Analyse des données de vitesses verticales

Campagne Océanographique BioSWOT-MED 2023

Chloé LEFEVRE

L3 SVT parcours Mer, spécialité physique et biogéochimie

Maître de Stage: Stéphanie Barrillon

Stage réalisé du 18 avril au 17 mai 2024

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier ma maître de stage Stéphanie Barrillon, pour m'avoir fait confiance tout au long de ce mois et m'avoir permis de réaliser mon premier stage en Océanographie physique. Ses conseils sur la compréhension des données de la campagne BioSWOT-MED et sur la réalisation de mon rapport de stage m'ont été très précieux.

Je tiens également à remercier grandement Caroline Comby, Maxime Arnaud et Anne Petrenko, pour m'avoir épaulée, aidée, conseillée tout au long de ce mois et aiguillée lors de l'élaboration de mes scripts. Merci à toutes pour cette belle opportunité.

Résumé

Durant ce stage, j'ai effectué l'analyse des données de vitesses verticales des courants marins mesurées avec deux instruments innovants, le FF-ADCP et VVP, durant la campagne océanographique BioSWOT-MED. Cette campagne s'est déroulée du 20 avril 2023 au 15 mai 2023 dans le bassin Ouest de la Mer Méditerranée. La première étape de l'analyse concerne l'adaptation des scripts matlab en langage python pour interpréter et visualiser les mesures faites par les deux instruments, indépendamment. La deuxième étape consiste à analyser ces données afin de les inter valider et distinguer les différents processus mesurés par les deux méthodologies.

Abstract

During this internship, I analyzed the vertical velocity data of ocean currents measured by two innovative instruments, the FF-ADCP and the VVP, during the BioSWOT-MED cruise. This cruise took place from April 20, 2023 to May 15, 2023 in the western basin of the Mediterranean Sea. The first step of the analysis concerns the adaptation of matlab scripts in python, to interpret and visualize the measurements performed by the two instruments. The second step consists of analyzing these data in order to cross validate them and to distinguish the different processes measured by the two methodologies.

Table des matières

1. Introduction

1.1 Les vitesses verticales dans l'océan

1.2 La campagne océanographique Bio-SWOT MED

2. Matériel et Méthodes

2.1 Les zones d'études

2.1.1 Le FF-ADCP

2.1.1 Le VVP

2.2 Le traitement des données

3. Résultats/Discussion

3.1 Les vitesses verticales

3.2 Comparaison des vitesses entre FF-ADCP et VVP

4. Conclusion et perspectives

1. Introduction

1.1 Les vitesses verticales dans l'océan

Les composantes horizontales des courants océaniques sont généralement bien connues, mais leurs composantes verticales sont encore fortement indéterminées, ayant longtemps été simplement paramétrées ou négligées. En effet, de faible intensité (au maximum quelques $mm.s^{-1}$), les vitesses océaniques verticales sont souvent qualifiées de "non mesurables" in situ. Néanmoins, elles sont présentes partout et sont importantes dans la compréhension de la dynamique océanique et de ses impacts physiques ou biogéochimiques. Une meilleure connaissance des vitesses verticales permettrait en effet d'approfondir les connaissances sur la biogéochimie, en obtenant de meilleures connaissances des échanges sur la colonne d'eau (transport vertical des nutriments, pompe biologique du carbone). L'équipe OPLC de l'Institut Méditterannéen d'Océanologie a développé au cours de ces dernières années des instruments et méthodes innovants de mesure des vitesses verticales in situ.

1.2 Campagne océanographique BioSWOT-MED 2023

La campagne océanographique BioSWOT-MED (https://doi.org/10.17600/18002392) s'est déroulée du 20 avril au 15 mai 2023 en Méditerranée aux alentours de l'île de Minorque. Cette campagne interdisciplinaire visait à acquérir de nombreuses données permettant une meilleure compréhension du couplage physique-biologie, en particulier à fine échelle (méso ou subméso, de 1 à 100 km, de quelques jours à quelques semaines). L'étude de la dynamique à fines échelles est aujourd'hui facilitée par le satellite SWOT (*Surface Water and Ocean Topography*), lancé le 16 décembre 2022, qui mesure la hauteur de l'eau avec une résolution spatiale inédite. La campagne BioSWOT-MED a été réalisée au niveau d'un des croisements de trajectoire du satellite durant sa phase de *fast sampling*, permettant une résolution journalière des données de SWOT. La combinaison de ces données et des mesures in situ de biologie, biogéochimie, physique et chimie, permettra une meilleure compréhension du couplage biologie-physique dans la dynamique à fines échelles.

Dans le cadre de la campagne BioSWOT-MED 2023, l'équipe OPLC a déployé deux dispositifs innovants pour mesurer les vitesses verticales :

- Le FF-ADCP (Free-Fall Acoustic Doppler Current Profiler) : ADCP en chute libre
- Le VVP (Vertical Velocity Profiler)

Les données de vitesses verticales ainsi obtenues m'ont permis de réaliser un stage de 4 semaines avec Mme Stéphanie Barrillon, sur l'analyse et la comparaison des données du FF-ADCP et du VVP.

2. Matériel et Méthodes

2.1 Les zones de mesure

Durant la campagne océanographique, deux instruments destinés à la mesure des vitesses verticales océaniques ont été déployés lors de 9 stations : A1, A2, B1, B2, B3, F1, F2, M1, M2 (Fig. 1). La répartition de ces stations sur la zone d'étude à permis de mesurer les vitesses verticales dans deux masses d'eau différentes autour d'une zone frontale : les zones A et B présentent des masses volumiques distinctes et la zone F représente la zone de front entre ces deux zones. La zone M est localisée au sud de l'île de Minorque, où le navire est allé s'abriter lors de conditions météorologiques défavorables aux précédentes zones énoncées.

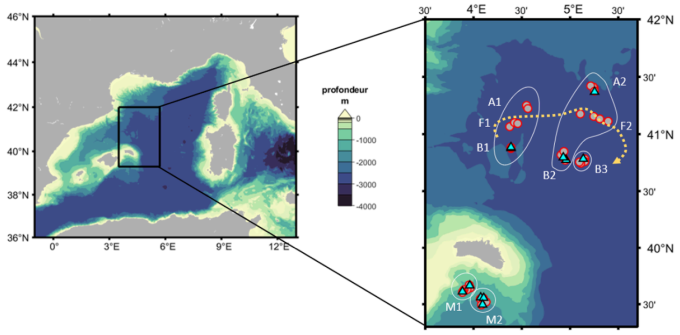


Figure 1 : Carte bathymétrique localisant les différentes stations de la campagne BioSWOT-MED issue de la thèse de C. Comby (2023).

2.1.1 Le FF-ADCP

Un ADCP permet de mesurer les courants océaniques à l'aide d'ondes acoustiques et de l'effet Doppler. Le FF-ADCP est l'association d'un ADCP avec une méthodologie de mesure en chute libre. Cet instrument innovant a été développé au sein de l'Institut Méditterranéen d'Océanologie par l'équipe OPLC. Déployer un ADCP en chute libre permet de minimiser les bruits et rappels lors de la mesure de la vitesse verticale. En effet, les vitesses verticales océaniques, très faibles, étant difficilement mesurables, les perturbations sur l'axe vertical conduisent à de grandes erreurs lors de l'enregistrement des vitesses par l'instrument. Durant la campagne Océanographique BioSWOT-MED, l'ADCP utilisé était un ADCP de nouvelle génération avec 5 faisceaux (Fig 2a), permettant de mesurer directement la composante verticale de la vitesse à l'aide du faisceau vertical ajouté.

Lors de sa chute, le FF-ADCP est relié au bateau par un câble polypropylène flottant, dévidé plus rapidement que la chute, permettant ainsi une indépendance vis-à-vis du mouvement du navire, et une stabilité de l'instrument sur le plan horizontal, et surtout sur le plan vertical (Fig. 2b). Après sa chute, il est remonté à la surface pour être ensuite relâché et effectuer une nouvelle plongée. Un total de 39 casts (2 à 10 plongées par cast) a été réalisé à différents moments de la journée: le matin, l'après-midi, le soir et la nuit.

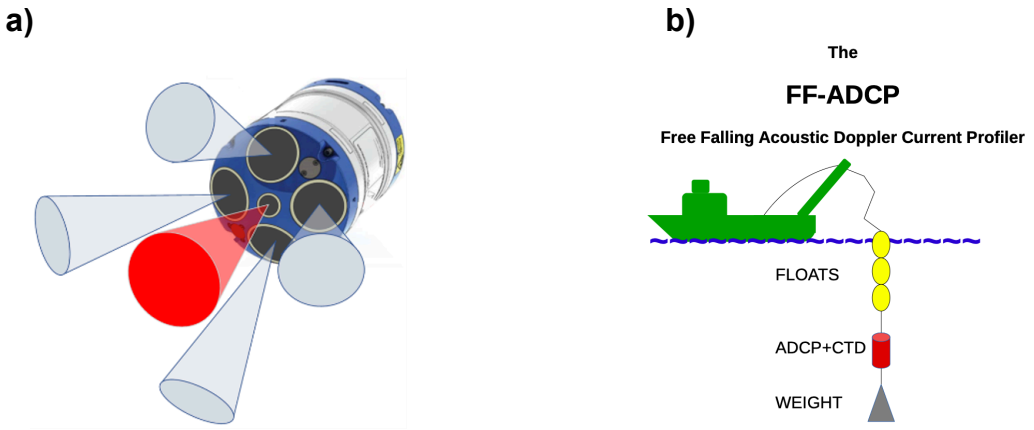


Figure 2 : a) Image RDI représentant les 5 faisceaux du FF-ADCP modifié par C. Comby (2020).
b) Schéma illustrant le déploiement du FF-ADCP in situ, réalisé par A. Doglioli lors de la campagne océanographique FUMSECK 2019.

2.1.2 Le VVP

Développé par l'Institut Méditerrannéen d'Océanologie, sur une idée de J.L Fuda, le VVP (Fig. 3) est un profileur autonome permettant de mesurer les vitesses verticales à fines échelles. Ce dernier effectue de manière autonome une série de descentes et ascensions à une profondeur et un temps prédéfinis (200 m et environ 7h pour BioSWOT-MED). Le VVP est équipé d'une sonde CTD (Conductivity Temperature Depth) et d'un traceur GPS, permettant de mesurer sa vitesse de chute et les caractéristiques de la masse d'eau environnante, ainsi que de le positionner. Il descend à sa profondeur de consigne grâce à une carte Arduino contrôlant une hélice. Il remonte librement à une vitesse d'environ 10 $cm.s^{-1}$. La vitesse océanique (Woc) est mesurée lors de la remontée libre grâce à la relation $Woc = Wr - Wth$ où Wr représente la vitesse verticale mesurée de l'instrument et Wth sa vitesse théorique calculée à l'aide du modèle de vol avec un courant nul. En effet, un courant ascendant accélère le VVP par rapport à sa vitesse nominale, et inversement. Les vitesses verticales océaniques mesurées par le VVP présentées dans ce rapport sont issues du dernier modèle de vol calculé à l'aide des données de l'ensemble de la campagne.

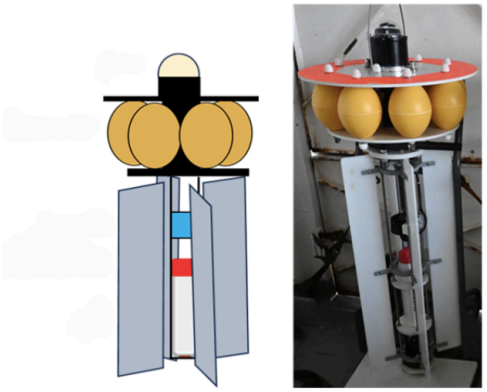


Figure 3 : Schéma d'un VVP issu de la thèse de C. Comby (2023) (à gauche) et photographie d'un VVP prise lors de la campagne BioSWOT-MED par C. Comby (à droite).

2.2 Le traitement de données

L'analyse des données VVP et FF-ADCP a été réalisée à l'aide du logiciel de programmation Python. Ainsi, la première étape de ce stage a été de transcrire les codes Matlab de S. Barrillon en langage python (Annexe 1). Les données du FF-ADCP et du VVP ne partagent pas les mêmes dimensions et échelles de temps. En effet, le FF-ADCP mesure les vitesses verticales océaniques de 0 à 250 m en moyenne en quelques minutes avec une résolution verticale de 5 m, alors que le VVP réalise une mesure de vitesse tous les de 0.05 m de profondeur pour une durée de remontée entre 200 et 0 m d'environ 30 min. Pour comparer les données des deux dispositifs de mesures, il a donc fallu que j'adapte la dimension et la structure des données afin d'obtenir des séries temporelles permettant de comparer les profils verticaux.

3. Résultats et discussions

3.1 Les vitesses verticales

Lors de la campagne BioSWOT-MED, 191 profils ont été établis par le FF-ADCP pour 38 stations, et 50 profils ont été établis par le VVP pour 11 stations. Hormis le fait que le temps d'échantillonnage moyen d'une station est différent pour les deux instruments (environ 45 min pour le FF-ADCP et 7h pour le VVP), l'analyse des données à permis d'observer que les valeurs de vitesses verticales océaniques oscillent en moyenne entre -0.036 et 0.024 $m.s^{-1}$ pour les deux dispositifs de mesures. Ces résultats confirment l'ordre de grandeur petit attendu pour les vitesses verticales (10^{-3} à 10^{-2} $m.s^{-1}$) et illustrent la difficulté de leur mesure. L'analyse des vitesses verticales de la campagne BioSWOT-MED a permis d'identifier certains paramètres qui influencent la direction et l'intensité de la vitesse verticale du courant. En effet, les casts réalisés à différents moments de la journée montrent que la variabilité journalière influence les vitesses verticales océaniques : le jour (matin et après-midi), la valeur des vitesses verticales est très proche de 0 et reste homogène sur la journée, tandis que la nuit, la valeur tend à être négative. Cette tendance s'explique par la présence d'un signal biologique fort la nuit (migration nycthémérale), impactant ainsi la mesure de la vitesse verticale.

3.2 Comparaison des vitesses entre FF-ADCP et VVP

La comparaison des profils temporels de FF-ADCP et VVP nous a permis d'observer que les vitesses verticales océaniques sont du même ordre de grandeur pour les deux dispositifs. Cette comparaison est illustrée par la Fig 4 pour trois stations de type A (A2C36), B (B1C14 et B1C16) et M (M1C21). L'annexe 2 regroupe tous les profils temporels de mesures de vitesses verticales du VVP et du FF-ADCP pour toutes les stations pour lesquelles les deux mesures ont été effectuées. Or, la fréquence et la durée d'échantillonnage des deux dispositifs est différente, comme l'illustre la Fig. 4, donc la nature des signaux enregistrés par les deux instruments peut également être différente. La technique de l'ADCP, dont les ondes sonores sont renvoyées par les particules dans l'eau, est sensible aux signaux biologiques (zooplancton présent dans l'eau). Le VVP ne devrait pas y être sensible. Néanmoins, les mesures de vitesses verticales par VVP de la station B1C16 (Fig 4.b), pourraient remettre en doute cette hypothèse. En effet, on observe au cours des 4 remontées du VVP, la présence de vitesses verticales négatives entre 100 et 120 m de profondeur, comme pour le FF-ADCP dont l'interprétation est la présence de biologie (remontée nycthémérale).

La comparaison des séries temporelles concomitantes entre le FF-ADCP et le VVP (Fig 5 pour les même stations choisies de type A, B et F), nous permet d'observer une compatibilité (accord entre VVP et FF-ADCP pour les points de croisements) pour les stations A2C36 et B1C14 et une certaine incompatibilité pour B1C16 et M1C21, des vitesses verticales entre les deux dispositifs. Pour la station B1C14, les vitesses verticales enregistrées par le FF-ADCP témoignent d'une forte négativité (-0.06 m/s) entre 50 et 100 m, alors que les vitesses mesurées par le VVP ne sont que de l'ordre de -0.01 $m.s^{-1}$. Néanmoins, la tendance des deux dispositifs à mesurer des vitesses verticales océaniques qui varient plus ou moins de la même manière sur la colonne d'eau, répond aux attentes de la campagne océanographique BioSWOT-MED.

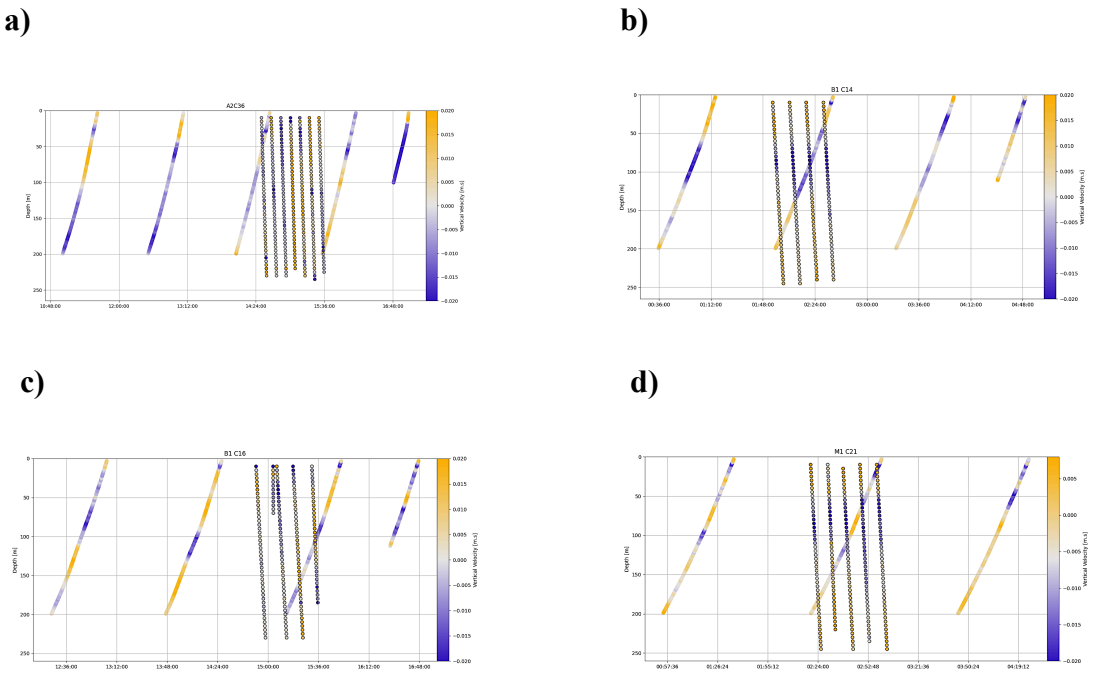


Figure 4 : Séries temporelles des mesures de vitesses verticales en fonction de la profondeur par le VVP (profils montants) et par le FF-ADCP (valeurs dans les cercles noirs, profils descendants) des stations A2C36, B1C14, B1C16, M1C21.

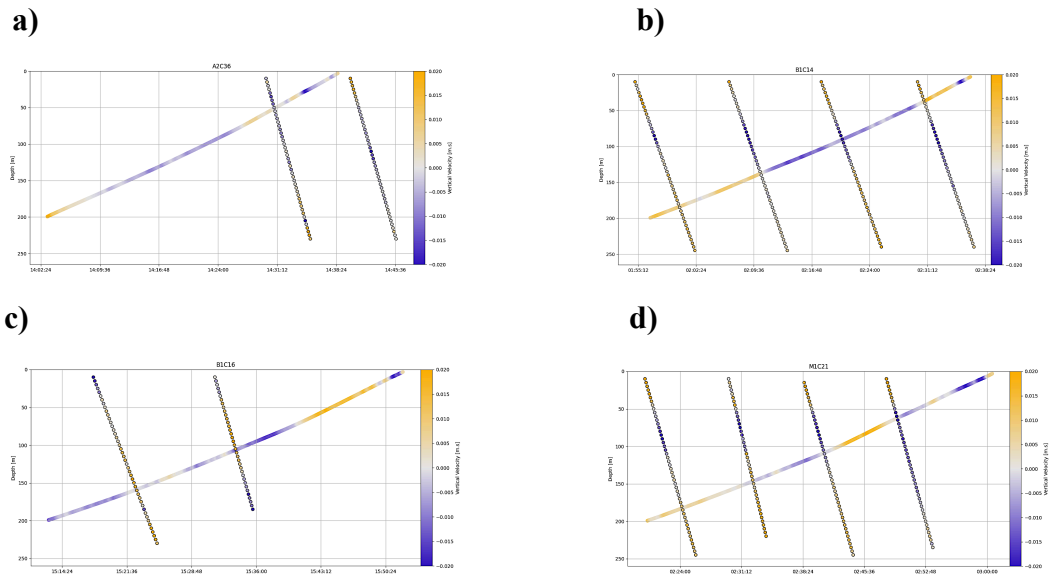


Figure 5 : Séries temporelles des mesures de vitesses verticales en fonction de la profondeur par le VVP (profils montants) et par le FF-ADCP (valeurs dans les cercles noirs, profils descendants) des stations A2C36, B1C14, B1C16, M1C21, pour les profils avec les deux instruments concomitants.

La dernière étape de ce stage a été la comparaison bi-dimensionnelle (vitesse, profondeur) des vitesses verticales mesurées par le FF-ADCP et VVP concomitantes (Fig 6, pour toutes les stations avec des mesures concomitantes). Établir les profils verticaux a permis une visualisation supplémentaire de l'inter compatibilité de certaines stations, en s'affranchissant de l'évolution temporelle.

Pour les stations A2C36, B2C26, M2C44 et B3C45, toutes échantillonnées de jour, les profils sont très similaires entre le VVP et le FF-ADCP. La variabilité entre profils la plus importante est observée pour la station B2C26, les mesures restant compatibles entre elles. Les stations B1C14 et M1C21, échantillonnées de nuit, montrent une différence entre les profils FF-ADCP et VVP, les profils FF-ADCP enregistrant des signaux biologiques de vitesse négative intense (jusqu'à -6 cm/s) entre 50 et 150 m alors que les profils VVP restent entre -1 et 1 $cm.s^{-1}$. Il est intéressant de noter, comme observé dans la première partie, que pour la station B1C14, le VVP enregistre également une vitesse verticale négative entre 50 et 150 m, alors qu'elle oscille autour de 0 pour la M1C21.

Pour les stations B1C16, M1C23, et M2C40, toutes de jour, on observe une différence entre le profil VVP et les profils FF-ADCP. En effet, la vitesse verticale océanique de la station M1C23 mesurée par le VVP est de signe opposé avec celle du FF-ADCP, sur l'ensemble du profil à partir de 30 m. Ce résultat est d'autant plus inattendu car la vitesse verticale mesurée par le VVP est içi de l'ordre de -0.02 $m.s^{-1}$ à 40 m de profondeur et qu'aucune autre station ne présente une vitesse verticale aussi négative sur l'ensemble de son profil pour le VVP. La station B1C16 montre également une vitesse verticale négative mesurée par le VVP entre 80 et 130 m, non mesurée par le FF-ADCP qui reste proche de 0. Cet effet est également visible, quoique moins intense, à la station M2C40 entre 100 et 180 m. La détection d'un signal biologique assez conséquent est peu probable, étant donné l'heure à laquelle cette station a été échantillonnée (entre 12h et 17h). Mettre au point un filtrage des effets biologiques dans les enregistrements du FF-ADCP pour obtenir les processus physiques permettra une meilleure comparaison des deux dispositifs à l'avenir. Néanmoins, cette comparaison restera limitée, du fait que les deux dispositifs ne détectent pas les mêmes signaux lors de leurs plongées. Le FF-ADCP qui chute à une vitesse de 0.5 à 0.7 $m.s^{-1}$, détecte de ce fait des signaux plus rapides que le VVP, qui remonte à une vitesse de l'ordre de 10 $cm.s^{-1}$. Une analyse poussée de ces mesures est en cours de réalisation par Maxime Arnaud (thèse) en particulier pour l'identification des signaux biologiques, en utilisant les données de l'ADCP (intensité de rétrodiffusion) et le l'échosondeur.

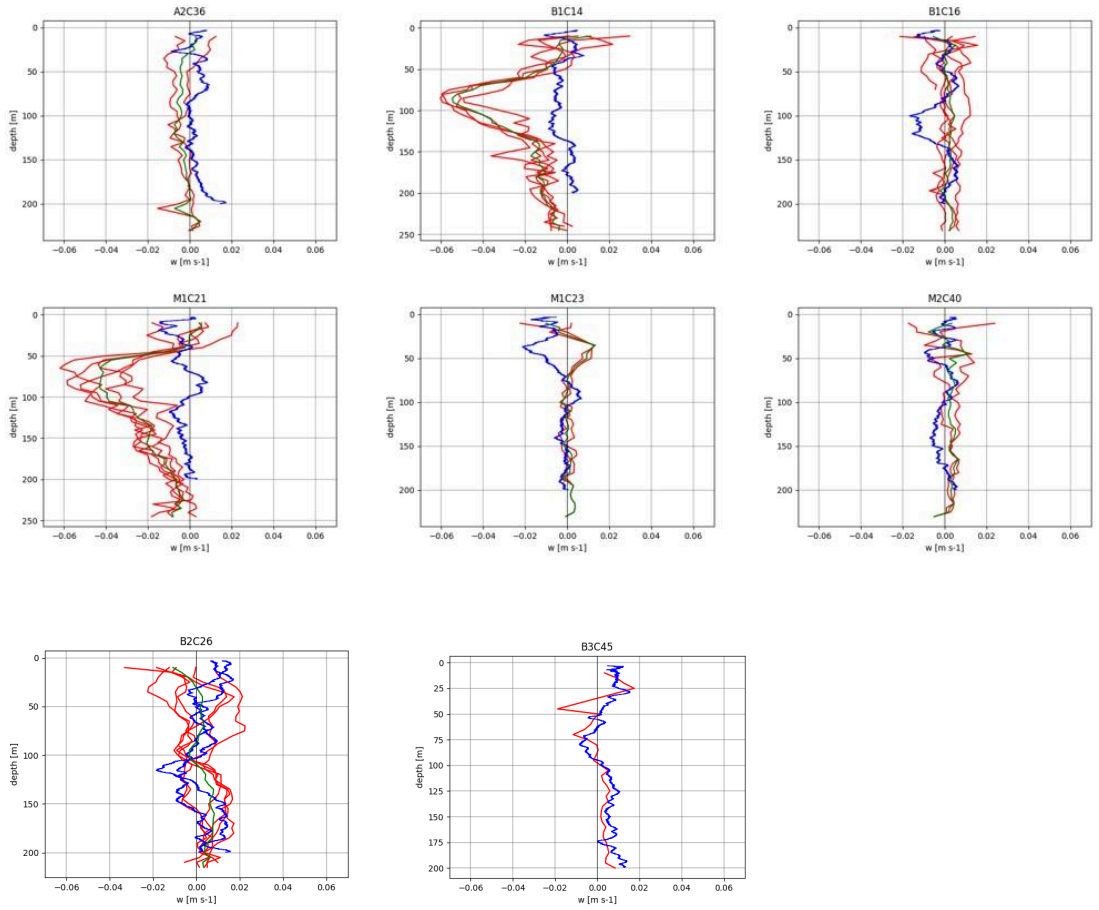


Figure 6 : Profils des vitesses verticales mesurées par FF-ADCP (rouge) et VVP (bleu) concomitantes. Le profil vert correspond au profil moyen du FF-ADCP.

4. Conclusion et perspectives

Pour conclure, malgré la perte d'un des VVP en début de mission, la campagne océanographique BioSWOT-Med a permis à l'équipe OPLC en premier lieu de vérifier et confirmer la performance des deux nouveaux dispositifs de mesures. Ce fut la première fois que les deux instruments étaient déployés en même temps et dans la même zone d'étude, ce qui marque une grande étape dans le traitement de données de vitesses verticales à fines échelles, permettant une première comparaison des deux dispositifs (vitesses verticales enregistrées, signaux détectés, coût de production, autonomie). L'étude des vitesses verticales dans la zone frontale sera conjuguée avec les autres données interdisciplinaires de la campagne pour une meilleure compréhension du couplage physique-biologie à fines échelles

Tout d'abord, les profils verticaux établis pour les stations (Fig 6) et les séries temporelles (Fig 4 & Fig 5), ont permis une comparaison bidimensionnelle (en fonction de la profondeur) et tridimensionnelle (en fonction de la profondeur et du temps) des mesures de vitesses verticales établies par le FF-ADCP et le VVP. Dans l'ensemble, nous observons que les deux dispositifs enregistrent des vitesses verticales océaniques de l'ordre de 10^{-3} $m.s^{-1}$ avec une précision similaire. La première différence majeure entre les deux dispositifs réside dans le fait que le FF-ADCP est sensible aux particules présentes dans l'eau, et ainsi à la présence de biologie. Cette différence est nettement représentée dans les stations échantillonnées de nuit, comme la station M1C21 (Fig 5.d), où on observe entre 50 et 100 m de profondeur, des vitesses verticales océaniques enregistrées par le FF-ADCP très négatives, signifiant une détection de signaux biologiques. La deuxième différence importante est la fréquence d'échantillonnage des signaux de vitesses verticales. En effet, le FF-ADCP qui chute à une vitesse nettement supérieure que la remontée du VVP, détecte des signaux beaucoup plus rapides.

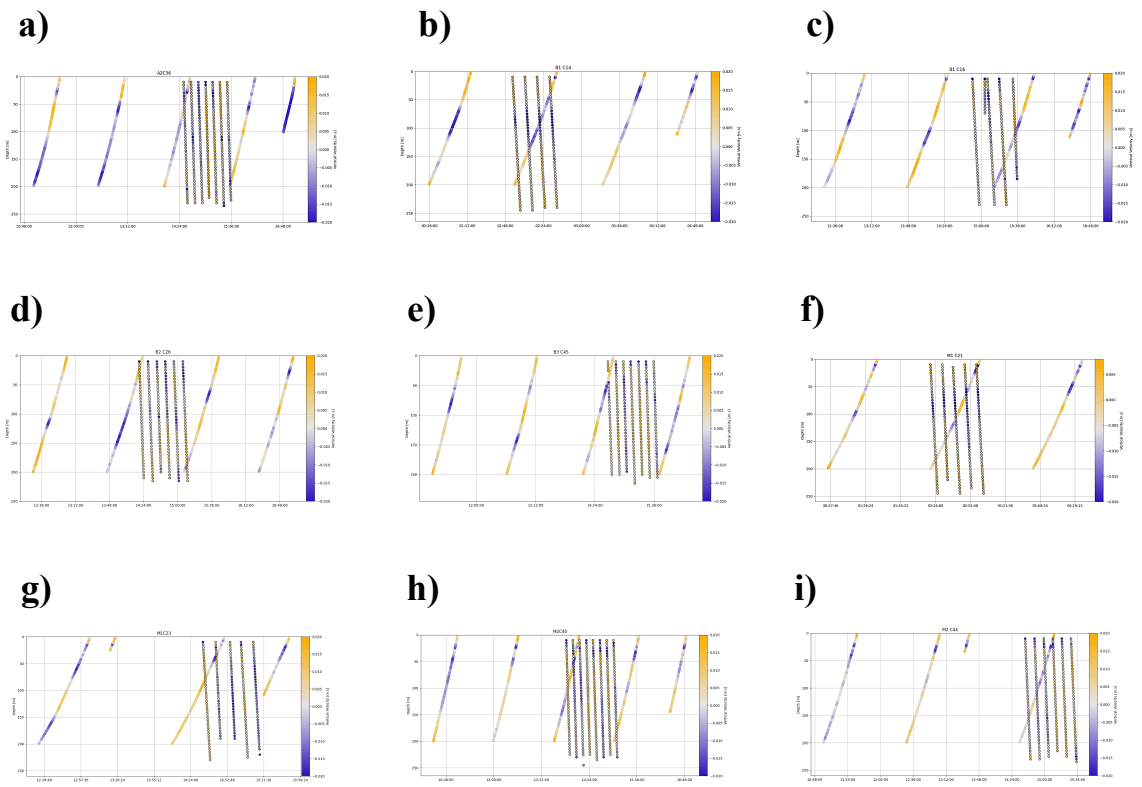
De ce fait, le premier traitement de données de la campagne océanographique BioSWOT-MED marque un premier pas vers une meilleure compréhension de la dynamique verticale dans une zone frontale entre différentes masses d'eau. Néanmoins certains profils restent encore à approfondir et interpréter, comme la station M1C21, où les vitesses verticales mesurées par le VVP sont de l'ordre de -0.02 $m.s^{-1}$. L'approfondissement de l'analyse de données et le couplage avec les données de biologie permettront à l'avenir une meilleure comparaison des deux dispositifs.

Enfin, l'étude du couplage biologie-physique sera continuée lors du projet HOPE-vv qui a débuté en novembre 2023 en Nouvelle-Calédonie. Ce projet interdisciplinaire vise à mieux comprendre la pompe biologique du carbone dans une région hautement oligotrophe à l'aide des mesures de vitesses verticales à fines échelles.

Annexe

```
def fonction(station):
    repertoire =
r"/Users/free/Documents/Chloe/DATA/FF-ADCP/mini/FF-ADCP_mini_C"
    data = {}
    motif = ".mat"
    for num in station:
        snum = "{:02d}".format(num)
        data[num] = scipy.io.loadmat(repertoire + str(snum)+motif)
        S.append(data[num])
        return S
```

Annexe 1 : Fonction python qui permet de lire les fichiers matlab sur spyder.



Annexe 2 : Séries temporelles des mesures de vitesses verticales par le VVP (profils montants) superposées aux profils temporels de vitesses verticales mesurées par le FF-ADCP (valeurs dans les cercles noirs, profils descendants.

Bibliographie

C. Comby, 2023, thèse : Vitesses verticales et dynamique de fine échelle, https://people.mio.osupytheas.fr/comby.caroline/RESEARCH/These_Comby_2023.pdf

E. Lefèvre, 2023: Rapport de stage M1 sur l'analyse des données de vitesses verticales issues de la campagne océanographique BioSWOT-MED 2023, https://people.mio.osupytheas.fr/~barrillon.s/Students/Rapport_Eva_2023.pdf

A. M. Doglioli, G. Grégori, F. d'Ovidio, A. Bosse, E. Pulido, F. Carlotti, M. Lescot, A. Barani, S. Barrillon, L. Berline, M. Berta, P. Bouruet-Aubertot, L. Chirurgien, C. Comby, V. Cornet, C. Cotté, A. Della Penna, M. Didry, S. Duhamel, J.-L. Fuda, S. Gastauer, L. Guilloux, D. Lefèvre, E. Le Merle, A. Martin, D. Mc Cann, M. Menna, S. Nunige, L. Oms, M. Pacciaroni, A. Petrenko, R. Rolland, L. Rousselet, E. M. Waggoner, 2024 : BioSWOT-MED cruise report, https://archimer.ifremer.fr/doc/00889/100060/110312.pdf