



Mesure de la composante verticale de vitesse basée sur les données courantométriques obtenues par ADCP de coque durant la campagne FUMSECK 2019

Dynamique océanique de fines échelles

Ombeline SUE

Stage de Licence 2 réalisé à l'Institut Méditerranéen d'Océanologie du 1^{er} juillet au 29 juillet 2020 sous la direction de Stéphanie BARRILLON



Remerciements

Je souhaite remercier ma maîtresse de stage, Stéphanie Barrillon, dans un premier temps pour avoir accepté de me prendre en stage pour un mois malgré la longue attente avant d'obtenir une convention suite au confinement. Dans un second, pour toutes les réflexions et explications qu'elle m'a apportées, à grand renfort de schémas, et pour trouver la faille nécessaire au bon fonctionnement de mes programmes sous python. Encore merci pour ton temps Stéphanie, ce stage m'offre un plus large horizon dans la poursuite de mes études et même pour une future vie professionnelle, horizon qui me manquait jusqu'à présent.

Merci à Lola Kieffer de m'avoir aiguillée en amont du stage et pour m'avoir transmis son rapport et ses programmes. Ainsi qu'aux personnes du laboratoire ayant tenté d'apporter une solution afin que je parvienne à installer Basemap avec ma version du logiciel.

J'aimerais également remercier les voisins de Baudelaire, une super année, riche de rencontres surprenantes et heureuses. Cela me fait toujours du bien de vous voir et m'a permis de *reboot* pour repartir du bon pied sur la rédaction.

Et finalement merci à mes parents qui m'ont permis de suivre ce stage dans de très bonnes conditions.

Table des matières

I. Introduction

II. Matériel & méthodes

II.1 La campagne FUMSECK

II.2 Instruments déployés

II.3 ADCP de coque

III. Résultats

III.1 Profils de vitesses verticales

III.2 Estimation de l'écart type et du biais

IV. Discussion

IV.1 Cause de l'anomalie de vitesse observée

IV.2 Concordances entre les mesures réalisées par les divers ADCP

V. Conclusion & perspectives

Références

Annexe

I. Introduction

L'océanographie à l'instar de la météorologie s'appuie initialement sur des observations et un besoin fondamental de protection de l'être humain face aux intempéries et caprices océaniques dans un but d'amélioration de ses conditions de vie. Cela le mène à une recherche constante de meilleures interprétations des phénomènes atmosphériques et marins depuis le milieu du 19^e siècle et bien avant de manière plus implicite par la navigation, afin de s'assurer d'utiliser au mieux ses connaissances. À cela s'ajoute une certaine fascination envers ces univers aux véritables enjeux socio-économique, encore relativement incompris dans leur globalité.

La dimension temporelle, source de complexité dans la mise en évidence des différents processus, est à prendre en considération. En effet, si la recherche aujourd'hui permet d'envisager prévoir la météo à quelques jours d'intervalle seulement, il en va de même pour les phénomènes océanographiques où diverses échelles de temps et d'espace sont à l'étude. La dynamique océanique, mise en équation sous sa forme actuelle depuis 1845, est loin d'être entièrement comprise puisque la difficulté majeure réside dans le fait de résoudre un système d'équations aux dérivées partielles non linéaires, pour lequel la simplification des différents termes est nécessaire (équations de Navier Stokes, 1845).

Depuis la seconde moitié du 20^e siècle, avec l'essor d'internet et du Big Data, les scénarios prédictifs se basent sur la modélisation numérique, qui nécessite une simplification dans les paramètres d'entrées, les termes de faibles importances aux échelles considérées sont écartés des équations notamment dans le cadre de modèles globaux. Pour un modèle local, il est cependant nécessaire d'inclure de nombreux paramètres qui vont découler d'observations *in situ*. La puissance de calcul de plus en plus élevée et les données obtenues de façon massive laissent présager une compréhension accrue dans les prochaines décennies, dans la limite de la puissance de calcul et des financements. À ces limites s'ajoutent de nombreuses autres difficultés intrinsèques à la construction de modèles. Enfin, afin de les vérifier, en les améliorant le cas échéant, un retour est nécessaire, à cette fin les sorties du modèle sont comparées aux observations *in situ*. (Mahadevan, 2016 ; Pascual *et al.*, 2017 ; Lévy *et al.*, 2018).

Dans le domaine de la physique des Océans, les études se sont centrées sur la circulation de très fine échelle et celle de grande échelle. Les phénomènes de sous-méso-échelle à méso-échelle, soit un ordre de grandeur de 0.1 à 100 km, pour une durée de vie de quelques jours à quelques semaines, n'ont pas encore été largement dévoilés faute de données. La compréhension des courants est nécessaire à la compréhension d'autres phénomènes biogéochimiques, notamment le cycle du carbone mais plus globalement, puisque l'océanographie se tourne vers une approche holistique et systémique.

C'est dans ce cadre que le projet SWOT (*Surface Water and Oceanographic Topography*) a été initié par la NASA (*National Aeronautic & Space Administration*), le CNES (Centre National d'Études Spatiales) et de nombreux laboratoires dont le MIO (Institut Méditerranéen d'Océanologie). Le lancement d'un satellite d'altimétrie est prévu pour 2022 ; c'est l'occasion pour les chercheurs d'approfondir leurs études, notamment en hydrographie, puisque ce satellite permettra d'obtenir des cartes de topographie de 60km/60km au lieu d'une trace linéaire au sol, soit une vision bidimensionnelle. Ces nouvelles données permettront de déterminer à partir du niveau d'eau douce mondial, son volume qui est aujourd'hui impossible à préciser car de grosses incertitudes existent en raison des crues fluviales.

En océanographie, deux axes sont prévus par le MIO : i. Lien entre composante verticale de vitesse du courant et processus biogéochimiques tels que la pompe à carbone et la circulation verticale des nutriments ; ii. Circulation de fines échelles et biodiversité.

Ce lancement et sa préparation font l'objet d'une étude internationale. En effet, les croisements d'orbites réalisées par le satellite seront l'occasion d'obtenir une grande quantité de données dans les premiers mois suivant le lancement pour l'étude des fines échelles océaniques. En prévision de ce lancement, les laboratoires LOCEAN et MIO ont lancé conjointement le projet BioSWOT, suivi du projet BioSWOT-AdAC dont la visée principale est d'analyser les données satellites de SWOT en regard des observations réalisées durant les campagnes simultanées à la première phase de SWOT. En amont, les campagnes préparatoires permettent de calibrer les outils de mesure et réaliser divers tests en mer Méditerranée :

- **OSCAHR** (*Observing Submesoscale Coupling At High Resolution*) - **2015**, avait pour finalité de permettre l'étude des effets d'une structure à méso-échelle sur la distribution planctonique et les cycles biogéochimiques associés (Doglioli & Grégori, 2015). Cette campagne a eu lieu en mer Ligure sur le même site que la campagne FUMSECK, objet de ce rapport.
- **PROTEVS-SWOT** (*Prévision Océanique, Turbidité, Écoulements, Vagues et Sédimentologie*) - **2018**, 17 jours passés en mer à bord du Beautemps-Beaupré, un navire appartenant au SHOM (*service hydrographique et océanographique de la marine*), en collaboration avec l'IMEDEA (*Instituto Mediterraneo de Estudios Avanzados*) au niveau des Baléares.
- **FUMSECK** (*Facilities for Updating the Mediterranean Submesoscale-Ecosystem Coupling Knowledge*) - **2019**, dirigée par Stéphanie Barrillon. Cette campagne s'est déroulée durant une semaine, du 30 Avril 2019 au 7 Mai 2019, en mer Ligure à bord du navire océanographie Téthys II, dans le but de tester de nouvelles méthodes et instruments océanographiques permettant l'étude des phénomènes et de la dynamique océanique à fine échelle spatiale et temporelle (ciblée sur l'étude des processus de sous-méso-échelle à méso-échelle).

La campagne FUMSECK s'est déroulée en Mer Ligure, située dans la partie Nord-Ouest de la mer Méditerranée ; au niveau de la côte franco-italienne, plus précisément au Nord de la Corse. La mer Ligure est soumise à un régime oligotrophe, ce qui signifie qu'au printemps, les couches supérieures se stratifient augmentant les chances d'apparition d'efflorescences phytoplanctoniques en surface (Sverdrup, 1955). Avec les données récoltées durant OSCAHR, la zone d'étude a révélé une circulation agéostrophique détectable en surface à l'aide de cartes FSLE (*Finite Size Lyapunov Exponent*). Les cartes de FSLE sont produites grâce aux satellites d'altimétrie et servent à visualiser les zones de front, ce qui est utile afin de mieux considérer les dynamiques sur lesquelles nous nous centrons dans ce rapport (Comby, 2020).

La circulation générale de la mer Méditerranée est de type cyclonique, la part des courants située en mer Ligure provient de la convergence des courants WCC (*Western Corse Current*) et ECC (*Eastern Corse Current*) en un courant simple au niveau du golf de Gênes : le courant Nord, allant en direction de l'Ouest du bassin Nord-Occidental, ce qui est explicité sur la figure 1 (Millot, 1992 ; Millot & Taupier-Letage, 2005). Ce courant est en fait une continuité plus large regroupant les courants Ligure ; Liguro-Provençal et Catalan. Dans cette zone, l'AW (*Atlantic Water*) provenant du Détroit de Gibraltar (Millot, 1987), se mélange avec la LIW (*Levantine Intermediate Water*) et plonge ; formant le WMDW (*Western Mediterranean Deep Water*).

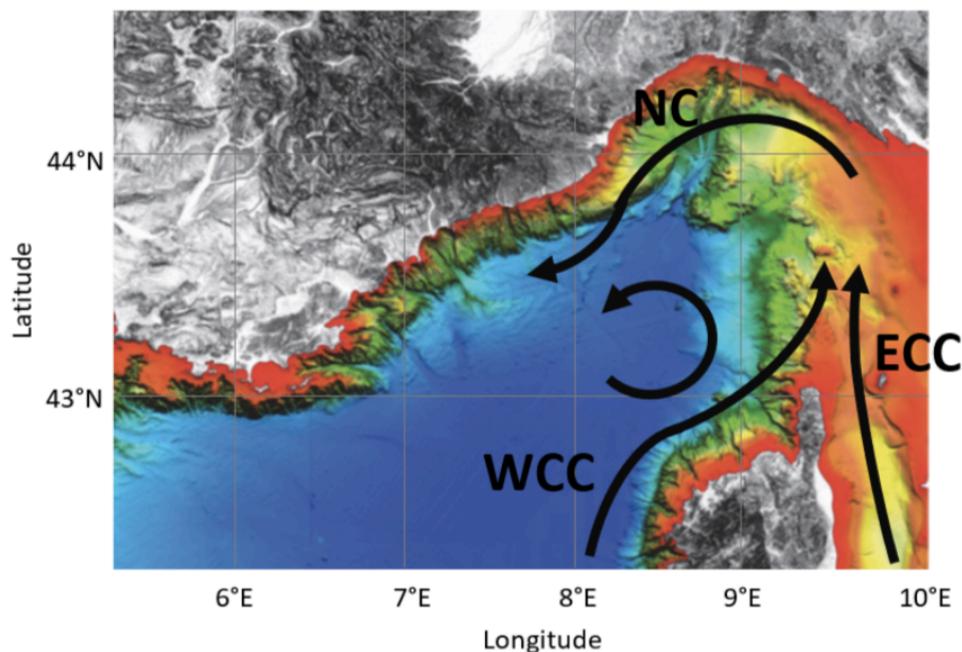


Figure 1 – Schéma des principaux courants en mer Ligure formés par l'eau d'Atlantique (NC = Courant Nord ; WCC = Courant Corse Ouest ; ECC = Courant Corse Est) (Millot, 1987) avec en fond une carte bathymétrique de la mer Ligure (bleu : bassin profond ; rouge : plateau continental ; vert et jaune : pente continentale). (Prieur et al., 2020).

Le courant Nord se caractérise par une largeur de quelques dizaines de kilomètres ; une épaisseur d'une centaine de mètres de profondeur et une vitesse maximale horizontale de plusieurs dizaines de cm/s en son centre. Sa variabilité saisonnière est élevée de par la formation d'eau dense : plus étroit, plus profond et intense en période hivernale (Alberola *et al.*, 1995). Des méandres se développent également à cette période, ainsi que des tourbillons de petite échelle, observés à l'Ouest de la Corse (Fuda *et al.*, 2000 ; Millot, 1991).

Le projet SWOT permettra une avancée non négligeable sur les connaissances de fines échelles, notamment d'un point de vue physique et, comme il est déterminant sur l'ensemble des processus marins, en chimie et biologie des Océans. En effet, la physique des courants est prépondérante que ce soit sur le mélange des particules ou sur la dispersion du plancton, elle impacte ainsi, en cascade, l'ensemble des comportements de toute la chaîne trophique et les cycles biogéochimiques.

Les vitesses verticales des courants océaniques, d'un ordre de grandeur inférieur à celui des composantes horizontales de vitesse (mm/s à 1cm/s contre cm/s), sont plus difficiles à mesurer et usuellement les ADCP (*Acoustic Doppler Current Profilers*, ADCP) ne sont pas utilisés pour déterminer cette mesure. C'est pourquoi des tests technologiques ont été effectués lors de la campagne FUMSECK sur différentes méthodologies mettant en œuvre divers ADCP, afin de pouvoir, à l'avenir, mesurer également cette dernière composante avec précision à l'aide de ces outils. S'il s'avère que cet instrument est efficace, étant largement déployé à l'échelle mondiale, il permettrait d'obtenir de nouvelles données conséquentes.

Ma problématique porte sur la dynamique océanique de fine échelle et l'analyse des composantes verticales de vitesses obtenues par ADCP de coque durant la campagne FUMSECK. Les mesures sont-elles fiables ? Et, si oui, dans quelle gamme ?

Tout d'abord nous présenterons les instruments de mesure utilisés lors de la campagne puis nous nous centrerons sur les mesures courantométriques obtenus par ADCP de coque. Enfin, la composante verticale de vitesse, sujet de ce rapport, sera corrigée de la vitesse verticale du bateau afin d'en déduire s'il est possible d'utiliser à l'avenir cet instrument pour la mesure de cette composante.

II. Matériel & méthodes

II.1 La campagne FUMSECK

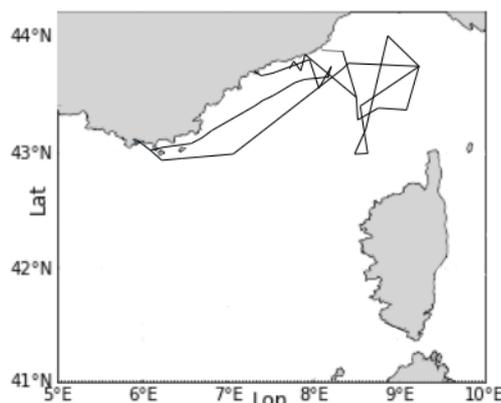


Figure 2 – Trajectoire de la campagne FUMSECK dans le golfe de Gênes

La campagne FUMSECK (*Facilities for Updating the Mediterranean Submesoscale Ecosystem Coupling Knowledge*) est un projet dirigé par Stéphanie Barrillon avec l'équipe Océanographie Physique, Littorale et Côtière (OPLC) et celle de l'axe transverse Couplage du MIO. Elle a eu lieu du 30 avril 2019 au 7 mai 2019 à bord du N/O Thétys II dans le golfe de Gênes (départ et arrivée au port de La-Seyne-sur-mer). La trajectoire, prévue en forme de papillon mais modifiée par les conditions météorologiques (Fig. 2, à 43.5°N/9°E), a permis de quadriller la zone d'étude. FUMSECK est l'une des campagnes préparatoires en prévision du lancement du satellite SWOT en 2022. Dans ce cadre, elle fut l'occasion de divers test technologiques sur les instruments de mesure de fines échelles et de plus, d'un largage de microparticules biodégradables conçues afin d'étudier leur dispersion.

L'équipe sur le bateau était en charge des mesures in situ, un suivi journalier appuyé par une équipe de l'OPLC à terre permettait de décider, en temps réel, de modifier la trajectoire initiale en fonction de la présence de structure d'intérêt telles un tourbillon, un front ou un filament de fluorescence. L'équipe à terre produisait chaque jour un bulletin à l'aide du logiciel SPASSO (*Software Package for an Adaptive Satellite-based Sampling for Oceanographic cruises*) contenant les données satellites qu'elle transmettait à l'équipe en mer. <https://spasso.mio.osupytheas.fr/>

II.2 Instruments déployés

Les instruments faisant l'objet de tests technologiques lors de FUMSECK ont été ciblés sur l'étude des processus de sous-méso-échelle à méso-échelle (fines échelles) soit pour un ordre de grandeur entre 0.1 et 100 km et une durée de vie allant de quelques jours à quelques semaines.

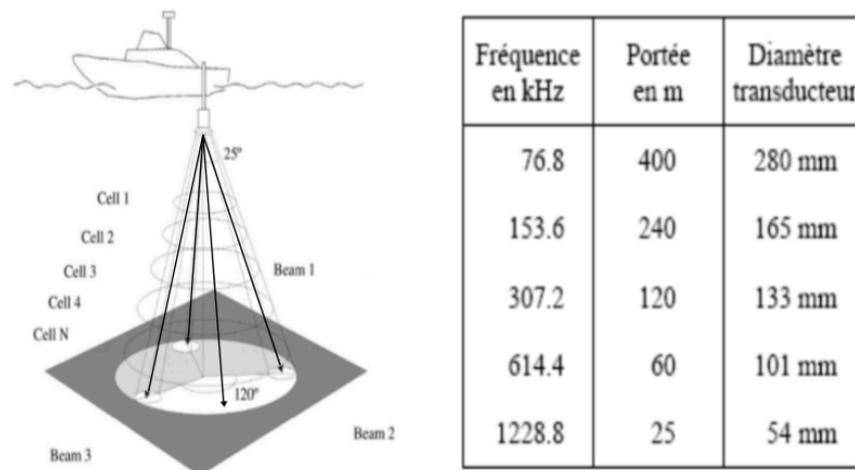
Lors de cette campagne, divers profileurs de courant acoustiques à effet doppler (*Acoustic Doppler Current Profilers*, ADCP) ont été embarqués afin de procéder à une batterie de tests sur la mesure de la composante de vitesse verticale du courant. L'ADCP de coque RDI 75kHz, objet de ce rapport, échantillonna de façon continue tout au long de la campagne. Les données obtenues ont été séparées en 13 transects. Un ADCP Sentinel V (comprenant 5 faisceaux au lieu de 4), un L-ADCP et un Free Fall ADCP (*Free Fall*, en chute libre) ont permis de récolter des données courantométriques en station, le but étant de comprendre dans quelle mesure et avec quelle précision ces instruments pourront être utilisés lors de futures campagnes afin de mesurer la composante verticale de vitesse (Comby, 2020). Un prototype de profileur de vitesses verticales (VVP, *Vertical Velocities Profiler*) a aussi été essayé ainsi qu'un planeur sous-marin (*glider*). Les MVP permettant de transporter diverses sondes, les chercheurs ont ici voulu étudier le comportement rotatif des instruments et réaliser des tests d'acquisition pour le MVP200 : de la liaison reliant l'objet au câble tracteur jusqu'à ce que les données soient récupérées à bord.

Durant la traversée, six stations de mesures des vitesses verticales et une station de largage et suivi des microparticules ont été effectuées. Les instruments utilisés à bord en station ont permis de mesurer les paramètres courants tels, la conductivité, la profondeur et la température avec une sonde CTD ; la salinité à l'aide d'un thermo-salinomètre SeaBird SBE-21 (TSG) et la fluorescence grâce au fluorimètre 10-AU-005-CE Turner Designs, pour cette dernière, c'est l'abondance chlorophyllienne qui est recherchée soit, indirectement, la densité de phytoplancton. Ces mesures ont été effectuées dans la couche superficielle et le long de la colonne d'eau. De plus des tests en station ont été réalisés sur le L-ADCP, le Free Fall ADCP et le VVP.

D'autres instruments ont été utilisés dans le cadre de mesures en continu : la géolocalisation (altitude, position latitude/longitude, cap) était obtenue avec un GPS composé de deux têtes Hemisphere VS 330. Le MVP200 (*Moving Vessel Profiler*) a été déployé, avec le MSFFF II (*Multi Sensor Free Fall Fish*, « gros poisson »). Cet instrument tracté par le bateau permet la mesure à haute résolution des profils de divers paramètres, dont la salinité, la fluorescence et la température, car il permet de transporter diverses sondes. L'abondance de communautés planctoniques, dans les eaux de la couche superficielle a été mesurée grâce aux données de deux cytomètres en flux automatisé (C6 et cytosense) effectuant des mesures toutes les 20 minutes. De même, le TSG et l'ADCP de coque ont échantillonnés en continu.

II.3 ADCP de coque

L'ADCP de coque (cf. <http://saved.dt.insu.cnrs.fr/moyens/index.php?content=adcp.cnt> pour celui du Thétys II) repose sur l'effet Doppler-Fizeau : la tête de l'instrument fixée sous la coque envoie des signaux acoustiques vers le bas (dans un référentiel terrestre) à une fréquence définie, toutes les secondes. Les faisceaux sont inclinés à 30° par rapport à la verticale stricte vis-à-vis de la coque, ils sont au nombre de quatre dans notre cas, ce qui permet une mesure tridimensionnelle. Ces ondes qui vont rétro diffuser sur les particules qu'elles rencontrent, seront acquises en retour par l'instrument, qui va mesurer le décalage de fréquence et en déduire la vitesse des particules. Les composantes de vitesse peuvent ainsi être mesurées sur la colonne d'eau. L'ADCP de coque de la campagne a permis les mesures sur 500 m de profondeur, par intervalles de 4 mètres (Fig. 3). Dans les faits, on obtient la vitesse des particules par rapport à la vitesse du bateau, il faut donc enlever la vitesse de l'instrument pour obtenir la mesure finale. Les profils sont observables en quasi-temps réel sur un ordinateur à bord. Cet instrument mesure la vitesse des particules composants les courants, si du necton venait à passer sous le bateau, l'on mesure alors la vitesse du banc, l'outil peut donc servir aux biologistes (Guerra et al., 2019).



Kostaschuk et al., 2004

Figure 3 – Schématisation d'un ADCP de coque et de son fonctionnement.
(Modifié de Kostaschuk et al., 2004)

Cet instrument est largement utilisé à l'échelle mondiale en océanographie, conventionnellement, il permet de mesurer les composantes horizontales de vitesse (composante u, est-ouest ; composante v, nord-sud) ; w la composante verticale sur laquelle nous nous focaliserons ici, est néanmoins d'un ordre de grandeur plus fin, de l'ordre du mm/s. Lors de FUMSECK, les tests sur ADCP ont été réalisés dans le but d'utiliser ces instruments sur l'ensemble des composantes et non plus uniquement pour les deux premières (Comby, 2020). Pour cela, il est nécessaire de comprendre si l'ordre de grandeur obtenu est

cohérent ou non, avec quel écart type, quel biais, quel ADCP sera le plus performant et en règle plus générale conclure sur leur utilisation pour cette mesure à l'avenir.

C'est dans ce cadre que se positionne le présent travail : à partir des données obtenues, j'ai cherché à comprendre ce qu'il se passe dans le golfe de Gêne au niveau des vitesses verticales du courant et définir avec quelle précision il est possible de se fier à ces mesures.

L'ADCP de coque de la campagne FUMSECK a permis d'obtenir des valeurs en continu sur l'ensemble de la trajectoire du bateau, sectionné en treize transects (Fig. 5). Dans un premier temps, les données issues du traitement classique ont été visualisées telles quelles : u , v , w en fonction de la distance parcourue pour chaque transect (en km) et de la profondeur (m). *nb.* u et v correspondent aux vitesses du courant dans le repère terrestre, tandis que w correspond à la vitesse de l'eau par rapport au bateau. Dans un second temps, je me suis penchée sur la suppression de la vitesse verticale du bateau pour la composante w . En effet, le traitement classique corrige bien u et v de la vitesse horizontale du bateau, mais w n'est pas corrigé de la vitesse verticale du bateau. Pour chaque point de mesure, la colonne d'eau entière est affectée par cette vitesse. En première approximation, et au vu de la faible valeur des vitesses océaniques, la valeur moyenne de w sur toute la colonne est représentative de la vitesse verticale du bateau. Celle-ci est calculée en chaque point puis soustraite des valeurs de w , ainsi est obtenu une première évaluation de la vitesse verticale océanique. Pour finir, j'en ai extrait l'écart type de mesure et son biais, à partir d'histogrammes (pour la colonne d'eau sous un seul point de mesure, pour chacun des transects individuellement et pour l'ensemble). Avec ce premier traitement, on ne prend pas en compte le tangage et le roulis du bateau (il n'est pas parfaitement à horizontale en rapport à un axe considéré vertical dans ce référentiel, comme un rayon terrestre, et cette inclinaison évolue dans le temps), on obtient donc une mesure encore perfectible.

III. Résultats

III.1 Profils de vitesses verticales

Pour la composante w , une mesure de la vitesse de courant positive signifie que les particules ont un mouvement ascendant, si la mesure est négative, le mouvement enregistré est descendant. La composante u correspond à une vitesse horizontale ; par convention pour une mesure positive, le courant va en direction de l'Est. Il en va de même pour la direction Sud-Nord, si la mesure de v est positive, le courant va vers le Nord.

La figure 4 montre les profils de vitesse de courant en regard de leurs positions géographiques où l'étoile marque le début du transect 2. Les profils de vitesse, horizontale (u) & (v), et verticale (w), directement issus du logiciel de traitement de l'ADCP (Céline Laus Heyndrickx, INSU), sont présentés à droite. Les profils de vitesse verticale corrigés de la moyenne sur la profondeur par point de mesure sont montrés à gauche. L'intérêt de ces profils réside dans le fait d'observer les mouvements verticaux et horizontaux enregistrés par ADCP de coque, de plus, ils ont permis d'appréhender en un aperçu rapide (à l'œil), la justesse de la mesure au niveau de l'ordre de grandeur. On peut considérer que l'ordre de grandeur n'est pas incohérent (entre -15 cm/s et 10 cm/s pour les valeurs les plus extrêmes, entre -5 cm/s et 5 cm/s en moyenne) à première vue ce qui est déjà un premier résultat satisfaisant. Dans cette partie, nous étudierons les profils verticaux de vitesse après correction. Pour ce transect, aucun mouvement vertical remarquable n'est mis en évidence.

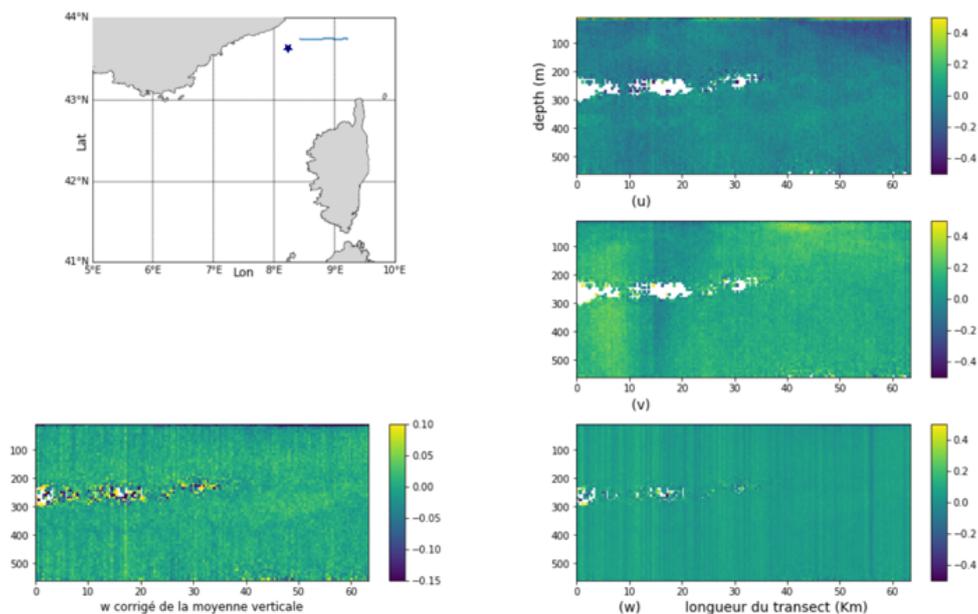


Figure 4 – Mise en regard, pour le transect d'intérêt 2, de son tracé géographique (en haut à gauche), des composantes de vitesse u , v , w (m/s, à droite) avec la visualisation de w corrigée (m/s, en bas à gauche) en fonction de la profondeur (m) et de la distance parcourue (km). Le début du transect est repéré par une étoile bleue.

La figure 5 présente l'ensemble des profils de vitesse réalisés à partir des données ADCP de coque, sur les 13 transects. Les valeurs générales des profils (w corrigés), lorsqu'ils ne sont pas perturbés par la bathymétrie ou par des mauvaises mesures, sont relativement homogènes et proches de 0 pour tous les transects et n'indiquent donc pas de grands courants descendants ou ascendants à ces endroits. En revanche, l'on remarque nettement, pour certains profils, une trace de mesures négatives située entre 50 et 100 m de profondeur et répétée sur quatre des treize transects totaux (entouré en rouge, Fig. 5).

Sur la figure 6, sont présentés les profils de vitesses verticales moyens sur chaque transect, en fonction de la profondeur. Ainsi, les anomalies de vitesses peuvent être observées et l'on précise une vitesse verticale générale comprise dans l'intervalle $[0 ; 0.01]$ m/s soit entre 0 et 1 cm/s. Si cette valeur moyenne ne souligne pas de courants verticaux significatifs dans le golfe de Gênes, elle permet en revanche, en première approximation, de dire que l'ADCP de coque est capable de mesurer une composante verticale car l'ordre de grandeur obtenu n'est pas aberrant. Les anomalies de vitesses sont négatives et présentent un mouvement descendant sous le bateau entre 50 et 100 m de profondeur, parfois sur 200 Km de parcours, d'une vitesse allant de -0.015 à -0.06 m/s, avec un mouvement descendant maximal à 6 cm/s (transect 3) sur près de 50 m (entouré en rouge, Fig. 6).

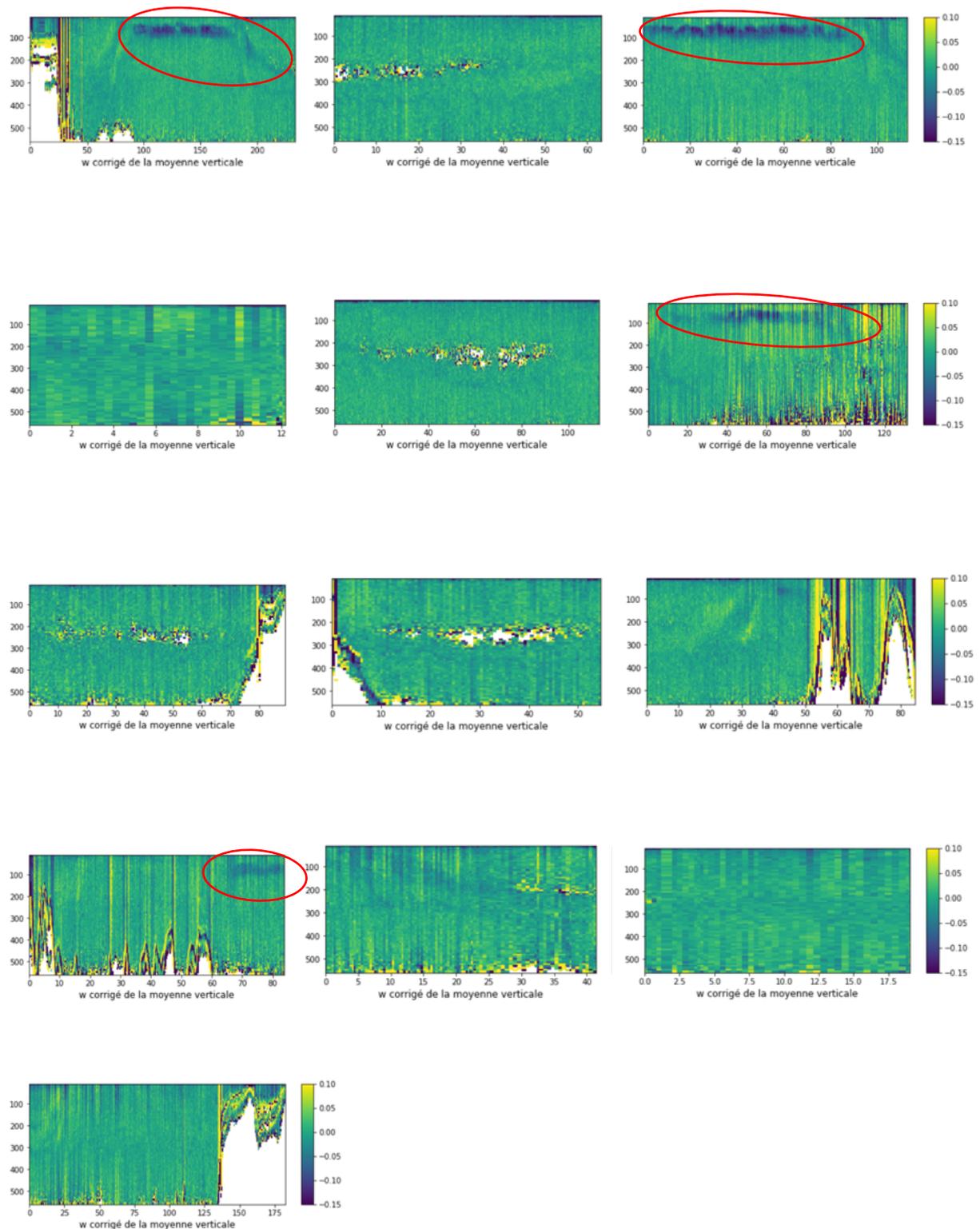


Figure 5 – Composante de vitesse verticale de vitesse w (m/s) en fonction de la profondeur (m), corrigée des mouvements du bateau, pour l'ensemble des transects de gauche à droite, avec les anomalies de vitesse remarquables cerclées en rouge.

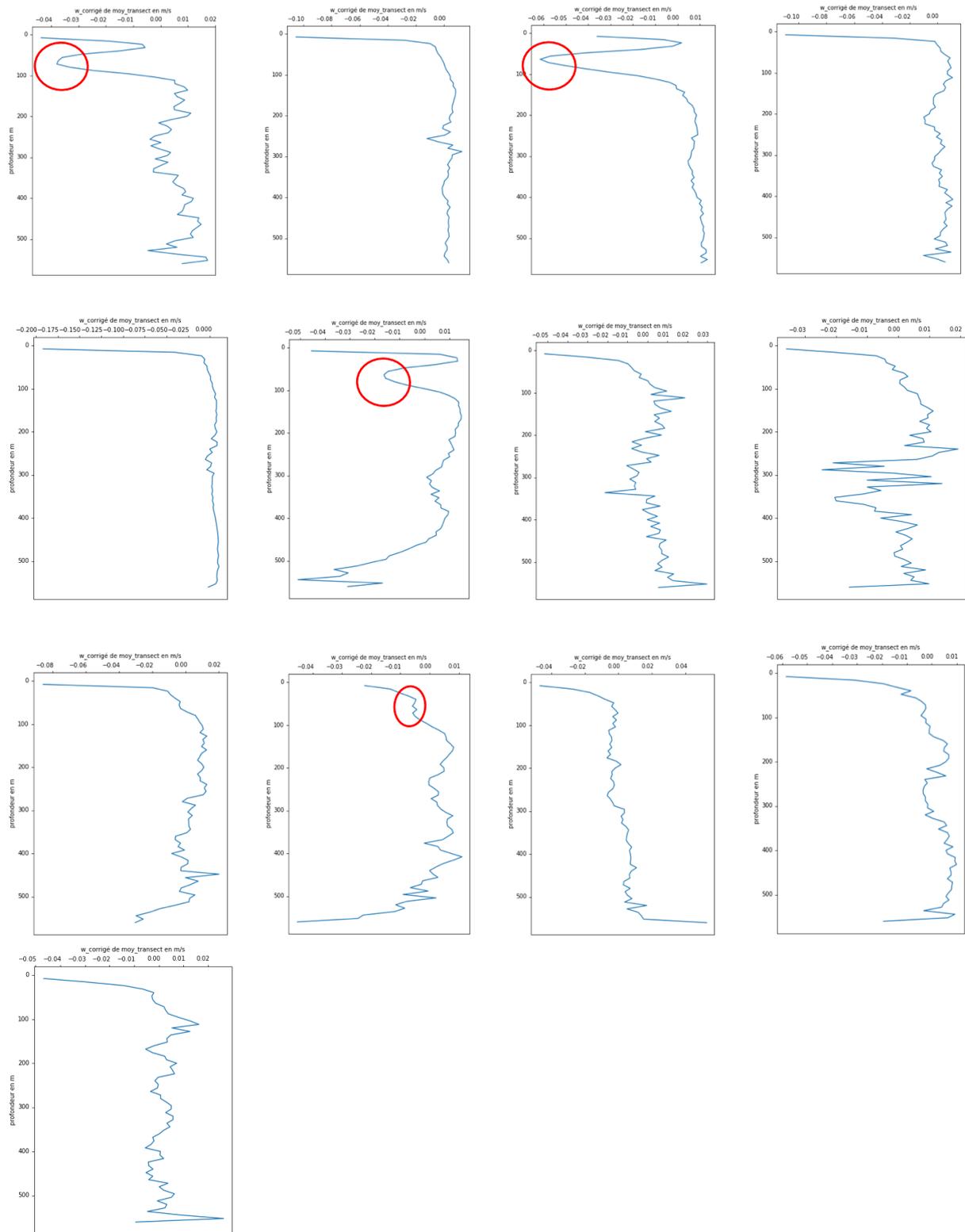


Figure 6 – Composante de vitesse verticale moyenne sur chaque transect (m/s) en fonction de la profondeur (m), corrigée des mouvements du bateau, pour l'ensemble des transects de gauche à droite, avec les anomalies de vitesse remarquables cerclées en rouge.

III.2 Estimation de l'écart type et du biais

Dans cette partie, sont présentés les histogrammes obtenus après correction de la composante verticale de vitesse afin d'en extraire un biais et un écart type. La figure 7 montre la distribution des valeurs de vitesses verticales corrigées pour l'ensemble du transect 2 (sans anomalie). L'allure de la courbe de distribution des mesures de vitesses verticales dans un transect dépourvu d'anomalie suit une gaussienne ; le biais est assimilable à 0 (valeur médiane), l'écart type à 0.02 m/s soit 2 cm/s (écart type). Les distributions pour les autres transects suivent les mêmes caractéristiques.

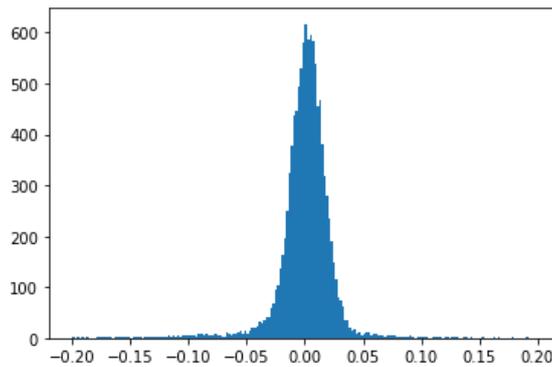


Figure 7 – Histogramme pour l'ensemble des valeurs de vitesses verticales en m/s (après correction des mouvements verticaux du bateau) du transect n°2.

La figure 8 expose, pour le transect 1, la distribution des valeurs de vitesses verticales pour une colonne d'eau correspondant à un point de mesure sans anomalie de vitesse comparée à celle pour une colonne d'eau correspondant à un point de mesure montrant une telle anomalie. La distribution des mesures suit en général une gaussienne dans les deux cas mais avec une rupture correspondant à l'anomalie, en effet, apparaît nettement l'accumulation aux alentours de - 10 cm/s. Le biais reste assimilable à 0 mais pour l'écart type il sera plus convaincant de s'en tenir à la figure ci-dessus, aux vues du nombre de résultats pris en considération.

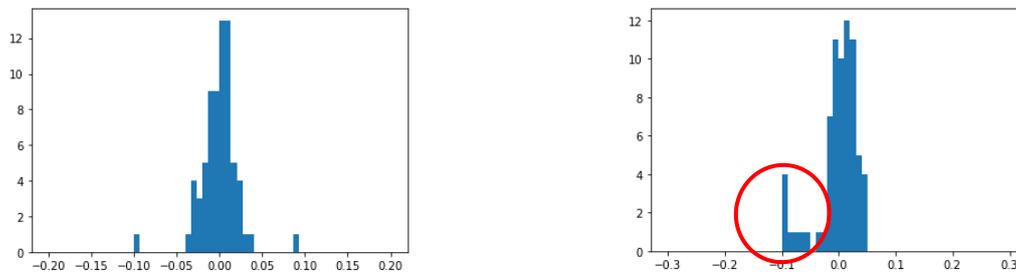


Figure 8 – Histogrammes pour les valeurs de vitesses verticales en m/s (après correction des mouvements verticaux du bateau) d’une unique colonne d’eau sans anomalie de vitesse remarquable (à gauche, transect n°1) et l’incluant (à droite, transect n°1, anomalie encerclée en rouge).

Enfin, sur la figure 9, sont présentés les résultats prenant en considération l’ensemble des mesures de w réalisées lors de FUMSECK. Le biais reste centré sur 0 m/s et l’écart type s’élargit aux alentours de 0.05 m/s soit 5 cm/s. Cet écart type obtenu pour les mesures par ADCP de coque est encore trop élevé pour une mesure valide de vitesse verticale, cependant certaines défaillances sont observables sur les profils comme des mesures erronées et des parties où l’on peut observer un bruit. C’est donc une première approche satisfaisante mais de nouvelles corrections seront à apporter si l’on souhaite se baser sur ces données à l’avenir.

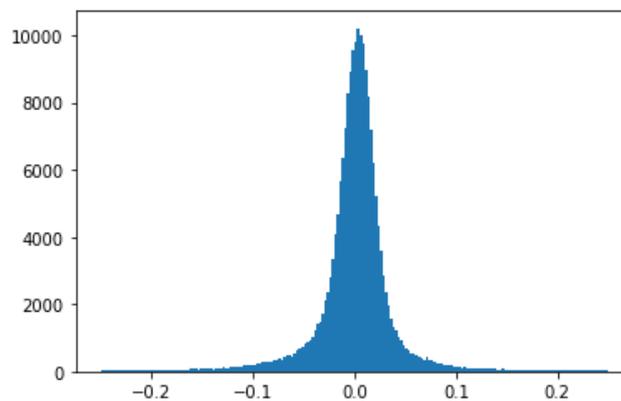


Figure 9 – Histogramme pour l’ensemble des valeurs de vitesses verticales en m/s (après correction des mouvements verticaux du bateau).

IV. Discussion

IV.1 Cause de l'anomalie de vitesse observée

En première hypothèse, comme le golfe de Gênes est le lieu de nombreux passages de ferrys entre l'Europe et l'Afrique du Nord, nous avons en premier lieu pensé au rejet des eaux usées du bateau, mais la durée et la profondeur des anomalies infirment cette hypothèse.

Dans un second temps et comme l'anomalie revenait à peu près aux mêmes heures de la nuit (*cf.* Tableau 1 montrant les horaires des transects), nous avons penché pour un pattern aux causes biologiques, dû à la migration verticale nyctémérale d'organismes zoo planctoniques en mer Ligure (Sardou & Andersen, 1993 ; Heywood 1996). En effet, le travail proposé par Guerra *et al.* a permis la mise en évidence de migrations verticales zoo planctoniques au niveau de la Corse par mesure ADCP, en 2019.

Enfin, d'après une communication personnelle avec Gérald Grégori, l'hypothèse privilégiée sera celle de bancs de poisson remontés en surface pour se nourrir et entamant un retrait vers les profondeurs en fin de nuit, cela n'exclut pas une migration zoo planctonique à la base de cette chaîne trophique.

Transect	Date	Début	Fin
1	30-April-2019	00:00:00	07:53:00
2	01-May-2019	07:53:00	17:40:00
3	01-May-2019	17:40:00	05:30:00
4	02-May-2019	05:30:00	06:40:00
5	02-May-2019	06:40:00	15:55:00
6	02-May-2019	15:55:00	06:59:00
7	03-May-2019	07:00:00	15:30:00
8	04-May-2019	00:00:00	14:22:00
9	04-May-2019	14:22:00	23:59:00
10	05-May-2019	15:14:00	03:00:00
11	06-May-2019	03:00:00	06:25:00
12	06-May-2019	06:25:00	17:20:00
13	06-May-2019	17:20:00	23:59:00

Tableau 1 – Transects pour lesquels ont été réalisés les profils de vitesse à partir de l'ADCP de coque lors de la campagne FUMSECK ; avec indiqué en rouge les horaires les plus proches auxquels ont été observées les anomalies.

IV.2 Concordances entre les mesures réalisées par les divers ADCP

Dans cette partie, j'ai voulu replacer les résultats obtenus pour l'ADCP de coque dans une plus large perspective, en comparant ces résultats à ceux des autres instruments dont les potentialités et limites ont été mises en valeur par le travail de Caroline Comby (2020). Les mesures de la composante verticale par ADCP sur la campagne FUMSECK ont été réalisées dans la perspective d'apporter une nouvelle méthodologie. A cette fin, les mesures des différents instruments ont été comparées et de nombreuses corrections ont été apportées car les forces agissantes sur l'instrument vont venir fausser la mesure. Les biais et écarts types extraits du traitement de ces données permettant *in fine* de définir quel est l'instrument le plus fiable et avec quel déploiement.

Les instruments utilisés en station (6 stations de 150 m de profondeur, instruments fixés sur un carrousel avec une CTD, profondeur fixe puis yoyo entre 150 m et la surface) sont les suivants :

- Sentinel V 500 kHz, un ADCP comportant quatre faisceaux classiques en plus d'un cinquième, spécialement utilisé pour la mesure directe de w .
- L-ADCP, à quatre faisceaux.

Ainsi, 3 mesures de w ont été obtenues, puisque pour le Sentinel V, il est possible d'obtenir une vitesse en corrélant les résultats des 4 premiers faisceaux ou en se basant sur le dernier seulement.

Une chaîne de traitement a été mise en place afin de corriger les différents effets liés aux forces exercées sur l'instrument qui le font dévier de la verticale (Comby, 2020). Les résultats ont été obtenus pour les descentes puis pour les remontées.

Avant la chaîne de traitement, les données brutes montrent pour le Sentinel V des écarts types de l'ordre de plusieurs dizaines de cm/s, avec une moyenne de l'ordre du m/s, correspondant principalement au mouvement de l'instrument. Un facteur 20 sépare donc ces moyennes brutes des mesures en fin de traitement de l'ordre du mm/s avec des écarts types de l'ordre du cm/s. Ces ordres de grandeurs correspondent donc à ceux obtenus pour l'ADCP de coque, même si les valeurs montrées par l'ADCP de coque sont plus élevées (quelques cm/s).

Le déploiement en *free-fall* ADCP est moins sensible que celui tracté par le câble porteur, puisqu'il est moins impacté par les mouvements du bateau. Finalement, la technique retenue sera donc celle du 5^e faisceau du Sentinel mais en *free-fall*. Malgré le peu de stations effectuées, les résultats sont prometteurs et il a été possible d'obtenir des mesures fiables. La méthodologie sera à améliorer dans un futur proche lors de nouvelles campagnes de test avant de pouvoir généraliser les mesures de composante verticale du courant. Cela permettra une avancée conséquente pour l'étude de la dynamique de fine échelle.

V. Conclusion et perspectives

Ce travail s'inscrit dans l'axe de recherche faisant le lien entre composante verticale de vitesse du courant et biologie dans le cadre des fines échelles océaniques proposé par le MIO, basé sur le projet SWOT.

Il a pour finalité de déterminer si l'ADCP de coque permettra de mesurer, en plus des composante horizontale, la composante verticale de vitesse océanique d'un ordre de grandeur inférieur (mm.s^{-1} au lieu de cm.s^{-1}). La campagne FUMSECK fut l'occasion de tests technologiques de mesures des vitesses verticales. En effet, les données *in situ* de vitesse verticale nécessaires à l'approfondissement de la compréhension des processus de fines échelles sont encore trop rares et il sera nécessaire de combler ce manque à l'avenir afin de mieux comprendre la dynamique de fines échelles en appuie des modèles déjà mis en œuvre à cette échelle spatiotemporelle.

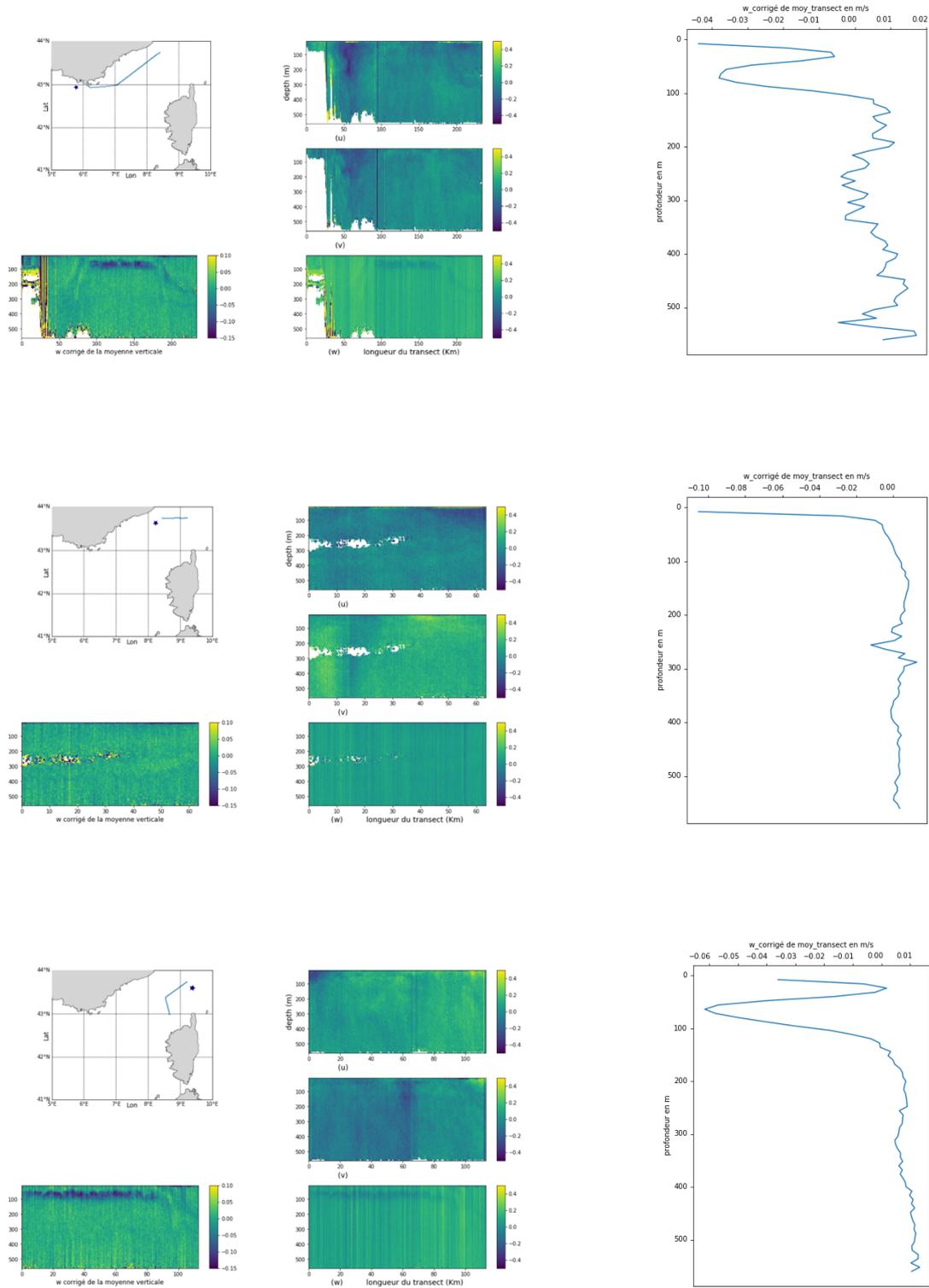
Après un premier traitement permettant de soustraire la vitesse verticale du bateau, les résultats sont encourageants, montrant des vitesses verticales océaniques de l'ordre du cm/s . Bien qu'il soit à améliorer, ce premier traitement s'est révélé cohérent. Il a été possible de mesurer des mouvements verticaux descendants sous le bateau, allant jusqu'à quelques cm/s , correspondant probablement à la migration d'organismes marins. L'ADCP de coque avait déjà été utilisé auparavant par certains biologistes de cette façon. En règle générale, hormis cette anomalie de vitesse verticale négative, cette région de la mer Ligure n'affiche pas de vitesses verticales significatives, les résultats obtenus sont homogènes, en accord avec ce qui était attendu dans cette zone pour les courants verticaux en mai sur la bordure du courant Nord. La comparaison de ces résultats avec ceux obtenus par d'autres ADCP déployés différemment en station montre que ces derniers présentent un écart type plus restreint, l'ordre de grandeur des écarts types de quelques cm/s pour l'ADCP de coque, quoique qu'encourageant, devra être réduit par un traitement plus approfondi.

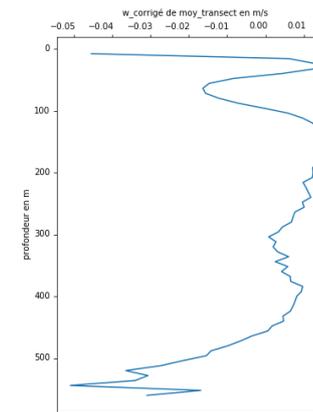
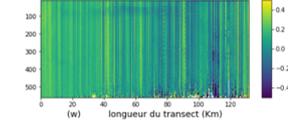
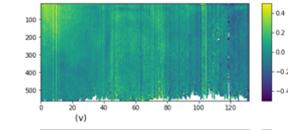
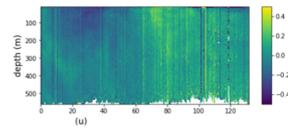
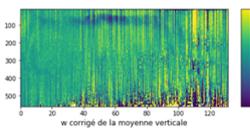
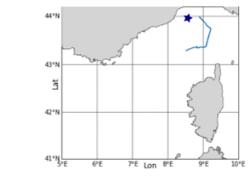
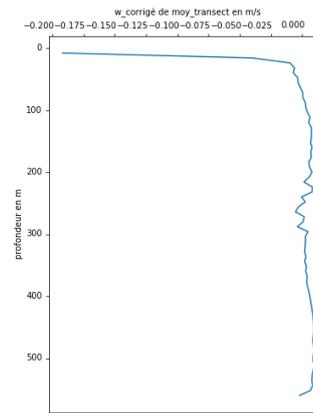
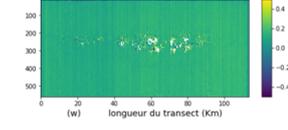
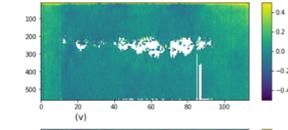
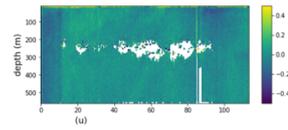
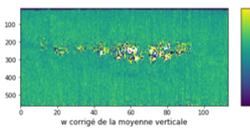
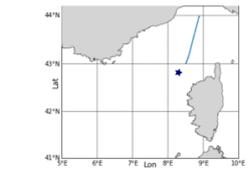
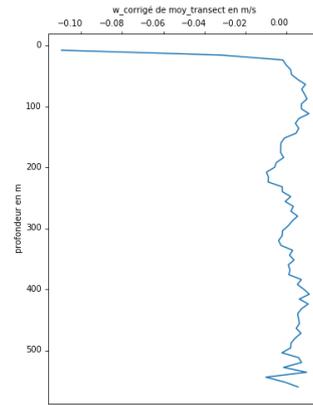
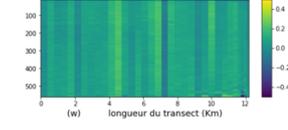
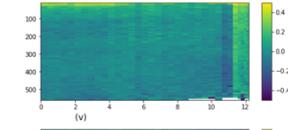
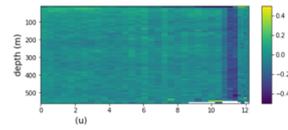
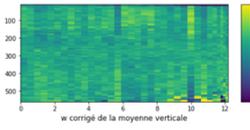
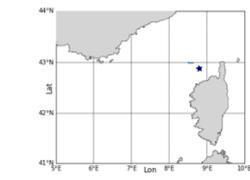
La perspective de se diriger vers une généralisation de la mesure *in situ* des vitesses verticales océaniques par ADCP se dessine. Ce serait un réel avantage, dans le cas de mesures en continu par ADCP de coque notamment, puisque les instruments sont déjà largement déployés sur l'Océan mondial. *In fine* dans le cadre de l'étude des processus physiques de fines échelles, il sera possible d'approfondir leur mise en évidence, malgré leur caractère transitoire, sur la base de données *in situ* fiables. Cela entraîne donc la nécessité de mettre en place de nouvelles chaînes de traitement et méthodologies à partir du préexistant, cette voie sera approfondie lors de campagnes organisées par le MIO (campagnes VVPTest (2020) ; PROTEVS-Gibraltar (2020) ; PROTEVS- BIOSWOTMED (2022)).

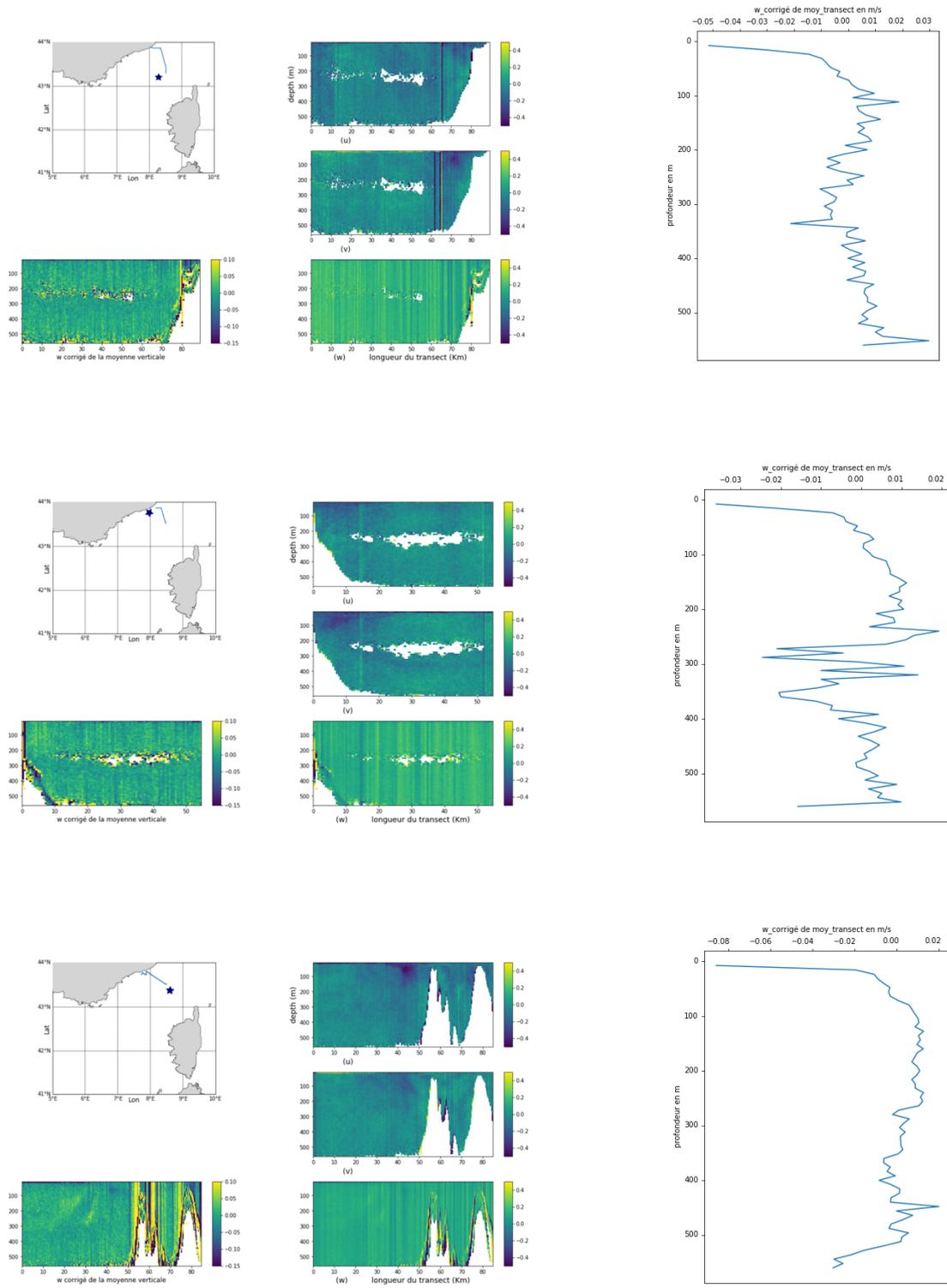
Références

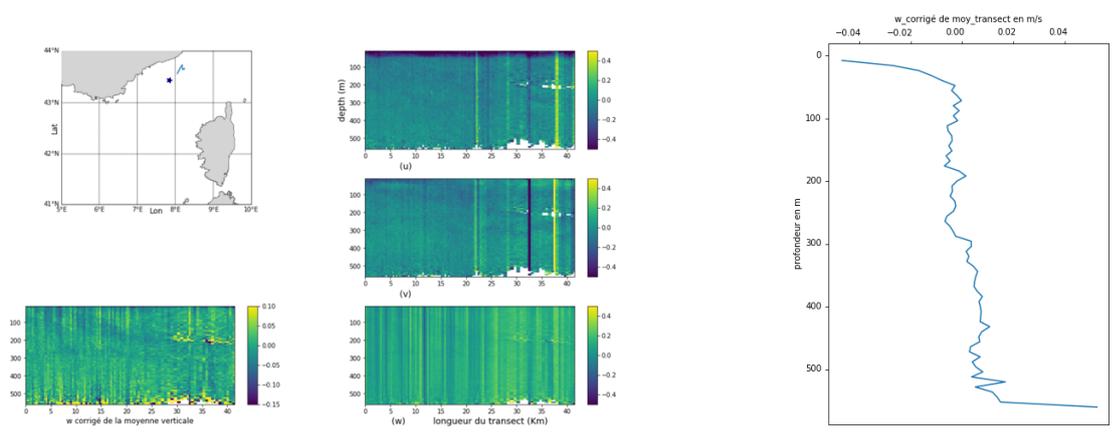
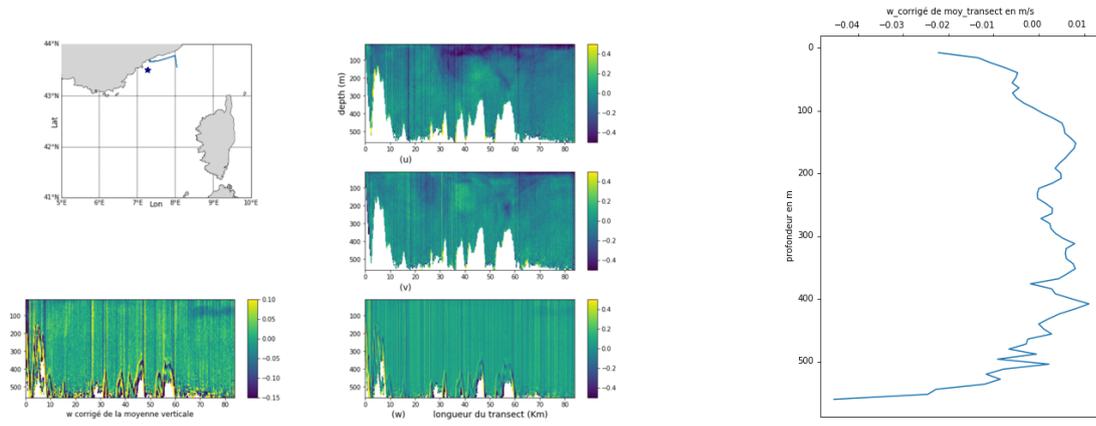
- FUMSECK cruise report. Barrillon *et al.*, 2020.
<https://archimer.ifremer.fr/doc/00636/74854/>
- Mise en place d'une nouvelle méthodologie pour la mesure *in situ* des vitesses verticales océaniques grâce aux données de la campagne FUMSECK 2019. Comby, 2020, Rapport de stage de M2 Océanographie physique et biogéochimique. Université d'Aix-Marseille.
- *Notes sur la Circulation Générale en Méditerranée pour le cours d'Océanographie Générale*. Doglioli, 2019. Université d'Aix-Marseille.
- Zooplankton diel vertical migration in the Corsica Channel (north-western Mediterranean Sea) detected by a moored acoustic Doppler current profiler. Guerra *et al.*, 2019. <https://doi.org/10.5194/os-15-631-2019>
- Diel vertical migration of zooplankton in the Northeast Atlantic. Heywood, 1996.
- Couplage physique-biologie à fines échelles océanique, analyse des données de FUMSECK. Kieffer, 2020, Rapport de stage de L3 Océanographie physique et biogéochimique. Université d'Aix-Marseille, Marseille, France.
- Measuring velocity and sediment transport with an acoustic Doppler profile. Kostaschuk *et al.*, 2004.
- The role of Submesoscale currents in structuring marine ecosystems. Lévy *et al.*, 2018
- The impact of Submesoscale physics on primary productivity of plankton. Mahadevan, 2016. <https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev-marine-010814-015912>
- A multiplatform experiment to unravel meso- and submesoscale processes in an intense front (AlborEx). Pascual *et al.*, 2017. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00039>
- Micronecton et macroplancton en Mer Ligure : migrations nyctémérales et distributions verticales. Sardou & Andersen, 1993.
- Challenges for Sustained Observing and Forecasting Systems in the Mediterranean Sea. Tintoré *et al.*, 2019.
https://www.researchgate.net/publication/335790186_Challenges_for_Sustained_Observing_and_Forecasting_Systems_in_the_Mediterranean_Sea
- Étude de la circulation à sous méso-échelle et ses implications sur la bio-géochimie grâce aux mesures de la campagne PROTEVS-SWOT 2018. Tzortzis, 2019, Rapport de stage de M2 Océanographie physique et biogéochimique. Université d'Aix-Marseille, Marseille, France.

Annexes









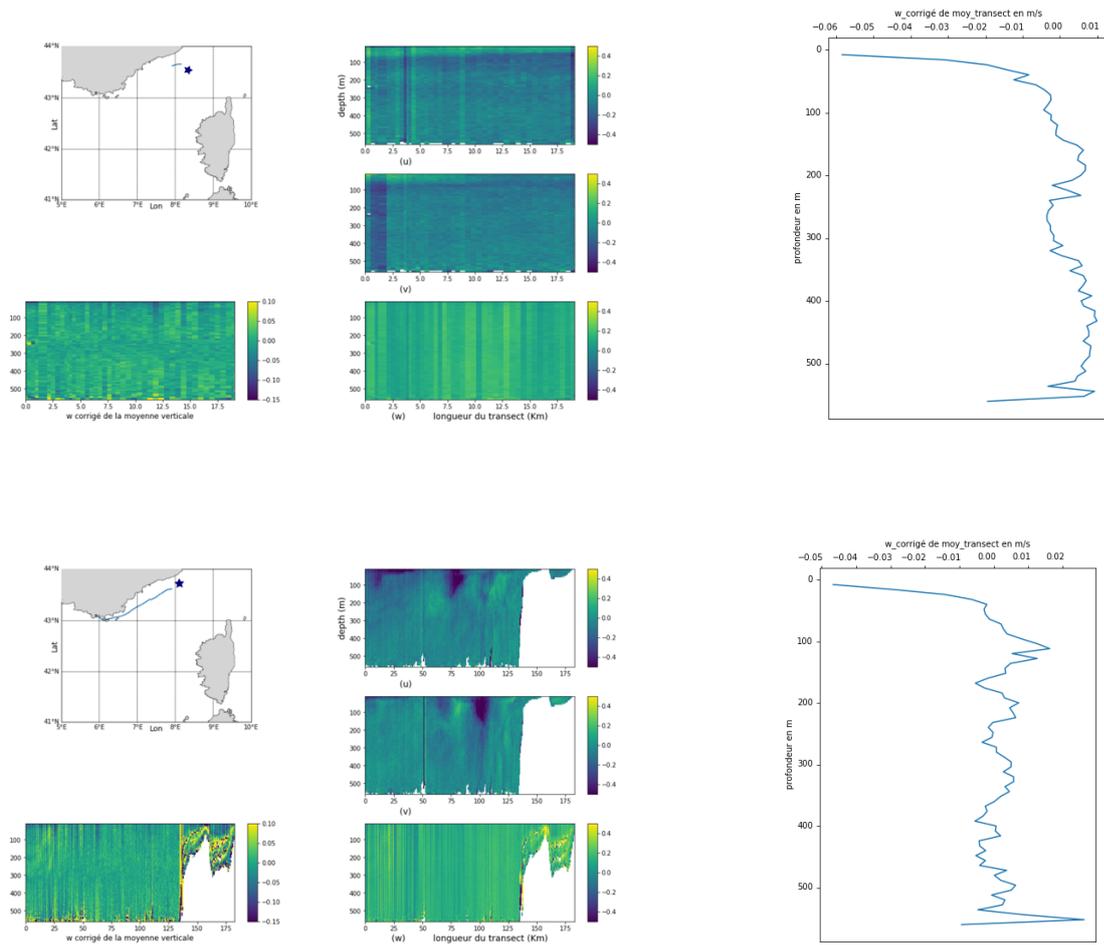


Figure 10 – Mise en regard, pour chaque transect, de son tracé géographique (en haut à gauche), des composantes de vitesse u , v , w (m/s, à droite) avec la visualisation de w corrigée (m/s, en bas à gauche) en fonction de la profondeur (m) et de la distance parcourue (km). Le début des transects est repéré par une étoile bleue.

Ce document a été réalisé sous Word, à l'aide de Python (suite Anaconda) et d'Inkscape pour les figures. Les données sont celles de l'ADCP de coque de la campagne FUMSECK 2019 (Institut Méditerranéen d'Océanologie). Mes codes sont disponibles sur : <https://github.com/O-Sue/Stage-MIO>

Abstract

Keywords : Fine scale processes ; FUMSECK campaign ; hull-mounted ADCP ; Ligurian Sea ; vertical velocity component.

The lack of *in situ* data for the study of fine-scale ocean processes is a real hindrance in this field of research because it constitutes a gap that needs to be filled in order to support existing models. Consequently, it does not yet allow a good understanding of the ephemeral processes of all kinds in action at this scale. In particular, the measurement of the vertical velocity component, which is the subject of this internship report, remains complicated because it has a smaller order of magnitude than the horizontal components (mm/s *versus* cm/s). During the FUMSECK campaign in the Ligurian Sea that took place from April 30 to May 7, 2019, various Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP), instruments usually used for horizontal components, were used on this measurement in order to evaluate their potentialities and limitations and to propose new methodologies. This report presents a first simple processing of the vertical velocity data acquired continuously by hull-mounted ADCP. The correction consists in the subtraction of the vertical speed of the vessel from the raw results. A few vertical movements are highlighted and discussed. Finally, in connection with a master's level internship, the bias and the standard deviation extracted from this first treatment is compared with those obtained using other measuring instruments used in an original way. The generalization of a valid vertical velocity component measurement would be the occasion of a major breakthrough in oceanography.

Résumé

Mots clefs : ADCP de coque ; campagne FUMSECK ; composante verticale de vitesse ; mer Ligure ; processus de fines échelles.

Le manque de données *in situ* pour l'étude des processus de fines échelles océaniques est un véritable frein dans ce champ de recherche car il constitue un trou à combler dans le but de venir en appui aux modèles existants. Cela ne permet pas encore, par voie de conséquence, de bien cerner les processus éphémères de toutes natures en action à cette échelle. Notamment, la mesure de la composante verticale de vitesse, objet de ce rapport de stage, reste complexe car elle est d'un ordre de grandeur inférieur à celui des composantes horizontales (mm/s *versus* cm/s). Lors de la campagne FUMSECK en mer Ligure qui eut lieu du 30 avril au 7 mai 2019, divers courantomètres à effet Doppler (*Acoustic Doppler Current Profilers*, ADCP), instruments habituellement utilisés pour les composantes horizontales, ont été employés pour cette mesure afin d'évaluer leurs potentialités et limites et proposer de nouvelles méthodologies. Ce rapport présente un premier traitement simple des données de vitesses verticales acquises en continu par ADCP de coque. La correction consiste en la soustraction de la vitesse verticale du bateau des résultats bruts. Quelques mouvements verticaux sont mis en évidence et discutés. Enfin, en lien avec un travail de stage de niveau master, le biais et l'écart type extraits de ce premier traitement sont comparés à ceux obtenus via d'autres instruments de mesures employés de façon originale. La généralisation d'une mesure de composante verticale de vitesse fiable serait l'occasion d'une avancée majeure en océanographie.