori, G., Thyssen, M., Carlotti, F., Barillon, S., Simon-Bot, F., Bonal, M., d'Ovidio, F. and Petrenko, A.A. (2019). Vertical motions and their effects on a biogeochemical tracer in a cyclonic structure finely observed in the Ligurian Sea. J.Geophys.Res., 124, 3561-3574, doi:10.1029/2018JC014392. hal-02124795v2

Thèses encadrées ou co-encadrées au cours des quatre dernières années*

Nom : *OMS Laurina*

Intitulé : *Lagrangian study of fine-scale physical-biological coupling.*

Type d'allocation : *50 % CNES +50 % Institut OCEAN d'AMU*

Date de début de l'allocation de doctorat : *01/10/2022*

Date de soutenance (si la thèse est soutenue) : *prévue 2025*

Programme finançant la recherche : *BIOSWOT-Med financé par CNES-TOSCA, CPER, ESA, AMU, CNRS-LEFE, IRD, MIO et Flotte Océanographique Française, plus partenaires étrangers (USA, IT, ES,NZ).*

Situation actuelle du docteur (si la thèse est soutenue) : *---*

Pourcentage de participation du directeur à l'encadrement en cas de co-direction : *...34...%*

Nom : *TZORTIS Roxane*

Intitulé : *The fine scale circulation and its impact on the phytoplankton biodiversity.*

Type d'allocation : *100 % ED251 d'AMU*

Date de début de l'allocation de doctorat : *01/10/2019*

Date de soutenance (si la thèse est soutenue) : *09/12/2022*

Programme finançant la recherche : *BIOSWOT-AdAC financé par CNES, NASA, MIO and SHOM.*

Situation actuelle du docteur (si la thèse est soutenue) : *Post-Doc à IMEDEA (Palma de Maiorca, Espagne)*

Pourcentage de participation du directeur à l'encadrement en cas de co-direction : *...50...%*

Autre directeur proposé (éventuellement)*

Nom - Prénom : PULIDO Elvira

Corps : CRCN CNRS

Adresse mail : elvira.pulido@mio.osupytheas.fr

Laboratoire (i.e. formation contractualisée de rattachement, éventuellement équipe au sein de cette formation) : MIO

Choix de cinq publications récentes (souligner éventuellement les étudiants dirigés co-signataires) :

Filella A, Riemann L, Van Wambeke F, Pulido-Villena E, Vogts A, Bonnet S, Grosso O, Diaz JM, Duhamel S and Benavides M (2022) Contrasting Roles of DOP as a Source of Phosphorus and Energy for Marine Diazotrophs. *Front. Mar. Sci.* 9:923765. doi: 10.3389/fmars.2022.923765

Pulido-Villena, E., Desboeufs, K., Djaoudi, K., Van Wambeke, F., Barrillon, S., Doglioli, A. M., Petrenko, A., Taillandier, V., Fu, F., Gaillard, T., Guasco, S., Nunige, S., Triquet, S. and Guieu, C. (2021), 'Phosphorus cycling in the upper waters of the Mediterranean Sea (PEACETIME cruise): relative contribution of external and internal sources', *Biogeosciences* 18(21), 5871 - 5889. doi: 10.5194/bg-18-5871-2021

Van Wambeke, F., Pulido, E., Catala, P., Dinasquet, J., Djaoudi, K., Engel, A., Garel, M., Guasco, S., Marie, B., Nunige, S., Taillandier, V., Zäncker, B., and Tamburini, C.: Spatial patterns of ectoenzymatic kinetics in relation to biogeochemical properties in the Mediterranean Sea and the concentration of the fluorogenic substrate used, *Biogeosciences*, 18, 2301–2323, <https://doi.org/10.5194/bg-18-2301-2021>, 2021.

Taillandier, V., Prieur, L., D'Ortenzio, F., Ribera d'Alcalà, M., and Pulido-Villena, E.: Profiling float observation of thermohaline staircases in the western Mediterranean Sea and impact on nutrient fluxes, *Biogeosciences*, 17, 3343–3366, <https://doi.org/10.5194/bg-17-3343-2020>, 2020.

Djaoudi, K., et al., 2018. Sensitive Determination of the Dissolved Phosphate Pool for an Improved Resolution of Its Vertical Variability in the Surface Layer: New Views in the P-Depleted Mediterranean Sea. *Frontiers in Marine Science*, 2018, 5, pp.234.

Thèses encadrées ou co-encadrées au cours des quatre dernières années*

Nom :

Intitulé :

Type d'allocation :

Date de début de l'allocation de doctorat :

Date de soutenance (si la thèse est soutenue) :

Programme finançant la recherche :

Situation actuelle du docteur (si la thèse est soutenue)

Pourcentage de participation du directeur à l'encadrement en cas de co-direction :