

AO INSU 2021
Section « Océan-Atmosphère »

Dossier scientifique LEFE
FUMSECK-vv
Action IMAGO

Nom du porteur du projet (*nom, prénom, qualité*) :
Barrillon Stéphanie, CRCN

Laboratoire de rattachement (*nom, code unité, adresse, téléphone, mail*) :
M.I.O. Institut Méditerranéen d'Océanologie UMR 7294
Campus de Luminy - OCEANOMED
Bâtiment Méditerranée
13288 MARSEILLE cedex 09
Tel : 04.86.09.05.91

Titre et acronyme du projet :
Facilities for Updating the Mediterranean Submesoscale - Ecosystem Coupling Knowledge – vertical velocities (FUMSECK-vv)

Durée totale du projet :
2 ans

Demande budgétaire pour les années à venir (*la durée du projet et les financements demandés dépendent du type de projet sélectionné*) :

2021 : 13000
2022 : 10500
2023

Visa obligatoire du Directeur de laboratoire porteur :
(préciser nom et prénom)
Richard Sempéré

Description du projet

(1) Prénom, nom, et laboratoire de rattachement du porteur du projet

Stéphanie Barrillon, MIO

(2) Titre et acronyme du projet

Facilities for Updating the Mediterranean Submesoscale - Ecosystem Coupling Knowledge – vertical velocities (FUMSECK-vv)

(3) Type de projet : cocher un seul choix possible (cf. texte de l'AO LEFE 2021 et le guide des programmes nationaux)

Projet à risque ou de rupture (durée : deux ans ; budget moyen annuel de 5 à 15 k€) ⁽¹⁾

Projet en lien avec les IR/TGIR (durée : deux ans ; budget moyen annuel de 10 à 15 k€) ⁽¹⁾⁽²⁾

Projet collaboratif (durée : deux à trois ans ; budget moyen annuel 10 à 30 k€ ; nombre d'unités impliquées ≥ 3) ⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾

(4) Informations sur le projet

- Le projet est-il

- un nouveau projet? Oui Non

- une re soumission? si oui, en quelle année a-t-il déjà été soumis?
2019 (AO 2020)

- Avez-vous soumis/comptez-vous soumettre le même projet ou un projet compagnon à un autre AO INSU ? (Si oui, lequel ?)

Non

- Avez-vous un co-porteur à ce projet ? Si oui, indiquez le nom de la personne et son unité d'appartenance.

Oui. Anne Petrenko, MIO.

- Le proposant a-t-il porté ou participé à un projet financé par le LEFE au cours des 3 dernières années ? Oui Non

Si oui, préciser l'appel d'offres, la durée du projet et son titre. Préciser aussi en quelques lignes en quoi le nouveau projet est différent du précédent.

(5) Mots clés

Fines échelles, vitesses verticales, instrumentation *in situ*, observations satellite, FUMSECK, BioSWOT, SWOT

(6) Intérêt scientifique, contexte et état de l'art

De longue date, la composante verticale de la vitesse des courants océaniques a été négligée, paramétrée de façon simple, ou considérée comme non mesurable, en raison de sa faible intensité par rapport à celle des composantes horizontales et des difficultés de son estimation *in situ*. L'intérêt croissant pour la dynamique à fines échelles lors de la dernière décennie a remis à l'ordre du jour le besoin d'informations directes sur cette composante verticale de vitesse. Les fines échelles océaniques (de 1 à 100 km pour une durée de vie de quelques jours à quelques mois) peuvent impliquer, par leurs interactions, une dynamique agéostrophique et tridimensionnelle [McWilliams 2016, Ferrari & Wunsch 2009, Capet *et al.* 2008], généralement associée à la présence de vitesses verticales, point critique pour la compréhension des échanges verticaux [Ferrari 2011]. Par conséquent, ces fines échelles jouent un rôle clef dans l'équilibre global des océans et, malgré leur faible intensité, impactent nettement des processus tels que le transfert vertical de sels nutritifs et l'export de carbone, fortement corrélés au changement climatique [Mahadevan 2016, Mc Gillicuddy 2016, Lévy *et al.* 2001]. Cependant, leur caractère éphémère complexifie leurs mesures *in situ*, qui sont néanmoins nécessaires pour mieux les comprendre et confirmer les prévisions des modèles et les observations par satellite.

La mesure *in situ* des vitesses verticales, d'intensité de plusieurs ordres de grandeur inférieure à celle des vitesses horizontales, représente un réel défi. L'approche la plus classique est l'estimation à l'aide de la version *Q-vector* de l'équation *omega* [Fiekas *et al.* 1994, Strass 1994], valable uniquement dans le cadre de l'approximation quasi-géostrophique. Les méthodes utilisant des ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*), en mouillage ou en profil (L-ADCP) sont quelquefois utilisées, principalement en présence de vitesses verticales importantes [Dickey 2003, Thurnherr 2011]. Les mesures issues des planeurs sous-marins (gliders) [Margirier *et al.* 2017, Fuda *et al.* 2013, Frajka-Williams *et al.* 2011, Merckelbach *et al.* 2010] évaluent la vitesse verticale par déviation de la vitesse verticale prédite par un modèle de vol. Un réseau de mouillages fixes avec une vitesse verticale dérivée de l'équation de densité non diffusive [Yu *et al.*, 2019] peut également approcher cette mesure, mais cette technique ne peut être employée dans une démarche lagrangienne, à partir d'un bateau guidé par une stratégie adaptative de suivi de masses d'eau. Récemment, les flotteurs dérivants de sub-surface ont montré des résultats prometteurs [Johnson *et al.* 2020].

Le projet FUMSECK-vv (FUMSECK – *vertical velocities*) collabore avec le programme international BioSWOT-AdAC soutenu par le CNES (PI F. d'Ovidio LOCEAN-IPSL, co-PIs A.M. Doglioli et G. Grégori MIO, S. Speich LMD), qui développe l'exploitation scientifique des observations du futur satellite SWOT (*Surface Water and Ocean Topography*, <https://swot.cnes.fr/>), en combinant l'océanographie physique et biogéochimique par des expériences interdisciplinaires *in situ* autour de la mission SWOT en 2022 [d'Ovidio *et al.* 2019].

La campagne FUMSECK (*Facilities for Updating the Mediterranean Submesoscale-Ecosystem Coupling Knowledge*, PI S. Barrillon, <https://doi.org/10.17600/18001155>), réalisée au printemps 2019 en mer Ligure [Barrillon *et al.* 2020], a servi de support pour tester diverses innovations technologiques pour l'étude de la dynamique à fines échelles, dans le cadre de la préparation à l'exploitation scientifique des observations du futur satellite en 2022, et en particulier à la campagne BioSWOT-Med au sud des Baléares. Plusieurs méthodes de mesure des vitesses verticales ont été exploitées, permettant d'acquérir un ensemble conséquent de données dont les premiers résultats sont très encourageants (C. Comby, stage M2 2020, https://people.mio.osupytheas.fr/~barrillon.s/Students/Rapport_Caroline_2020.pdf, publication en cours de préparation pour JAOT).

De plus, nous prévoyons le déploiement de nos instruments de mesure de vitesses verticales lors de plusieurs campagnes d'opportunité en Méditerranée entre 2020 et 2022. En collaboration avec le SHOM, nous participons aux campagnes PROTEVS 2020 Gibraltar et 2022 (PI F. Dumas). Trois autres campagnes (VVPTest 2020 PI J-L. Fuda, CALYPSO 2021 PI P. Testor, et BIOSWOT-Med 2022 PI A. Doglioli et G. Grégori) nous donneront l'opportunité de valider les différentes méthodologies de mesure de vitesses verticales et de tester les prototypes que nous développons.

FUMSECK-vv s'attaque à la mesure directe et *in situ* des vitesses verticales dans le cadre de la dynamique à fines échelles. Il s'articule autour de trois axes principaux : le développement instrumental, le déploiement des instruments lors de campagnes d'opportunité intéressées par la thématique, et l'analyse des données. Cette mesure représente une levée de verrou technologique, cruciale dans la compréhension des fines échelles et de leur couplage avec la biologie.

(7) Objectif général et questions de recherche traitées

La problématique complexe de la mesure des vitesses verticales dans le cadre de la dynamique à fines échelles représente le cœur du projet FUMSECK-vv. L'enjeu est le développement d'une méthode robuste de mesure directe des vitesses verticales *in situ* et son exploitation pour une compréhension approfondie des mécanismes en œuvre dans la dynamique à fines échelles. La levée de ce verrou apportera ainsi une contribution majeure à la connaissance de nos océans.

Ce projet de recherche, à la fois fondamental et appliqué, est placé dans un cadre de travail multidisciplinaire incluant la physique, la biologie et la chimie, et combine développement instrumental, campagnes océanographiques *in situ*, analyses de données *in situ*, et exploitation de données satellitaires.

FUMSECK-vv s'organise autour des questions scientifiques suivantes (correspondant aux *Working Packages* WP) :

- WP 1. Les vitesses verticales sont-elles mesurables directement et *in situ* ?** Quelle est la meilleure technologie à employer ? Quelle est la gamme de mesures accessible ?
→ développement instrumental, déploiement *in situ*, et analyse de données.
- WP 2. Quels sont les mécanismes physiques associés à ces vitesses verticales, dans le contexte des fines échelles ?**
→ guidage lagrangien des campagnes à l'aide des données satellite, mise en évidence *in situ*, interaction entre structures de fines échelles et vitesses verticales.
- WP 3. Quelle est l'influence des vitesses verticales sur les transferts verticaux ?**
→ inter-analyses des données de physique avec les données biogéochimiques, issues entre autres de la cytométrie en flux et d'expériences de diffusion, en lien avec le projet RETROMIC re-soumis à EC2CO.

FUMSECK-vv est complémentaire et en synergie avec deux projets acceptés lors de l'AO LEFE 2020 : le projet GEPETO (PI F. Auclair) et le projet COGNAC20 (PI A. Ponte). En effet, nous participons à la campagne PROTEVS 2020 Gibraltar, sur laquelle s'adosse le projet GEPETO dont la thématique est intrinsèquement liée aux vitesses verticales, et nous analyserons les données issues des Seasor/MVP et de l'ADCP Sentinel V50 afin d'en déduire les mesures de vitesses verticales. Nous collaborons également avec A. Ponte dans l'objectif d'un déploiement combiné de nos instruments respectifs pour une description détaillée de l'activité à fines échelles et des

vitesse verticale lors d'une campagne COGNAC ultérieure. Enfin, FUMSECK-vv est étroitement lié, au sein du MIO, avec le projet RETROMIC (PI G. Grégori, MIO) re-soumis à EC2CO, en particulier en ce qui concerne le WP 3 qui s'intéresse à la dynamique spatio-temporelle des micro-organismes marins auto- et hétérotrophes en présence de fines échelles, au moyen de l'observation haute fréquence (jusqu'à plusieurs fois par heure) par un nouveau modèle de cytomètre en flux automatisé développé conjointement par le MIO (plateforme de cytométrie PRECYM) et la société Cytobuoy (Pays-Bas).

(8) Plan de recherche, méthodologie et calendrier de réalisation

Ce projet est organisé sur une période de deux ans. La première année (2021) sera consacrée en grande partie à l'analyse des données recueillies lors des campagnes FUMSECK 2019 et PROTEVS 2020 Gibraltar, ainsi qu'au développement instrumental des nouveaux prototypes et à leur déploiement lors de la campagne CALYPSO 2021. Ensuite, lors de la deuxième année (2022), les données de la campagne CALYPSO seront analysées, tout en poursuivant le développement technologique des prototypes en laboratoire, avec un déploiement prévu lors des campagnes PROTEVS et BIOSWOT-Med en 2022. Nous réaliserons des tests *in situ* au large de Marseille, à bord du navire de station l'Antédon II (MIO), qui sera demandé à plusieurs reprises en 2021 et 2022, pour intervenir dans le golfe de Lion et sur le site JULIO (<https://people.mio.osupytheas.fr/~petrenko/julio.htm>), dont le mouillage va être remis à l'eau au printemps 2021.

Lors de la campagne FUMSECK (mai 2019, voir Figure 1 (a) et (b)), nous avons mis en œuvre des méthodes multiples et innovantes de mesure des vitesses verticales, l'idée principale étant de développer de nouvelles technologies et méthodologies à partir d'instruments et de méthodes connus.

L'objet du projet FUMSECK-vv est l'analyse et le développement approfondis de l'ensemble de ces méthodologies et instruments, afin d'en déduire la méthodologie la plus performante pour la mesure des vitesses verticales.

Le premier ensemble d'expériences que nous avons effectuées est basé sur des ADCP, allant de l'amélioration de la méthode d'analyse classique de mesures de l'ADCP de coque 75kHz du Téthys II (logiciel Cascade), à un déploiement de type nouveau, en chute libre, d'un L-ADCP 300kHz (FF-ADCP, *Free Fall* ADCP), et aux déploiements sur bathysonde d'un autre L-ADCP 300kHz et d'un nouveau Sentinel V50. Nous nous sommes, dans un premier temps, inspirés de la méthode L-ADCP en profil [Thurnherr 2011], que nous avons adaptée avec un déploiement à profondeur fixe et en profil, puis que nous avons étendue avec le Sentinel V50, dont la particularité est la présence d'un faisceau supplémentaire vertical pouvant fournir un écho directement associé à la vitesse verticale. Enfin, nous avons à nouveau modifié cette méthode pour un déploiement en chute libre (FF-ADCP) dans le but d'éliminer les mouvements du bateau. Les résultats obtenus (C. Comby, JAOT en préparation) sont montrés dans la figure 1 avec la comparaison des mesures en profils descendants pour la station 6 (c) et les moyennes et écarts-types obtenus pour toutes les méthodes et pour chacune des stations (d). Ces résultats encourageants montrent d'une part que les moyennes obtenues sont de l'ordre de quelques mm.s^{-1} et les écarts-types de l'ordre du cm.s^{-1} , et d'autre part que le déploiement le plus performant, que nous utiliserons dorénavant à chaque fois que cela sera possible, est le Sentinel V50 en chute libre.

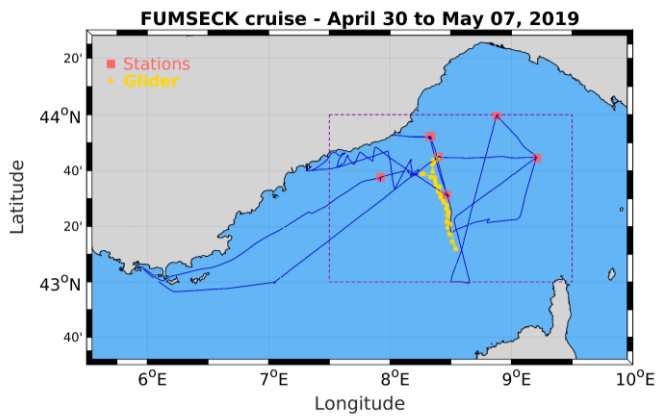
Nous avons également déployé le glider SeaExplorer du MIO afin d'obtenir les mesures de vitesses verticales en s'aidant du modèle de vol. Les résultats préliminaires, illustrés dans la figure 1 (e) (Y. Darchen, stage ingénieur, 2020), sont encourageants. Ce glider sera déployé lors des campagnes.

Par ailleurs, inspirés par les mesures issues des gliders, nous avons développé le prototype de profileur de vitesses verticales VVP (*Vertical Velocities Profiler*). Il s'agit d'un dispositif dont le principe est simple : il coule en chute libre puis remonte à la surface, en mesurant tout au long de son profil la pression et la densité de l'eau, déduite des mesures de température et de salinité. Toute déviation de la vitesse verticale prédite par son modèle de vol (équilibre mécanique entre poids dans l'eau et traînée hydrodynamique) pourra être interprétée comme une vitesse verticale. Un des éléments du VVP, très novateur, a abouti à un dépôt de brevet et une étude d'industrialisation (PI J-L. FUDA), financés par la SATT-Sud Est (Société d'Action du Transfert de Technologie). Les mesures issues du premier prototype déployé lors de FUMSECK, montrent que la qualité du capteur de pression utilisé n'était pas suffisante. Ainsi, lors du projet FUMSECK-vv, nous finaliserons le développement du prochain prototype, dont l'état actuel est montré dans la figure 1 (f), de façon à l'améliorer substantiellement en lui adjoignant une CTD de très bonne qualité (RBR Concerto, co-financement obtenu) et en ajoutant la possibilité d'effectuer de nombreux profils consécutifs au lieu d'un seul.

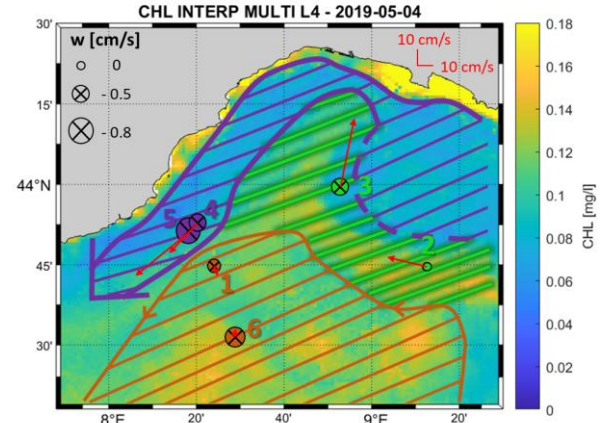
Enfin, nous comparerons ces mesures avec la méthode de l'équation *omega*, que nous avons utilisée auparavant [Rousselet et al., 2019], utilisant les données issues de l'ADCP de coque et du MVP (*Moving Vessel Profiler*).

Les premiers résultats très encourageants montrent néanmoins l'enjeu et la complexité des mesures de vitesses verticales, l'objectif idéal étant de réduire davantage les écarts-types, d'au moins un ordre de grandeur pour atteindre une précision satisfaisante, de l'ordre du $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ dans les conditions telles que rencontrées durant la campagne FUMSECK. En effet, les valeurs de vitesses verticales dépendent des échelles temporelles et spatiales des processus étudiés et sont d'autant plus faibles que les structures sont fines. Les structures de fines échelles, tels que des fronts ou des filaments, qui seront visées lors des campagnes en Méditerranée durant ce projet ne devraient guère montrer des vitesses verticales supérieures au $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$. Nous proposons de finaliser les analyses approfondies et les comparaisons des mesures de vitesses verticales provenant des différents instruments de mesure déployés durant FUMSECK 2019. Nous pourrions ainsi perfectionner les instruments qui seront exploités lors des campagnes d'opportunité (CALYPSO, PROTEVS) afin qu'ils soient prêts pour la campagne BioSWOT-Med 2022.

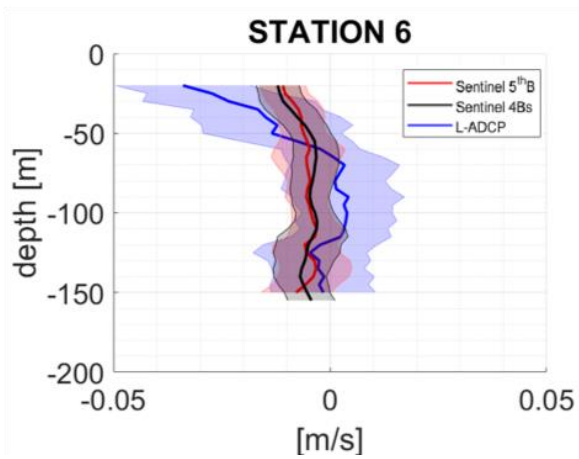
Par la suite, les analyses physiques concernant les mesures de vitesses verticales seront mises en relation, pour les campagnes en bénéficiant, avec les analyses biogéochimiques concernant la dynamique spatio-temporelle des micro-organismes marins [Stukel et al. 2017] et des expériences de diffusion de traceurs, afin de mieux caractériser le couplage entre physique et biologie marine pour la dynamique à fines échelles (co-financement BioSWOT-AdaC). Une zone de vitesse verticale dirigée vers le haut dans la colonne d'eau pourra par exemple correspondre à une zone en surface dont l'analyse par cytométrie met en évidence une prédominance d'un certain type de phytoplancton. En effet, les flux verticaux vers le haut peuvent signaler un apport continu de sels nutritifs issus des eaux profondes, et modifier suffisamment les conditions du milieu pour engendrer des structures de communautés différentes.



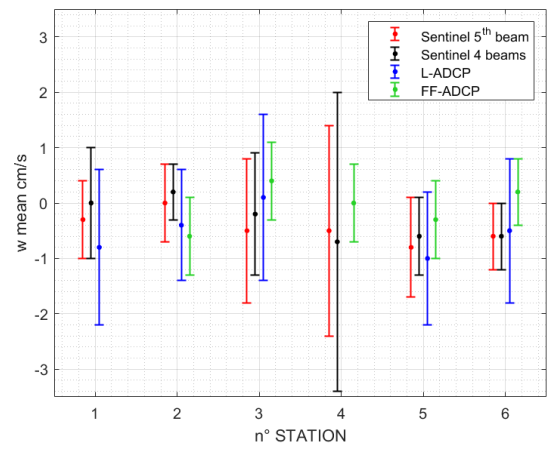
(a)



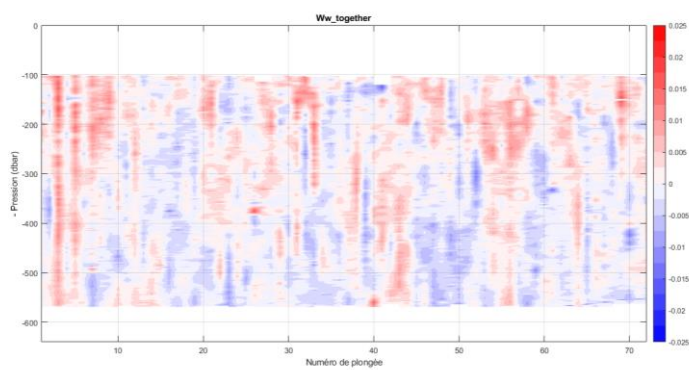
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figure 1 : FUMSECK. (a) Trajectoires du bateau et du glider, et stations vitesses verticales. (b) Stations avec les mesures des vitesses horizontales (flèches) et verticales (croix) moyennées sur les 150 premiers mètres, et circulation générale, superposée aux données de Chl-a satellite pour le 04 mai 2019. Moyennes et écart-types des mesures de vitesses verticales par ADCP : (c) sur bathysonde, en fonction de la profondeur, lors de la station 6 ; (d) sur bathysonde et en chute libre pour chacune des stations. (e) Vitesses verticales issues du glider, en $m.s^{-1}$. (f) Photo du prototype VVP en cours de développement.

Face au caractère éphémère des structures de fines échelles, notre groupe a développé un leadership dans leur suivi adaptatif en temps réel, afin de les échantillonner *in situ*. Pour ce guidage de la navigation lagrangienne des campagnes en mer, nous utilisons notre logiciel SPASSO (<http://www.mio.univ-amu.fr/SPASSO>) qui effectue des traitements en temps réel des produits CMEMS. L'équipe à terre (parfois multi-laboratoire) interprète les résultats et envoie ses recommandations journalières sur les trajets à effectuer et le choix des stations pour cibler des processus océaniques spécifiques [Petrenko *et al.* 2017, Doglioli *et al.* 2013]. Notre projet est ainsi en lien direct avec l'utilisation intensive des produits issus du CMEMS (*Copernicus Marine Environment Monitoring Service*).

Les différents WP se subdivisent comme suit :

WP 0 : Coordination du projet

WP 1 : Mesure *in situ* des vitesses verticales

- a. Analyse des données FUMSECK, VVPTest 2020, et PROTEVS Gibraltar 2020, présentations en conférence et publications (2021)
- b. Développement instrumental (2021-2022)
- c. Campagnes en mer Méditerranée (hiver 2021, printemps et été 2022, locales 2021-2022)
- d. Analyse des données des campagnes en mer Méditerranée, présentations en conférence et publications (2021-2022)

WP 2 : Fines échelles et vitesses verticales

- a. SPASSO : préparation en amont des campagnes, mise en fonctionnement opérationnel et guidage lagrangien des campagnes (2021, 2022)
- b. Inter-analyse de toutes les données collectées (2021-2022)

WP 3 : Couplage

- a. Inter-analyse données FUMSECK (2021)
- b. Inter-analyse données autres campagnes (2021-2022)

Le résumé du calendrier est exposé dans le tableau suivant :

<i>Working Points</i>	jan - juin 2021	juill - déc 2021	jan - juin 2022	juill - déc 2022
WP 0				
WP 1a				
WP 1b				
WP 1c	* X *	*	*	X X
WP 1d				
WP 2a				
WP 2b				
WP 3a				
WP 3b				

X = Campagnes en mer :

printemps 2021 CALYPSO, printemps 2022 PROTEVS, été 2022 BioSWOT-Med

* = Campagnes en mer locales

(9) Résultats attendus

L'enjeu est le développement de la meilleure méthode de mesure des vitesses verticales *in situ* et son exploitation pour une compréhension approfondie des mécanismes en œuvre dans la dynamique à fines échelles.

Les résultats attendus pour chaque WP sont les suivants :

WP 1 : obtention et validation d'une **méthode fiable, facilement déployable et peu onéreuse pour la mesure des vitesses verticales *in situ* dans la gamme du cm. s⁻¹ au mm. s⁻¹.**

WP 2 : **mise en évidence des fines échelles *in situ* et de leur lien avec les vitesses verticales, compréhension** des mécanismes en œuvre.

WP 3 : **quantification de l'influence de ces vitesses verticales sur les transferts verticaux** en fonction de leurs caractéristiques (durée, amplitude, fréquence, ...).

La connaissance de la vitesse verticale, par nature fondamentale, reste à l'heure actuelle un verrou technologique de taille, en particulier pour la dynamique à fines échelles. Sa levée apportera ainsi une contribution majeure à la connaissance physique de nos océans, bénéficiera à d'autres disciplines comme la biogéochimie, et participera à l'étude du changement global.

(10) Références bibliographiques principales des proposant

Le porteur du projet, ayant effectué un changement thématique complet en septembre 2017 depuis la physique des particules, n'a que trois publications dans la liste ci-dessous.

Barrillon S., Bataille H., Bhairy N., Comby C., Coulon T., Doglioli A., D'Ovidio F., Fuda J-L., Gregori G., Petrenko A., Ricout A., Rousselet L., Thyssen M., Tzortzis R. (2020). *FUMSECK cruise report*. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00636/74854/>

Bosse, A., Testor, P., Houpert, L., Damien, P., Prieur, L., Hayes, D., Taillandier, V., de Madron, X.D., d'Ortenzio, F., Coppola, L. and Karstensen, J. (2016). *Scales and dynamics of Submesoscale Coherent Vortices formed by deep convection in the northwestern Mediterranean Sea*, *J. Geophys. Res. Oceans*, 121, 7716– 7742, doi:10.1002/2016JC012144.

Bouffard, J., Nencioli, F., Escudier, R., Doglioli, A.M., Petrenko, A. A. , Pascual, A., Poulain, P.-M. (2014), *Lagrangian analysis of satellite-derived currents: Application to the North Western Mediterranean coastal dynamics*. *Adv. Space Res.* , doi: 10.1016/j.asr.2013.12.020

Bouruet-Aubertot, P., Y. Cuypers, H. Le Goff, G. Rougier, A. Verneuil, A. Doglioli, M. Picheral, C. Yohia, M. Caffin, D. Lefèvre, A. Petrenko, T. Moutin. (2018), *Longitudinal contrast in small scale turbulence along 20°S in the Pacific Ocean: origin and impact on biogeochemical fluxes*. *Biogeosciences Discuss*, doi:10.5194/bg-2018-170.

Campbell, R., Diaz F., Hu, Z.Y., Doglioli, A.M., Petrenko, A. A., Dekeyser, I. (2013), *Nutrients and plankton spatial distributions induced by a coastal eddy in the Gulf of Lion*. *Insights from a numerical model*. *Progr. Oceanogr.*, Vol.109, pp.47-69, doi: 10.1016/j.pocean.2012.09.005.

X. Capet, J.C. McWilliams, M.J. Molemaker and A.F. Shchepetkin, (2008). *Mesoscale to Submesoscale Transition in the California Current System*. *J. Phys. Ocean.*, 38. (Part 1: 29-43, Part 2 : 44-64, Part 3 : 2256-2269)

Cyr, F., Tedetti, M., Besson, F., Beguery, L., Doglioli, A.M., Petrenko, A., Goutx, M. (2017). *A new glider-compatible optical sensor for dissolved organic matter measurements: test case from the NW Mediterranean Sea*. *Front. Mar. Sci.*, 4:89, doi:10.3389/fmars.2017.00089.

de Verneil A., Rousselet, L., **Doglioli, A.M., Petrenko, A.A., Moutin, T.** (2017). *The Fate of a Southwest Pacific Bloom: Gauging the impact of submesoscale vs. mesoscale circulation on biological gradients in the subtropics.* Biogeosciences Discuss., doi:10.5194/bg-2017-84.

Doglioli, A.M., Nencioli, F., Petrenko, A.A., Fuda, J.-L., Rougier, G., Grima, N. (2013). *A software package and hardware tools for in situ experiments in a Lagrangian reference frame.* J. Atmos. Ocean. Tech., 30, 1945-1950, doi:10.1175/JTECH-D-12-00183.1.

d'Ovidio, F., Pascual, A., Wang, J., Doglioli, A.M., Jing, Z., Moreau, S., Gregori, G., Swart, S., Speich, S., Cyr, F., Légresy, B., Chao, Y., Fu, L., Morrow, R. (2019), *Frontiers in fine scale in-situ studies: opportunities during the SWOT fast sampling phase,* Front.Mar.Sci. 6:168. doi:10.3389/fmars.2019.00168

d'Ovidio, F., A. Della Penna, T. W. Trull, F. Nencioli, I. Pujol, M. H. Rio, Y.-H. Park, C. Cotté, M. Zhou, and S. Blain (2015). *The biogeochemical structuring role of horizontal stirring: Lagrangian perspectives on iron delivery downstream of the Kerguelen plateau,* Biogeosciences Discuss., 12, 779-814,

d'Ovidio, F., S. De Monte, S. Alvain, Y. Danonneau, and M. Lévy (2010). *Fluid dynamical niches of phytoplankton types,* PNAS, 107, 18366-18370

Fuda J-L, F.Marin, F.Durand, T.Terre, (2013) *Diagnosing ocean vertical velocities off New Caledonia from a SPRAY glider.* Geophysical Research Abstracts Vol. 15, EGU2013-9721.

Fumenia, A., **A. Petrenko, H. Loisel, K. Djaoudi, A. de Verneil and T. Moutin** (2020). *Optical proxy for particulate organic nitrogen from BGC-Argo floats,* Optics Express, doi:10.1364/OE.395648

C. Guieu, F. D'Ortenzio, F. Dulac, V. Taillandier, **A. Doglioli, A. Petrenko, S. Barrillon, M. Mallet, P. Nabat, K. Desboeufs** (2020), *Process studies at the air-sea interface after atmospheric deposition in the Mediterranean Sea : objectives and strategy of the PEACETIME oceanographic campaign (May-June 2017),* accepted by Biogeosciences, doi :10.5194/bg-2020-44

Guieu C., Bonnet S., **Petrenko, A.A.,** Menkes C., Chavagnac V., Desboeufs K., Louis J., Moutin T. (2018). *Iron from a submarine source impacts the productive layer of the Western Tropical South Pacific (WTSP).* Nature Scientific Reports, doi:10.1038/s41598-018-27407-z.

Kersalé, K., **Petrenko, A.A., Doglioli, A.M., Nencioli, F.,** Bouffard, J., Blain, S., Diaz, F., Labasque, T., Quéguiner, B., Dekeyser, I. (2016), *Diffusivity coefficients from the dynamics of a SF6 patch in a coastal environment.* J. Marine Syst., 2. 153, 42-54, doi:10.1016/j.jmarsys.2015.

Levy, M., O. Jahn, S. Dutkiewicz, M. J. Follows and **F. d'Ovidio** (2015). *The dynamical landscape of marine phytoplankton diversity.* Royal. Soc. Interface, 12: 20150481

F. Margirier, **A. Bosse, P. Testor, B. L'Hévéder, L. Mortier, and D. Smeed** (2017). *Characterization of convective plumes associated with oceanic deep convection in the northwestern mediterranean from high-resolution in situ data collected by gliders.* Journal of Geophysical Research: Oceans, (122):9814-9826. doi: 10.1002/2016JC012633.

Marrec, P., **Grégori, G., Doglioli, A.M.,** Dugenne, M., Della Penna, A., Bhairy, N., Cariou, T., Helias Nunige, S., Lahbib, S., Rougier, G., Wagener, T., Thyssen M. (2018). *Coupling physics and biogeochemistry thanks to high resolution observations of the phytoplankton community structure in the North-Western Mediterranean Sea.* Biogeosciences., doi:10.5194/bg-2017-343.

Meloni, M., Bouffard, J., **Doglioli, A.M., Petrenko, A.A.,** Valladeau, G. (2019). *Toward science-oriented validations of coastal altimetry: application to the Ligurian Sea.* Remote Sens.Envir., 224, 275-288, doi:10.1016/j.rse.2019.01.028.

Messié, M., **Petrenko, A.A., Doglioli, A.M.,** Aldebert, C., Martinez, E., Koenig, G., Bonnet, S., Moutin, T. (2020). *The Delayed Island Mass Effect: how islands can remotely trigger blooms in the oligotrophic ocean.,* Geophys.Res.Lett., 46, doi:10.1029/2019GL085282.

Nencioli, F., d'Ovidio, F., Doglioli, A.M., Petrenko, A.A. (2013). *In-situ estimate of submesoscale horizontal eddy diffusivity across an ocean front.* J. Geophys. Res. (+ EOS Spotlight + 2 figures selected for the JGR - Oceans featured Image Carousel) Vol.118, 12, pp. 7066-7080, doi: 10.1002/2013JC009252.

Nencioli, F., d'Ovidio, F., Doglioli, A.M., Petrenko, A. A. (2011), *Surface coastal circulation patterns by in-situ detection of Lagrangian Coherent Structures.* Geophys. Res. Lett., Vol.38, L17604, doi:10.1029/2011GL048815

P L'Hégaret, X Carton, S Louazel, G Boutin (2011). *Mesoscale eddies and submesoscale structures of Persian Gulf Water off the Omani coast in spring 2011*. Ocean Science 12 (3)

Petrenko, A.A., Doglioli, A.M., Nencioli, F., Kersalé, M., Hu, Z., d'Ovidio, F. (2017). *A review of the LATEX project: mesoscale to submesoscale processes in a coastal environment*. Ocean Dynam., doi: 10.1007/s10236-017-1040-9.

Rousselet L., Doglioli, A.M., de Verneil, A., Pietri, A., Della Penna, A., Berline, L., Marrec, P., Gregori, G., Thyssen, M., Carlotti, F., Barrillon, 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, doi:10.1029/2018JC014392.

Rousselet, L., De Verneil, A., Doglioli, A., Petrenko, A.A., Duhamel, S., Maes, C., Blanke, B. (2018). *Large to submesoscale surface circulation and its implications on biogeochemical/biological horizontal distributions during the OUTPACE cruise (SouthWest Pacific)*. Biogeosciences Discuss., doi:10.5194/bg-2017-456.

Rousselet, L., Doglioli, A.M., Maes, C., Blanke, B., Petrenko, A.A. (2016). *Impacts of mesoscale activity on the water masses and circulation in the Coral Sea*. J. Geophys. Res. Oceans, 121, 7277-7289, doi:10.1002/2016JC011861.

(11) Participation effective, prévue ou envisageable à d'autres programmes de recherche régionaux, nationaux et européens sur les mêmes problématiques

Ce projet, ainsi qu'une partie importante des participants, s'inscrit dans le programme international BioSWOT-AdAC (2020-2023, <https://swot.jpl.nasa.gov/project-bioswot.htm>), dont l'objectif est le couplage entre l'océanographie physique et biogéochimique par des expériences interdisciplinaires *in situ* autour de la mission SWOT (<https://swot.cnes.fr/>) en 2022. En particulier, les instruments de mesure de vitesses verticales seront déployés lors de BioSWOT-Med dans le sud des Baléares pendant la phase d'échantillonnage rapide de SWOT.

Nous participons également au projet IMIS (PI M. Thyssen, 2020-2021), soumis à la Région Sud, qui permettrait un financement pour l'acquisition de l'ADCP Sentinel V50.

D'autre part, ce projet est complémentaire et en synergie avec les programmes LEFE GEPETO et COGNAC, et le projet EC2CO RETROMIC.

(12) Compléments

Il est à noter que les logiciels développés dans le cadre du projet seront mis à la disposition de la communauté, comme ceux du projet LATEX (LATEXtools, Doglioli *et al.* 2013; Petrenko *et al.* 2017; <https://www.mio.osupytheas.fr/fr/dynamique-oceanique/latex-une-strategie-adaptative-de-navigation-lagrangienne>), ou le package SPASSO [Petrenko *et al.*, 2017, d'Ovidio *et al.* 2015, Nencioli *et al.*, 2011] (<http://www.mio.univ-amu.fr/SPASSO>). Les données seront également à disposition de la communauté, dans la mesure du possible.

Autres références bibliographiques citées dans ce projet :

Dickey, T. D. (2003). *Emerging ocean observations for interdisciplinary data assimilation systems*. Journal of Marine Systems, 40, 5-48. doi: 10.1016/S0924-7963(03)00011-3

Ferrari, R. (2011). *A frontal challenge for climate models*. Ocean science 332, 316–317. doi: 10.1126/science.1203632

Ferrari, R., and Wunsch, C. (2009). *Ocean circulation kinetic energy: reservoirs, sources, and sinks*. Annu. Rev. Fluid Mech. 41, 253–282. doi: 10.1146/annurev.fluid.40.111406.102139

- Fiekas, V., H. Leach, K. Mirbach and J. WOOD S. (1994). *Mesoscale instability and upwelling. Part 1 : Observations at the North Atlantic intergyre front*, *J. Phys. Oceanogr.*, vol. 24, no8, p. 1750–1758.
- Frajka-Williams, E., C.C. Eriksen, P.B. Rhines, and R.R. Harcourt (2011). *Determining Vertical Water Velocities from Seaglider*. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 28, 1641–1656, <https://doi.org/10.1175/2011JTECH0830.1>
- Johnson, L., C. M. Lee, E. A. D’Asaro, L. Thomas, and A. Shcherbina, 2020: Restratification at a California Current Upwelling Front. Part I: Observations. *J. Phys. Oceanogr.*, **50**, 1455–1472, <https://doi.org/10.1175/JPO-D-19-0203.1>
- Lévy, M., Klein, P., and Treguier, A. M. (2001). *Impact of sub-mesoscale physics on production and subduction of phytoplankton in an oligotrophic regime*. *J. Mar. Res.* 59, 535–565. doi: 10.1357/002224001762842181
- Mahadevan, A. (2016). *The impact of submesoscale physics on primary productivity of plankton*. *Annu. Rev. Mar. Sci.* 8, 161–184. doi: 10.1146/annurev-marine-010814-015912
- McGillicuddy Jr.D.J, (2016). *Mechanisms of Physical-Biological-Biogeochemical Interaction at the Oceanic Mesoscale*. *Annual Review of Marine Science*, 8, 125-159.
- McWilliams, J. C. (2016). *Submesoscale currents in the ocean*. *Proc. R. Soc. A* 472:20160117. doi:10.1098/rspa.2016.0117
- Merckelbach, Lucas, David Smeed, and Gwyn Griffiths (2010). *Vertical water velocities from underwater gliders*. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 27(3), 547-563
- Strass, V. H. (1994). *Mesoscale instability and upwelling. Part 2 : Testing the diagnostics of vertical motion with a three-dimensional ocean front model*, *J. Phys. Oceanogr.*, vol. 24, no8, p. 1759–1767.
- Stukel, M. R., L. I. Aluwihare, K. A. Barbeau, A. M. Chekalyuk, R. Goericke, A. J. Miller, M. D. Ohman, A. Ruacho, H. Song, B. M. Stephens and M. R. Landry (2017). *Mesoscale ocean fronts enhance carbon export due to gravitational sinking and subduction*. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 114 (6), 1252{1257, doi:10.1073/pnas.1609435114.
- A. M. Thurnherr, (2011). *Vertical velocity from LADCP data*. 2011 IEEE/OES 10th Current, Waves and Turbulence Measurements (CWTM), Monterey, CA, pp. 198–204. doi: 10.1109/CWTM.2011.5759552
- Shapiro, H. M. (1988). *Practical flow cytometry*. New York, Alan R. Liss, Inc.
- Yu X., A. C. N. Garabato, A.P. Martin, C.E. Buckingham, L. Brannigan and Z. Su (2019). *An Annual Cycle of Submesoscale Vertical Flow and Restratification in the Upper Ocean*. *J. Phys. Ocean.*, 49, No. 6, 1439-1461. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-18-0253.1>