
MASTER SCIENCES DE LA MER

Parcours : Océanographie Physique et Biogéochimique

Caroline COMBY

**Mise en place d'une nouvelle méthodologie pour la
mesure *in situ* des vitesses verticales océaniques
grâce aux données de la campagne FUMSECK 2019**

Rapport de Stage réalisé au sein du laboratoire :

Institut Méditerranéen d'Océanologie

Sous la Direction de :

Stéphanie BARRILLON et Anne PETRENKO

Année Universitaire : 2019–2020

Résumé

La connaissance des vitesses verticales, point essentiel de l'étude des processus physiques de fine échelle dans les couches superficielles de l'océan, est indispensable à la compréhension des processus de production biologique. Cependant, le défi que représente leur acquisition *in situ*, et l'ordre de grandeur de cette composante inférieur à celui des composantes horizontales, entraînent souvent la négligence de ces vitesses dans les études de terrain. La campagne FUMSECK, réalisée dans le golfe de Gênes du 30 avril au 07 mai 2019, a permis de récolter des mesures *in situ* de vitesses verticales à l'aide d'instruments conventionnels mais utilisés de manière originale, notamment des profileurs de courant acoustiques à effet doppler (*Acoustic Doppler Current Profilers*, ADCP). L'analyse de ces données, objet de ce rapport, a nécessité la mise en place d'une chaîne de traitement originale, développée dans un premier temps pour les données du 5^{ème} faisceau d'un Sentinel V (ADCP nouvelle génération), puis généralisée à d'autres types d'enregistrement acoustique de vitesses verticales. Grâce à cette méthode, les mesures de vitesse verticales atteignent un ordre de grandeur correspondant au mm.s^{-1} attendu pour cette composante. La mise en parallèle de ces résultats *in situ* ponctuels à des mesures satellites de courantologie altimétrique, de température de surface et d'abondance chlorophyllienne, ainsi qu'aux mesures *in situ* continues de physique et de biologie, aboutit à une vision tridimensionnelle de la dynamique de fine échelle en place dans la zone d'étude. Les résultats prometteurs de cette étude innovante ouvrent donc la possibilité d'une généralisation de la mesure *in situ* des vitesses verticales océaniques.

Mots clefs : vitesses verticales ; processus de fine échelle ; campagne FUMSECK ; ADCP.

Abstract

Vertical velocities knowledge is essential to study fine-scale physical processes in the surface layers of the ocean and to understand biological production mechanisms. However, these vertical velocities are often neglected due to mainly two reasons: their order of magnitude (mm.s^{-1}) lower than the one of the horizontal velocities (cm.s^{-1}), and the challenge of this *in situ* measurement. The FUMSECK cruise, which took place in spring 2019, in the gulf of Genoa, collected *in situ* measurements of vertical velocities using various instruments, including Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP). The analysis of these data, object of this report, required the elaboration of an original processing chain, first developed for the data of the 5th beam of a Sentinel V (ADCP next generation), then generalized to other types of acoustic recording of vertical velocities. We obtain vertical velocity estimates of the order of mm.s^{-1} , as expected, and we show the accuracy of these measurements for all datasets. Finally, the complementary use of satellite data (sea surface temperature, chlorophyll concentration, altimetric currents), together with the continuous *in situ* physical and biological measurements, result in a three-dimensional view of fine-scale dynamics. Therefore, the promising results of this innovative study open up the possibility of generalizing *in situ* vertical velocity measurements in the ocean.

Key words: vertical velocities; FUMSECK cruise; fine-scale processes; ADCP.

Remerciements

Je souhaite tout d'abord remercier Stéphanie Barrillon et Anne Petrenko qui m'ont encadrée et accompagnée tout au long de ce semestre de stage, pour leur implication, leur disponibilité et leurs nombreux encouragements.

Par ailleurs, je tiens particulièrement à remercier Andrea Doglioli, Gérald Grégori, Jean-Luc Fuda et Roxane Tzortzis, pour leur implication dans nos réunions hebdomadaires toujours plus longues que prévues mais remplies par leurs conseils judicieux, et ce dans une ambiance de travail, puis de télétravail, particulièrement agréable.

De plus, je remercie Jean-Luc Fuda qui a effectué l'analyse des données FF-ADCP permettant une comparaison des données *in situ* complète et aboutie. En outre, par ses nombreuses interventions, il a su guider mes pistes de réflexion dans le traitement des données ADCP.

De même, je remercie Kévin Grangier pour ses éclairages précieux sur le fonctionnement si particulier du Sentinel V.

Enfin, je tiens à adresser mes remerciements les plus chaleureux à l'ensemble de cette équipe de travail qui, malgré un chamboulement drastique dans le déroulé de ce stage du fait de l'épidémie de Covid-19, a su rester disponible, à l'écoute et mobilisée pour l'aboutissement de ce travail de recherche.

Sommaire

1	Introduction.....	2
2	Matériel et méthodes.....	4
2.1	Déploiement des instruments et stratégie d'échantillonnage	4
2.2	Chaine d'analyse des mesures acoustiques de vitesses verticales	5
2.2.1	Préparation des jeux de données (étapes 0 et 1)	5
2.2.2	Angles d'attitude des ADCP et généralisation en convention sphérique (étape 2)	6
2.2.3	Changement de référentiel et corrections par projection (étape 3).....	7
2.2.4	Calcul des vitesses verticales absolues (étape 4).....	8
2.2.5	Lissage et coupure des extrémités de profils (étapes 6 et 7).....	8
2.3	Mesures satellites	10
3	Résultats.....	10
3.1	Mesures de vitesses verticales par le Sentinel V.....	10
3.2	Comparaison des différents résultats de vitesses verticales en station	12
3.3	Étude de la dynamique tridimensionnelle de la zone d'étude FUMSECK.....	15
3.3.1	Analyse satellite et courantologie horizontale	15
3.3.2	Analyse satellite de l'environnement physico-chimique.....	16
4	Discussion.....	18
4.1	Comparaison des méthodes de déploiement	18
4.2	Étude bilan de la dynamique 3D	21
5	Conclusions et perspectives	22
	Références.....	24

1 Introduction

La dynamique océanique constitue le moteur principal de la régulation du climat mondial par sa capacité à absorber la majeure partie de l'excès de chaleur à la surface terrestre ainsi qu'une quantité importante du dioxyde de carbone (CO₂), gaz à effet de serre produit massivement par les activités anthropiques. La description de cette dynamique a débuté au XX^{ème} siècle avec des observations de la circulation océanique générale à grande échelle (i.e. structures de taille supérieure à 100 km et de durée de vie dépassant plusieurs mois). Par la suite, les études de dynamique océanique se sont attaquées à l'étude de la turbulence à micro-échelle (i.e. structures de taille inférieure à 0.1 km et de durée de vie inférieure à la journée). En revanche, les processus intermédiaires, de mésoéchelle (i.e. structures de taille comprise entre 50 et 100 km et de durée de vie de quelques semaines à plusieurs mois) et de sous-mésoéchelle, n'ont été observés et pris en compte que plus récemment (Richardson, 1983).

Les structures de sous-mésoéchelle sont caractérisées par des échelles spatio-temporelles typiques : une échelle spatiale horizontale couvrant 0.1 à 50 km, une échelle spatiale verticale pouvant s'étendre de 0.1 à 1 km de profondeur, ainsi qu'une durée de vie allant de quelques jours à quelques semaines pour les processus physiques et biologiques générés dans ces structures (Ferrari and Wunsch, 2009). En outre, ces petites structures sont agéostrophiques et leur dynamique devient nécessairement tridimensionnelle (Capet *et al.*, 2008, McWilliams, 2016).

Le diagramme de Dickey (2003) décrit la diagonale de tous les processus océaniques. Aujourd'hui les processus hydrodynamiques considérés comme appartenant à la mésoéchelle et à la sous-mésoéchelle (regroupées sous le terme « fine échelle ») se retrouvent dans ce diagramme, et concordent avec l'activité biologique, essentiellement planctonique, dans l'océan. L'étude des processus physiques de fine échelle dans les couches superficielles de l'océan est indispensable à la compréhension des processus de production biologique (Lévy, 2008, McGillicuddy, 2016).

Par ailleurs, parmi les processus de fine échelle, la détermination des vitesses verticales peut être placée au cœur des études menées sur la pompe biologique du CO₂. En effet, avec l'émergence de la problématique du réchauffement climatique lié au forçage du cycle du carbone par les activités anthropiques, l'estimation des vitesses verticales apporte une information essentielle pour une meilleure représentation de la production biologique et des budgets biogéochimiques. Ces vitesses verticales ont un impact sur l'efficacité de la pompe biologique de par leur influence sur la dispersion et la dynamique des flux verticaux des éléments nutritifs et de l'énergie turbulente qui impactent le plancton (Martin *et al.*, 2001, Lévy *et al.*, 2012, Mahadevan, 2016, McGillicuddy, 2016, Rousselet *et al.*, 2019).

Actuellement, les mesures *in situ* de courantologie sont déterminées en routine à partir des composantes horizontales de la vitesse du courant (vitesses méridionale et zonale). En effet, de très nombreuses données,

récoltées systématiquement lors des campagnes en mer, et complétées depuis la fin du XX^{ème} siècle par l'utilisation de l'imagerie satellite, permettent aujourd'hui d'obtenir des indications à haute résolution spatio-temporelle sur les courants barotropes de surface. A contrario, les vitesses verticales ne sont pas mesurées directement et sont pour le moment seulement estimées par des calculs théoriques avec notamment l'utilisation de l'équation oméga (Fiekas *et al.*, 1994, Strass, 1994), ci-après notée équation- ω .

Lorsque les vitesses verticales ne sont pas négligées en première approximation, ce sont leurs estimations théoriques ou issues de modèles qui interviennent dans les études, du fait de l'absence de mesures *in situ*. En effet, leur ordre de grandeur de quelques mm.s^{-1} est largement inférieur à celui des vitesses horizontales (de plusieurs cm.s^{-1}). Ainsi, la mesure directe *in situ* des vitesses verticales constitue actuellement l'un des plus grands défis en océanographie, d'où la nécessité de développer des instruments dédiés à haute précision de mesure. De plus, le caractère éphémère de ces structures complexifie leur échantillonnage *in situ* (Petrenko *et al.*, 2017). Ce type de mesures doit donc être mis en place dans des régions océaniques si possible caractérisées par la présence d'une dynamique de sous-mésoéchelle, afin de s'assurer de l'existence de vitesses verticales significatives.

La campagne FUMSECK (*Facilities for Updating the Mediterranean Submesoscale – Ecosystem Coupling Knowledge*, Barrillon, 2019, <https://doi.org/10.17600/18001155>) s'est inscrite dans ce cadre d'étude. Réalisée au printemps 2019 en mer Ligure, cette campagne a eu pour objectif principal d'effectuer différents tests technologiques, d'une part, sur des instruments usuellement déployés lors d'études des processus de méso- à sous-mésoéchelle, et, d'autre part, sur divers développements instrumentaux de mesure des vitesses verticales.

La mer Ligure se situe au Nord-Ouest de la mer Méditerranée, et est caractérisée par une circulation générale anti-horaire dite « cyclonique ». Cette circulation générale est la résultante de la jonction en surface des courants Ouest Corse et Est Corse, au niveau du détroit de Corse, en un unique courant, le courant Nord (ou Liguro-Provenço-Catalan) se dirigeant vers l'Ouest du bassin Nord-occidental, et dont une partie peut prendre une direction offshore au niveau des Baléares (Millot, 1999 ; Millot and Taupier-Letage, 2005).

Les structures de sous-mésoéchelle dans cette région ont récemment fait l'objet d'une étude approfondie suite à la campagne OSCAHR (*Observing Submesoscale Coupling At High Resolution*, Doglioli, 2015, <https://doi.org/10.17600/15008800>). Ainsi, nous savons que cette zone d'étude est marquée par la présence d'une circulation agéostrophique tridimensionnelle, détectable en surface par la présence de FSLE (*Finite Size Lyapunov Exponent*), impliquant la présence de mouvement verticaux dans la couche de surface (Rousselet, 2018).

Les résultats issus de la campagne OSCAHR sur les vitesses verticales, obtenus par calculs théoriques à l'aide de la version Q-vector de l'équation- ω (Rudnick, 1996, Rousselet, 2018), sont issus d'une approche

indirecte dans l'analyse des mouvements verticaux. Les différents jeux de données acquis lors de la campagne FUMSECK ont pour objectif non plus d'estimer ces vitesses verticales avec l'équation- ω , mais d'en obtenir une mesure directe, *in situ*, en utilisant plusieurs outils, basés soit sur l'acoustique : Sentinel V, L-ADCP classique, *free-fall*¹ ADCP (FF-ADCP) ; soit sur des variations de modèle de vol des instruments immergés : glider SeaExplorer, et nouveau prototype *Vertical Velocity Profiler* (VVP).

De nombreuses questions se posent autour de ce volet de la campagne FUMSECK. La sensibilité des capteurs est-elle suffisante pour que des mesures en profil vertical permettent d'atteindre des vitesses verticales de l'ordre du mm.s^{-1} ? Quelle variabilité va être observée entre les différents instruments ? Pouvons-nous, à partir de ces mesures *in situ*, en déduire une dynamique tridimensionnelle cohérente dans la zone d'étude ?

L'objectif de ce travail de stage est, dans un premier volet, de mettre en place une méthode généralisée pour le traitement des données acoustiques de courantologie verticale ; puis, dans un second volet, de l'appliquer à différents jeux de données afin d'en comparer les résultats. Pour cela, nous utiliserons les mesures des ADCP déployés en station avec, pour principal appui, les jeux de données issus du Sentinel V, ainsi que du L-ADCP classique. Enfin, dans un troisième volet, nous replacerons ces informations sur la vitesse verticale dans un contexte de dynamique tridimensionnelle de fine échelle.

2 Matériel et méthodes

2.1 Déploiement des instruments et stratégie d'échantillonnage

Deux instruments de mesure acoustique développés par Teledyne RD Instrument ont été déployés *in situ* en station : un Sentinel V 500 kHz (ADCP possédant, en plus des quatre faisceaux classiques, un cinquième faisceau vertical pour une mesure directe de la composante verticale du courant), et un *Lowered - Acoustic Doppler Current Profiler Workhorse* 300 kHz (L-ADCP, instrument possédant quatre faisceaux pour une description 3D du courant). Ces deux ADCP ont été fixés sous une sonde *Conductivity–Temperature–Depth* (CTD) SeaBird SBE 911+, et déployés l'un après l'autre sur 6 stations dans les 150 premiers mètres de la colonne d'eau. Notons que les stations ont été choisies de manière à quadriller la zone d'étude en effectuant des transects en forme de papillon, comme montré dans la Fig. 1. L'immersion a été réalisée à une profondeur fixe (d'environ 10 m) durant 10 minutes dans un premier temps, puis en réalisant successivement trois profils verticaux entre la surface et 150 m. Cette technique d'échantillonnage est mise en œuvre depuis plusieurs décennies pour l'établissement de profils verticaux de courants horizontaux (Firing and Gordon, 1990, Fisher and Visbeck, 1993, Polzin *et al.*, 2002), mais ce n'est que très récemment qu'elle a été appliquée spécifiquement pour la mesure des vitesses verticales (Thurnherr, 2011).

¹ Les mots en italique sont soit d'origine latine soit des termes anglais.

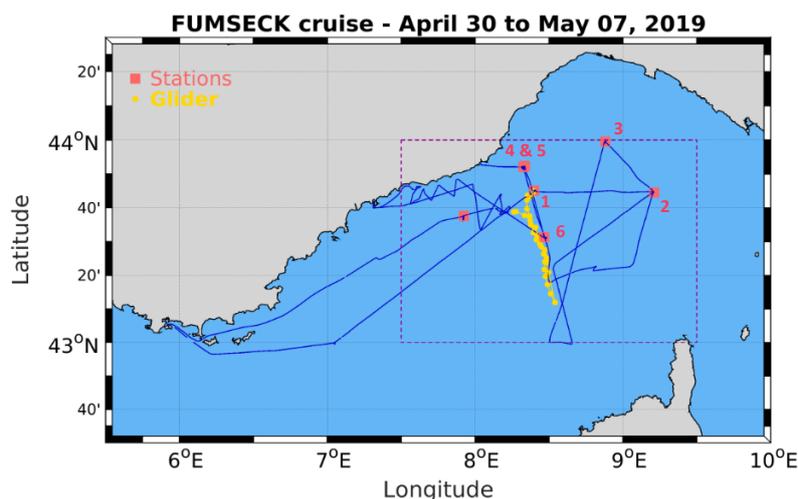


Fig. 1 Positionnement des stations "vitesses verticales" (en rouge, avec leur numéro) et transect aller-retour du glider SeaExplorer (points jaunes). Ces données sont superposées au trajet parcouru par le navire océanographique Téthys II lors de la campagne FUMSECK (bleu).

Afin d'éviter toute interférence acoustique dans les mesures entre instruments, les ADCP ont été utilisés alternativement sur chacune des stations durant la campagne. Seule la station n°4 n'a pu être échantillonnée qu'avec le Sentinel V, du fait d'une houle trop forte au moment des mesures pour la poursuite de la station avec le L-ADCP.

Par ailleurs un glider SeaExplorer a été déployé lors de la campagne FUMSECK, entre 43.2 et 43.7°N. Cet instrument semi-autonome a réalisé un transect suivant une trajectoire du satellite Sentinel 3B, traversant notamment les stations n°1 et 6 (Fig. 1).

2.2 Chaîne d'analyse des mesures acoustiques de vitesses verticales

Lorsque le Sentinel V est immergé dans la colonne d'eau, son orientation est libre de s'écarter de la verticale gravimétrique du fait des nombreuses forces s'appliquant sur le dispositif CTD-ADCP. En effet, en plus de son poids, viennent s'ajouter la force de rappel du bateau (relié aux instruments par le câble électroporteur), les courants horizontaux, la houle, etc. Cet écart d'orientation par rapport à la verticale doit absolument être pris en compte lors du traitement des données issues du 5^{ème} faisceau (dans l'axe directeur de l'instrument) du Sentinel V. De même, l'ensemble des forces mentionnées ci-dessus agissent sur l'instrument et entraînent des anomalies de vitesses verticales qui doivent impérativement être corrigées. C'est donc l'objet de la chaîne d'analyse développée ci-dessous.

2.2.1 Préparation des jeux de données (étapes 0 et 1)

Avant d'effectuer tout traitement sur les mesures, il est nécessaire de réaliser deux étapes au préalable.

En effet, la méthode d'analyse faisant intervenir deux ensembles de données (les données CTD, et les données ADCP), il est tout d'abord essentiel de synchroniser ces deux séquences (étape 0). Pour cela, un

lissage temporel d'une période de 1 Hz est appliqué sur la séquence CTD, initialement acquise à une fréquence de 24 Hz. À la suite de ce lissage, les séquences CTD et ADCP vont être synchronisées en temps : la distribution des différences de pression entre les deux lots de données est évaluée en fonction du décalage en temps imposé sur l'une des séquences, la synchronisation est optimale lorsque l'écart-type de cette distribution est minimal. Une grande attention est apportée aux éventuels manques de données de l'un ou l'autre des instruments qui impliqueraient une désynchronisation d'une partie des données. Par la suite, une sélection des données selon différents critères de qualité permet d'en écarter les mesures potentiellement erronées (étape 1). Ces critères de qualité sont basés sur :

- une intensité de l'écho supérieure à 40 *counts* (les *counts* représentent une échelle linéaire de qualité de la donnée comprise entre 0 (i.e. mauvaise qualité) et 255 (i.e. qualité parfaite)) ;
- une corrélation du signal supérieure à 64 *counts* ;
- une erreur de vitesse verticale estimée par les quatre faisceaux (*error velocity*) inférieure à 0.1 m.s⁻¹ (deux estimations de vitesse verticales étant possibles par les 4 faisceaux, l'*error velocity* représente la différence entre les deux).

2.2.2 Angles d'attitude des ADCP et généralisation en convention sphérique (étape 2)

Le compas magnétique intégré à l'ADCP permet de déterminer l'orientation de l'instrument dans la colonne d'eau. Cette orientation est caractérisée par trois angles d'attitude, aussi appelés « angles de cardant » : tangage (*pitch*), roulis (*roll*) et cap (*heading*).

Les valeurs des angles mesurées par les instruments de Télédynne RDI suivent une convention basée sur des intervalles compris entre 0° et ± 90° (RD Instrument 2008, Fig. 2). Une telle convention, initialement adoptée pour des déploiements en mouillage fixe, n'est pas optimale pour une utilisation généralisée en profil vertical dans la colonne d'eau. En effet, cette convention ne permet pas de distinguer la direction des faisceaux de l'instrument (vers la surface ou le fond) ce qui implique d'adapter le référentiel de mesure à chaque utilisation.

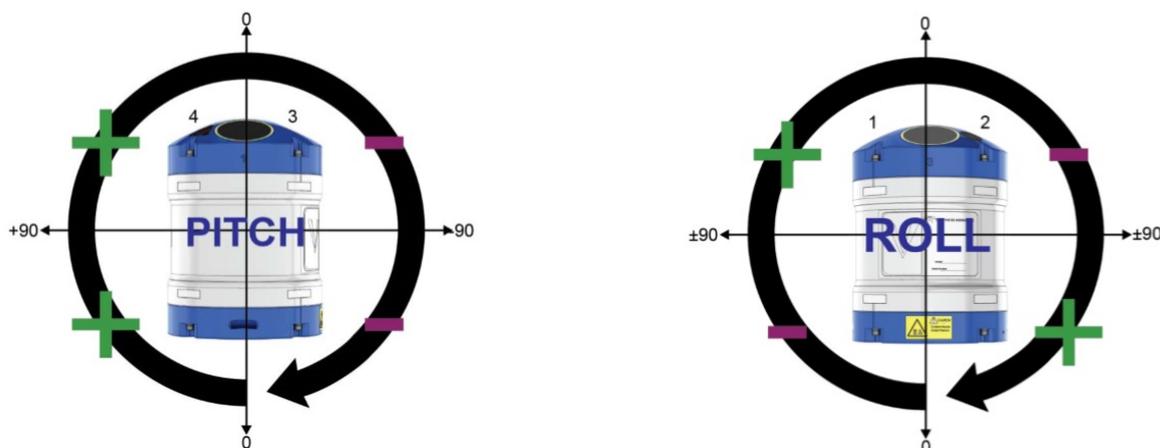


Fig. 2 Convention RDI attribuée aux données de *Pitch* et *Roll* issue de RD Instrument (2008).

C'est pourquoi la généralisation en convention sphérique, caractérisée par une convention basée sur des intervalles angulaires compris entre 0 et 360°, a été réalisée. Cette convention sphérique est bien plus propice au traitement des données : d'une part, elle permet de s'affranchir de l'adaptation du référentiel de mesure à chaque utilisation du Sentinel V et, d'autre part, elle est applicable à tout type d'enregistrements effectués par d'autres ADCP basés sur des conventions diverses.

2.2.3 Changement de référentiel et corrections par projection (étape 3)

Lorsque l'orientation du Sentinel V s'écarte de la verticale gravimétrique, le cinquième faisceau de l'ADCP enregistre un signal résultant de différentes proportions des composantes à la fois horizontales et verticale du courant. Cet effet est d'autant plus marqué du fait des ordres de grandeurs significativement différents entre ces trois composantes : de l'ordre du cm.s^{-1} pour les deux composantes horizontales, de l'ordre du mm.s^{-1} pour la composante verticale. Afin d'obtenir uniquement la composante verticale du courant, il est donc nécessaire de corriger la mesure du cinquième faisceau de l'ADCP. Cette correction est applicable par l'utilisation de matrices de rotation qui ont pour effet de projeter tout vecteur mesuré dans un référentiel donné vers un autre. Ici, l'utilisation des rotations autour des axes du Sentinel V, listés ci-dessous, permettent de projeter tout vecteur initialement exprimé dans le référentiel de l'instrument (en disposant des angles en convention sphérique) vers le référentiel terrestre :

- *Heading* (H, rotation horaire autour de l'axe du 5^{ème} faisceau) ;
- *Pitch* (P, rotation trigonométrique autour de l'axe X – *beam 1 to beam 2*) ;
- *Roll* (R, rotation trigonométrique autour de l'axe Y – *beam 3 to beam 4*).

Les rotations doivent être appliquées successivement, suivant H.-P.R, afin d'obtenir les coordonnées du vecteur vitesse dans le référentiel terrestre, selon le produit matriciel ci-dessous :

$$M = \begin{bmatrix} \cos H & \sin H & 0 \\ -\sin H & \cos H & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos P & -\sin P \\ 0 & \sin P & \cos P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos R & 0 & -\sin R \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin R & 0 & \cos R \end{bmatrix}$$

L'application de cette matrice de passage M aux composantes de la vitesse mesurées dans le référentiel du Sentinel V (u_s, v_s, w_s), permet d'obtenir ces mêmes composantes, dans le référentiel terrestre (u_t, v_t, w_t) selon la formule suivante :

$$\begin{bmatrix} u_t \\ v_t \\ w_t \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} u_s \\ v_s \\ w_s \end{bmatrix}$$

À partir des mesures des composantes u_t et v_t , issues des quatre faisceaux, ainsi que de la composante w_s issue du cinquième faisceau, et sachant que cette matrice de passage est inversible, nous pouvons calculer la composante verticale du courant dans le référentiel terrestre (w_t) selon :

$$w_t = \frac{w_s + u_t (\cos H \sin R + \sin H \sin P \cos R) + v_t (-\sin H \sin R + \cos H \sin P \cos R)}{\cos P \cos R}$$

Par ailleurs, il est important de noter que cette étape de changement de référentiel, spécifique à la mesure de vitesse acquise par le 5^{ème} faisceau du Sentinel V, n'intervient pas dans la chaîne de traitement des données mesurées par les quatre faisceaux du Sentinel V et des ADCP plus classiques, si les données utilisées sont déjà en référentiel terrestre.

Par la suite (étape 5), les données w_t doivent être associées aux profondeurs adéquates dans le référentiel terrestre. Pour cela, le principe reste le même, il est possible de verticaliser la cellule acoustique dans laquelle la vitesse a été échantillonnée en appliquant la matrice M au vecteur position de la cellule (x_s , y_s , z_s).

2.2.4 Calcul des vitesses verticales absolues (étape 4)

Une fois le changement de référentiel effectué, il est nécessaire de calculer la vitesse verticale absolue dans la colonne d'eau (w). Pour cela, nous considérons que la mesure de la composante verticale du courant donnée dans le référentiel terrestre (w_t , axe vertical vers le zénith) est la résultante de deux composantes verticales, exprimées dans le même référentiel (axe vertical vers le zénith) :

- la vitesse verticale du courant dans la colonne d'eau w ;
- la vitesse verticale des instruments w_{CTD} . Elle est calculée à partir de l'approximation hydrostatique, en considérant :

$$w_{CTD} = -\frac{1}{\rho g} \frac{\partial p}{\partial t}$$

On peut donc aisément en déduire la vitesse verticale océanique selon :

$$w = w_t + w_{CTD}$$

2.2.5 Lissage et coupure des extrémités de profils (étapes 6 et 7)

Dans un dernier temps, deux étapes sont appliquées afin de finaliser cette chaîne de traitement des données.

Les mesures de l'ADCP par émission de faisceau (une mesure par "ping", toutes les secondes) sont entachées d'erreurs qu'il est possible de diminuer par un traitement statistique et, en particulier, par un lissage temporel. Celui-ci a été optimisé avec une fenêtre de 20 secondes. De cette manière, les fluctuations de plus haute fréquence, attribuées à un bruit sur la mesure, sont filtrées.

Enfin, du fait de cette approche statistique, une coupure aux extrémités supérieures et inférieures des profils verticaux de w permet de s'affranchir des potentiels effets de biais liés à un effectif de données beaucoup plus faible (moins de 50 mesures) à ces extrémités.

En effet, le déploiement en « yo-yo » entre la surface et le fond du profil se faisant à une vitesse d'environ 1 m.s^{-1} , le corps du profil est échantillonné un grand nombre de fois durant le mouvement descendant/ascendant du fait de la portée de l'ADCP utilisé (entre 30 et 50 m). Ainsi, il y a augmentation de l'effectif des mesures sur l'épaisseur définie par la portée de l'instrument lorsque ce dernier se déplace dans cette même épaisseur. En revanche, les extrémités des profils présentent un déficit du nombre de données du fait de cette technique de déploiement car il n'y a pas de compensation de la durée d'échantillonnage par la portée de la mesure dans ces zones. D'où la mise en place d'une coupure de 10 mètres lorsque l'ADCP est en surface, et une coupure de 20 mètres lorsqu'il se situe au bas du profil.

En résumé, l'ensemble des étapes de traitement appliquées sur les données du Sentinel V sont représentées dans l'organigramme ci-dessous, ainsi que les profils de vitesses verticales avant et après l'application de la chaîne de traitement pour la station 6 (Fig. 3).

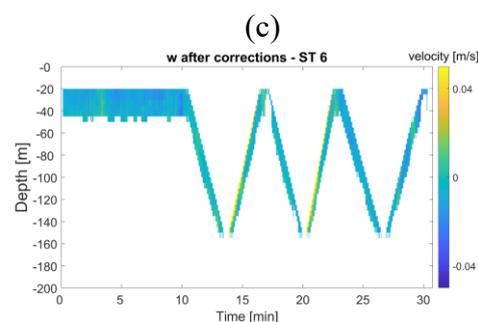
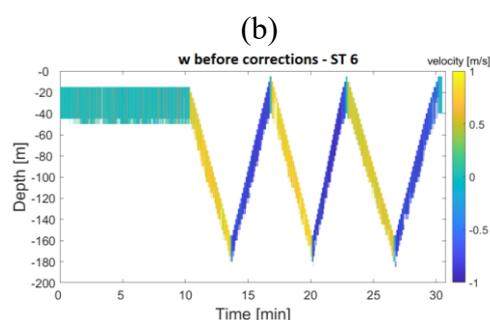
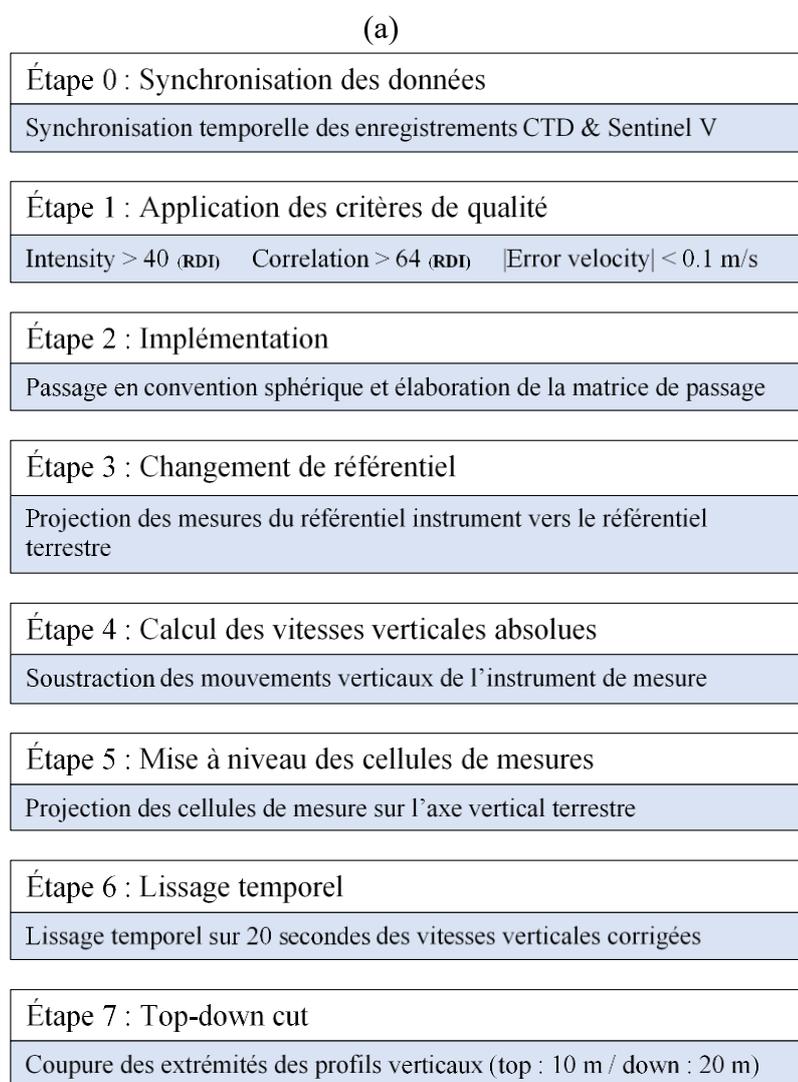


Fig. 3 Organigramme des étapes d'analyse de la mesure acoustique de vitesses verticales océaniques. Seule l'étape 3 est spécifique aux mesures acquises par le 5^{ème} faisceau du Sentinel V. Les profils de vitesses verticales avant (b) et après (c) l'application de la chaîne de traitement sont représentés en fonction du temps et de la profondeur pour les mesures *in situ* au niveau de la station 6 de FUMSECK.

2.3 Mesures satellites

Les mesures effectuées par différents satellites fournissent des informations essentielles sur l'environnement physico-chimique de surface dans la zone d'étude. Les données satellitaires utilisées durant la campagne FUMSECK ont été téléchargées sur le site web du *Copernicus Marine and Environment Monitoring Service* (CMEMS) et sont disponibles en ligne (<https://spasso.mio.osupytheas.fr/FUMSECK/>). Ces données correspondent aux températures de surface (SST, *Sea Surface Temperature*), ainsi qu'aux concentrations en chlorophylle (dérivée de la couleur de l'océan). Les courants horizontaux de surface, dérivés des mesures altimétriques de l'élévation de la mer (SSH, *Sea Surface Height*), sont quant à eux issus du réseau AVISO (*Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic*). Des calculs lagrangiens utilisant ces courants géostrophiques, tels que les FSLE, permettent de détecter des fronts (d'Ovidio, 2004).

L'ensemble de ces données satellitaires apportent des informations complémentaires à celles obtenues par les mesures *in situ*. De plus, les cartes satellites permettent d'obtenir une vision synoptique de la zone d'étude de la campagne.

3 Résultats

3.1 Mesures de vitesses verticales par le Sentinel V

Les résultats issus de la chaîne d'analyse décrite ci-dessus pour les enregistrements du cinquième faisceau du Sentinel V sont présentés en Fig. 4. Elle présente la vitesse verticale moyenne et son écart-type, en fonction de la profondeur, pour chacune des phases d'échantillonnage et pour chacune des stations.

Une concordance entre les profils en phase d'immersion fixe (à 10 m) et en plongée (*downcasts*) est observable, tandis que les profils enregistrés lors de la remontée du Sentinel V (*upcasts*) se distinguent par une plus grande variabilité de la vitesse verticale moyenne en fonction de la profondeur et des écarts-types plus élevés. Cette spécificité des profils *upcasts* est probablement issue de deux effets conjugués. D'une part, un phénomène de vibration du câble électroporteur, plus important en *upcast* du fait de la tension du câble, peut perturber la mesure. D'autre part, le phénomène de « *ringing* » ou résonance est peut-être plus important en *upcast* pour une raison encore incertaine. En effet, si la dalle acoustique d'un ADCP est encore en train de vibrer, du fait de l'émission du faisceau acoustique, au moment du retour d'une partie de ce signal ayant rétrodiffusé sur la zone proche de la dalle, cela crée une interférence, appelée *ringing* ou résonance. Habituellement, pour éviter ce biais, une zone de « *blanking* » - où la donnée n'est pas prise en compte - est appliquée à proximité immédiate des dalles permettant à ces dernières d'arrêter de vibrer avant que les signaux de retour ne soient enregistrés. Il semble que cette zone ne suffise pas à la remontée. L'analyse des vitesses verticales a donc, par la suite, été réalisée uniquement sur les profils *downcasts*, ce

qui est d'usage courant pour les mesures de vitesses horizontales par ADCP en profil (e.g. Polzin, 2002, Thurnherr, 2012).

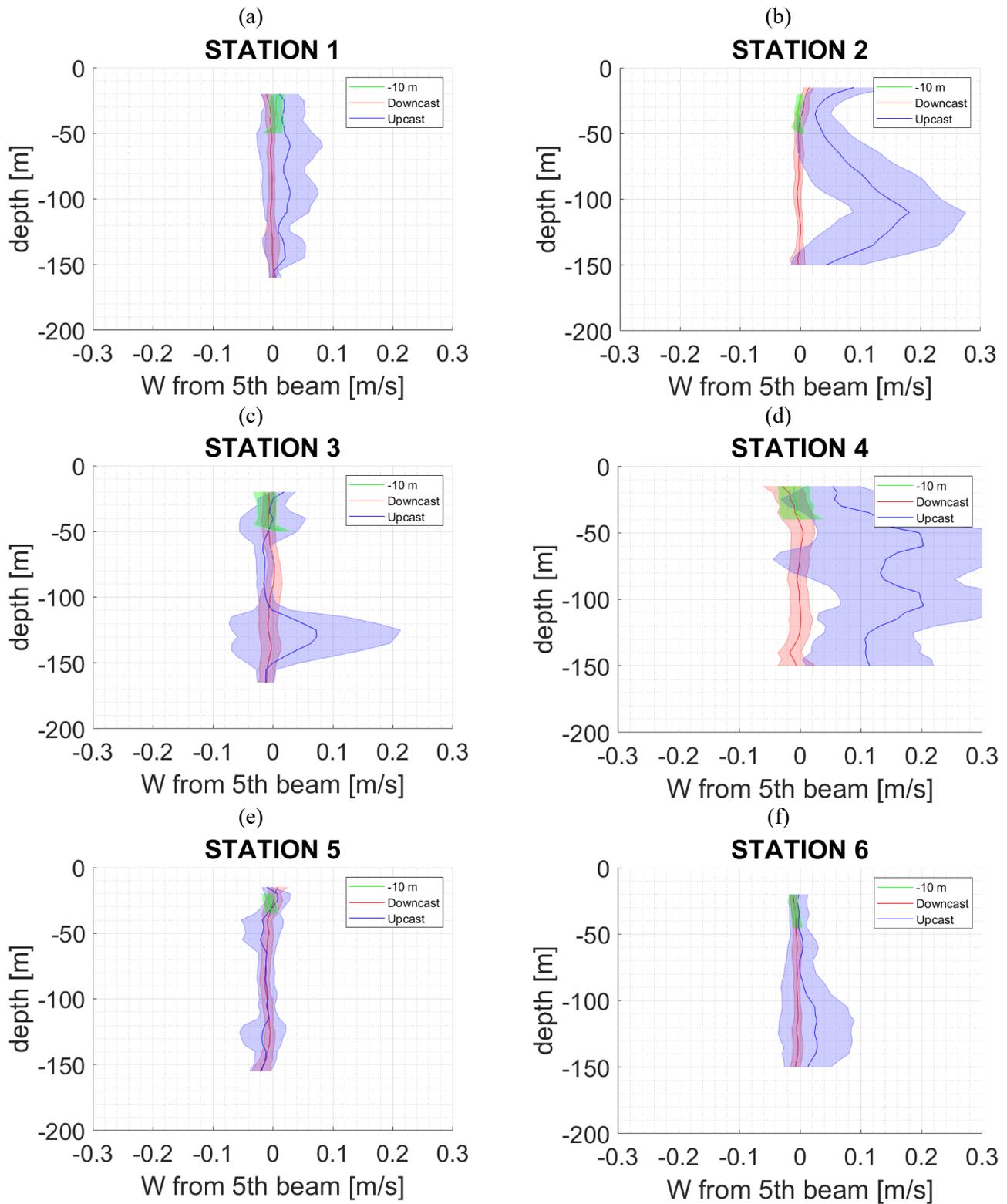


Fig. 4 Vitesses verticales mesurées par le 5^{ème} faisceau du Sentinel V pour les stations 1 à 6 (a à f). Les vitesses verticales moyennes (lignes) et les écarts-types (zones ombrées) sont représentés en fonction de la profondeur pour chacune des phases d'acquisition : fixe à 10 m (vert), *downcast* (rouge), *upcast* (bleu).

L'analyse des profils *downcasts* met en évidence une faible variabilité de la vitesse verticale moyenne enregistrée en fonction de la profondeur. Les ordres de grandeurs obtenus par l'utilisation du Sentinel V (5^{ème} faisceau) sont, pour les moyennes, de l'ordre du mm.s^{-1} , et pour les écarts-types de l'ordre du cm.s^{-1} , ce qui correspond aux ordres de grandeurs attendus d'après le peu de mesures issues de l'équation- ω (Rousselet, 2019) effectuées dans la région étudiée.

Notons qu'initialement, les données brutes de vitesses verticales mesurées par le Sentinel V présentent des écarts-types de l'ordre de plusieurs dizaines de cm.s^{-1} , avec une moyenne de l'ordre du m.s^{-1} , ce qui correspond à l'enregistrement de la composante de vitesse prépondérante : le mouvement vertical de l'instrument (w_{CTD}). L'estimation de la réduction des écarts-types faisant suite à l'analyse des données mise en place est de l'ordre d'un facteur 20 environ.

La méthode de correction a, par la suite, été appliquée aux mesures de vitesses verticales estimées à partir des quatre faisceaux du Sentinel V d'une part, et à celles du L-ADCP d'autre part, les deux fournies par le logiciel de traitement de ces ADCP. Ces mesures, enregistrées selon la même technique de déploiement, doivent être traitées suivant la même chaîne d'analyse, à l'exception de l'étape de changement de référentiel (étape 3) pour des mesures directement acquises en référentiel terrestre, afin de pouvoir comparer les différents résultats entre eux.

3.2 Comparaison des différents résultats de vitesses verticales en station

La méthode d'analyse, développée pour le traitement des données issues du 5^{ème} faisceau du Sentinel V, est appliquée de manière adaptée (en enlevant l'étape 3) aux mesures des vitesses verticales à partir des quatre faisceaux, Sentinel V et L-ADCP. Les vitesses verticales obtenues sont présentées, pour chaque station, en profils verticaux moyens selon chacune des phases d'acquisition dans la Fig. 5. La station 4 n'a pas été échantillonnée par le L-ADCP du fait des conditions météorologiques non propices à son déploiement. En revanche, pour les stations restantes, il est possible d'effectuer la comparaison des deux instruments. Les données obtenues fournissent des profils comparables à ceux du 5^{ème} faisceau. L'ensemble de l'analyse conduit, quel que soit l'instrument, à une réduction significative des valeurs moyennes et des écarts-types des vitesses verticales pour atteindre les ordres de grandeurs attendus.

De plus, on peut observer que l'on retrouve la présence des effets de vibration du câble et de *ringing* mentionnés précédemment sur les *upcasts* des stations 3 et 4 (Fig. 5 c1, c2 et d1). Ainsi, malgré le bon accord des enregistrements entre les phases *downcast* et *upcast* sur les autres stations et pour les deux instruments, seuls les profils *downcast* permettent de s'affranchir de ce biais pour la comparaison des résultats entre eux.

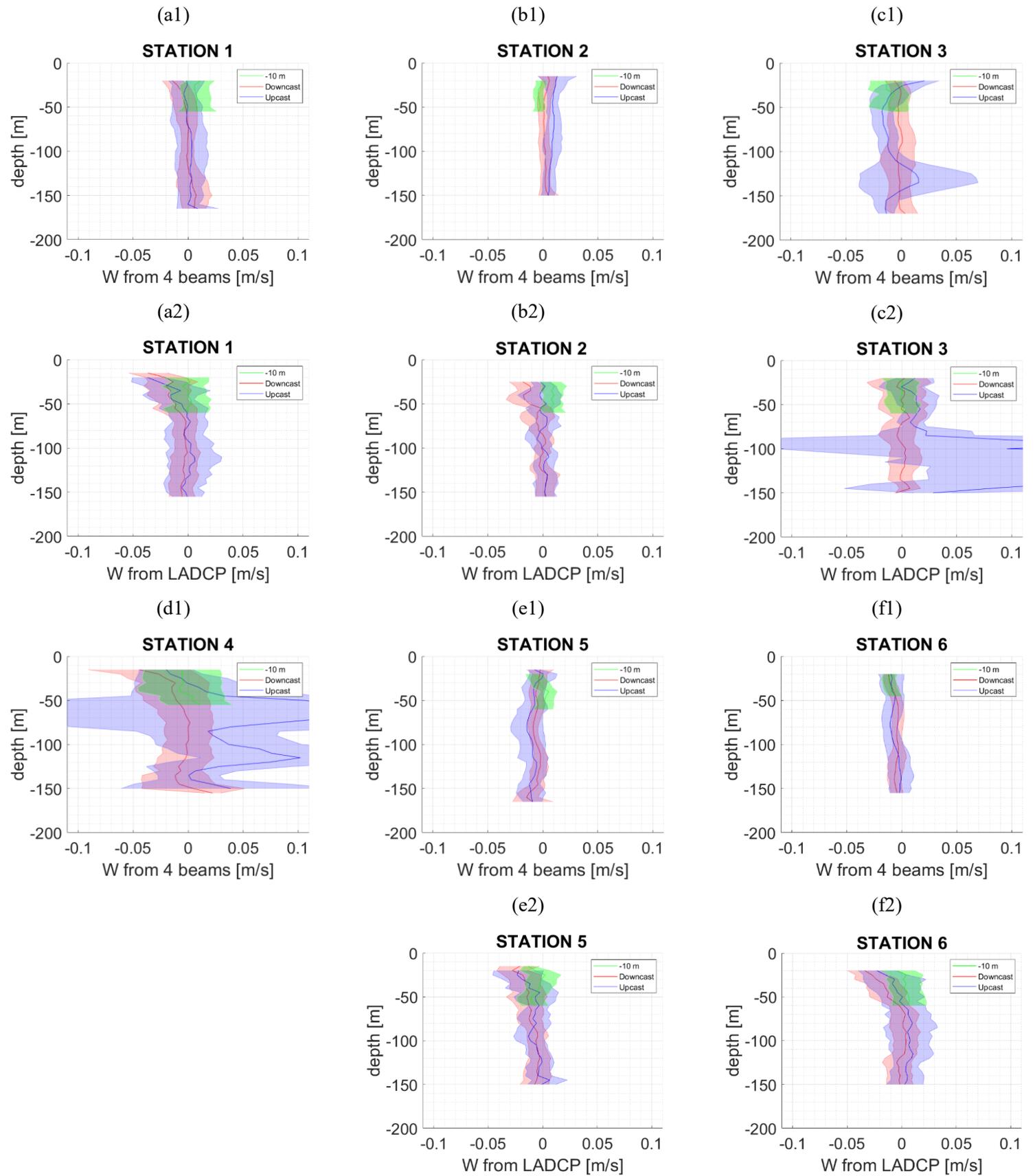


Fig. 5 Vitesses verticales mesurées pour les stations 1 à 6 par les quatre faisceaux du Sentinel V (a1 à f1) et par le L-ADCP classique (a2 à f2). Les vitesses verticales moyennes (lignes) et les écarts-types (zones ombrées) sont représentés en fonction de la profondeur pour chacune des phases d'acquisition : fixe à 10 m (vert), *downcast* (rouge), *upcast* (bleu).

Par ailleurs, la comparaison de ces profils *downcast* (Fig. 6) met en évidence une concordance systématique des moyennes et des écarts-types pour les vitesses verticales issues des deux enregistrements du Sentinel V. En revanche, les profils mesurés par le L-ADCP sont plus variables avec la profondeur. Ce cisaillement vertical est particulièrement marqué dans les 50 premiers mètres de la colonne d'eau.

De plus, les profils acquis en *downcast* avec le Sentinel V sont plus stables sur l'ensemble de la colonne d'eau échantillonnée, avec des écarts-types plus faibles et plus homogènes que ceux acquis avec le L-ADCP.

Plus la fréquence du pulse acoustique est élevée, plus l'incertitude de la mesure est faible (K. Grangier, 2020, communication personnelle). Ainsi, l'incertitude attendue sur la mesure du Sentinel V (500 kHz) doit être plus faible que celle du L-ADCP (300 kHz).

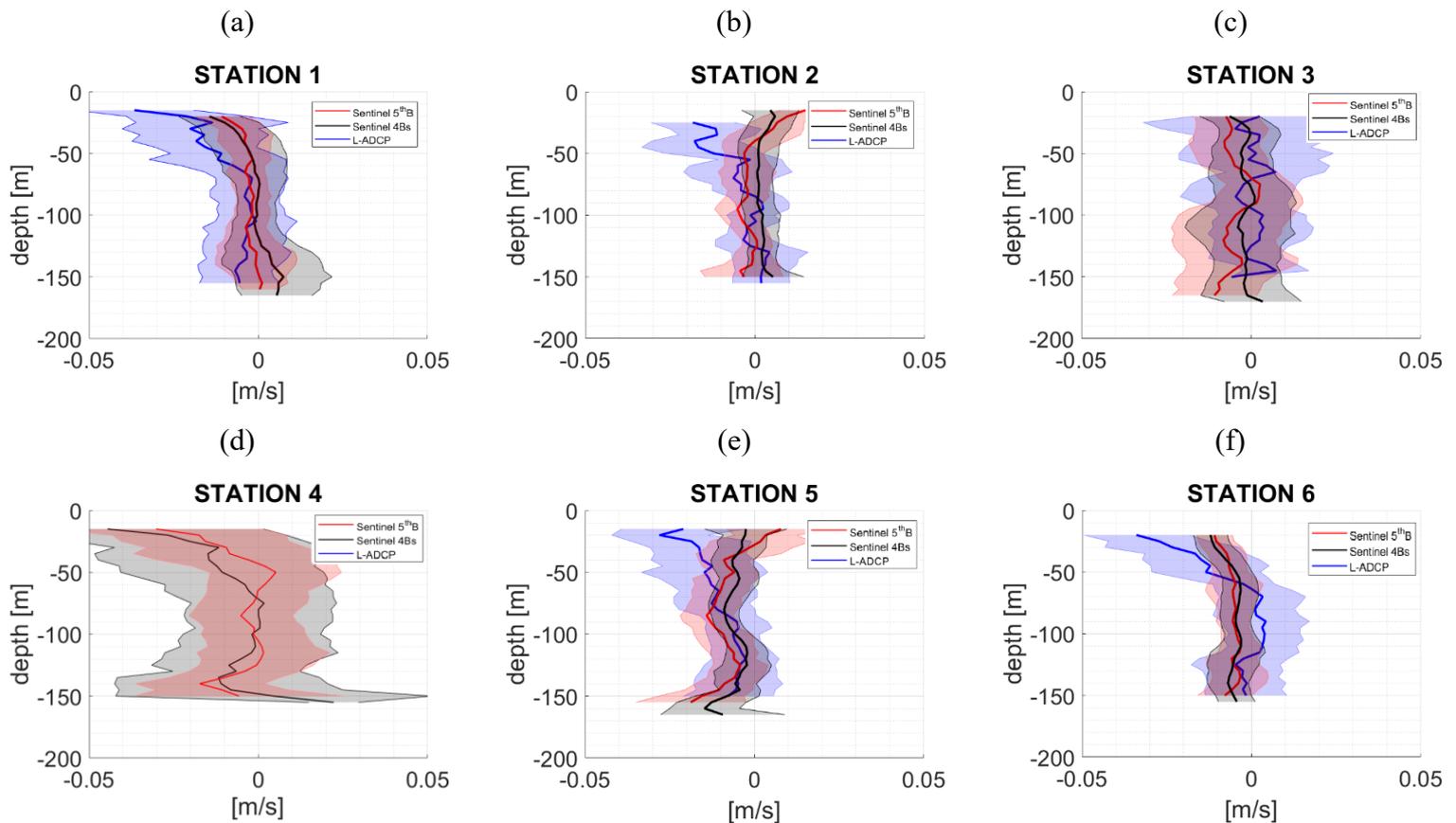


Fig. 6 Comparaison des vitesses verticales mesurées en phase *downcast* par le 5^{ème} faisceau du Sentinel V (rouge), les 4 faisceaux du Sentinel V (noir) et le L-ADCP (bleu), pour les stations 1 à 6 (a à f). Les vitesses verticales moyennes (lignes) et les écarts-types (zones ombrées) sont représentés en fonction de la profondeur.

3.3 Étude de la dynamique tridimensionnelle de la zone d'étude FUMSECK

3.3.1 Analyse satellite et courantologie horizontale

La mesure des courants de surface par altimétrie satellitaire permet d'obtenir une première approximation de la circulation générale dans la zone d'étude. Ces courants horizontaux, dérivés de l'approximation géostrophique, sont également utilisés pour calculer les FSLE (sur une période d'intégration maximale de 60 jours) afin d'observer la présence d'éventuels fronts dans la zone.

La Fig. 7 présente ces deux données, auxquelles sont superposées les mesures ponctuelles de courantologie effectuées par le Sentinel V : les courants horizontaux représentés sous forme de vecteurs et la composante verticale, mesurée par le 5^{ème} faisceau, représentée par les points de couleur. Les données de courantologie horizontale mesurées *in situ* ont été corrigées de la dérive moyenne du bateau durant la réalisation de la station. Pour plus de précision, il serait possible de mettre en place une correction spécifique aux enregistrements de courantologie horizontale par des ADCP déployés en profils verticaux (Firing and Gordon, 1990, Visbeck, 2002, Thurnherr, 2010). Cependant, la correction de la dérive moyenne est suffisante pour notre étude qui ne nécessite pas de détailler les profils verticaux de vitesse horizontale.

La Fig. 7 montre bien l'utilité des données satellites pour visualiser la circulation générale ainsi que pour délimiter les structures hydrodynamiques majeures. En effet, la circulation cyclonique attendue en mer Ligure est bien mise en évidence. Par ailleurs, les enregistrements de vitesse horizontale au niveau des stations 4 et 5 par le Sentinel V (Fig. 7.c et d) concordent en direction avec les mesures effectuées par satellite. Toutefois, l'intensité de ces mesures est plus grande pour les enregistrements *in situ*, ce qui suggère une sous-estimation des courants horizontaux dérivés de l'altimétrie, comme c'est souvent le cas. Au niveau des stations 2 et 3 situées à l'Est de la région étudiée (Fig. 7.a et b), en bordure extérieure de la recirculation cyclonique, les courants satellitaires et les courants mesurés *in situ* sont en désaccord, tant en direction qu'en intensité. De plus, les stations 1 et 6 (Fig. 7.a et d), se situant plus à l'intérieur de la recirculation cyclonique, sont difficilement comparables aux données satellites du fait d'une circulation très peu intense dans cette zone. En dernier lieu, les enregistrements par le Sentinel V indiquent un très faible cisaillement vertical des courants horizontaux, comme observé précédemment avec les vitesses verticales.

L'étude de la dynamique tridimensionnelle peut être affinée en intégrant d'autres données, telles que la SST ou la chlorophylle, qui permettent une vision complémentaire de la zone d'étude et des contrastes des structures plus fines.

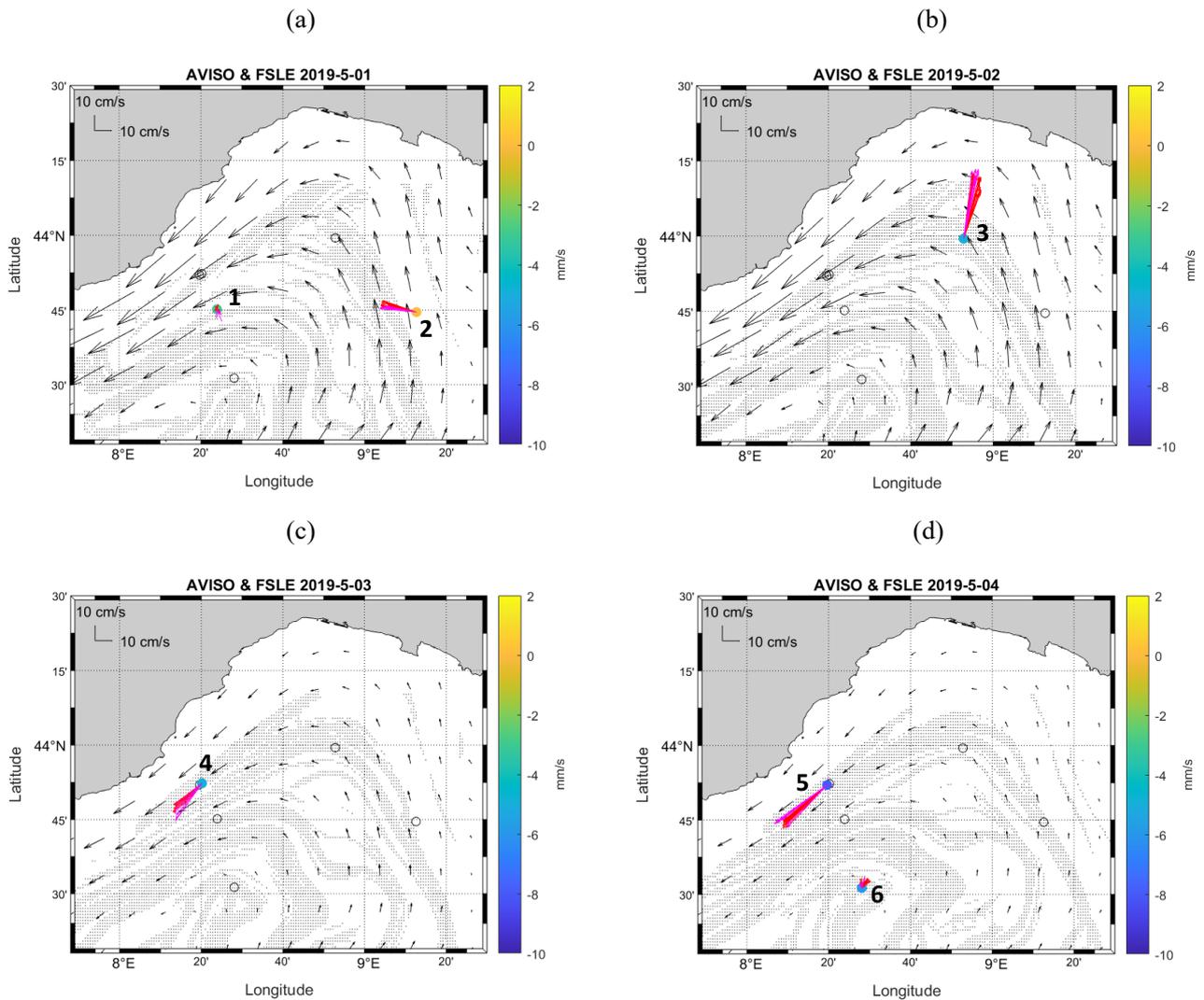


Fig. 7 Cartes satellites des FSLE et des champs de courant altimétrique du 01/05/2019 au 04/05/2019 (a à d), superposées aux composantes horizontales et verticale du courant aux stations de mesure *in situ*. Les points grisés correspondent à la présence des FSLE, le champ vectoriel noir correspond aux courants dérivés de l'altimétrie. Les stations numérotées indiquent la vitesse verticale moyenne enregistrée en *downcasts* sur la station par les points colorés, et la vitesse horizontale par les vecteurs (rose : 0-50m et rouge : 50-150m).

3.3.2 Analyse satellite de l'environnement physico-chimique

Les produits satellites de SST et de concentration en chlorophylle présentées ci-dessous sont des produits de niveau 4. Autrement dit, l'information est renseignée sur l'ensemble du domaine d'étude géographique et le manque de données, du fait des nuages très présents au moment où la campagne s'est déroulée, est compensé par une interpolation journalière optimale, tenant compte des études climatologiques.

Les cartes de SST mesurées par satellite et présentées sur la Fig. 8 mettent en évidence les différences de température entre les stations au moment de leur réalisation. Cependant, à cette variabilité spatiale s'ajoute une variabilité temporelle. Les températures observables étant comprises entre 14.5 et 16 °C, le faible contraste dans la SST, cohérent avec la période printanière à laquelle s'est déroulée la campagne, ne

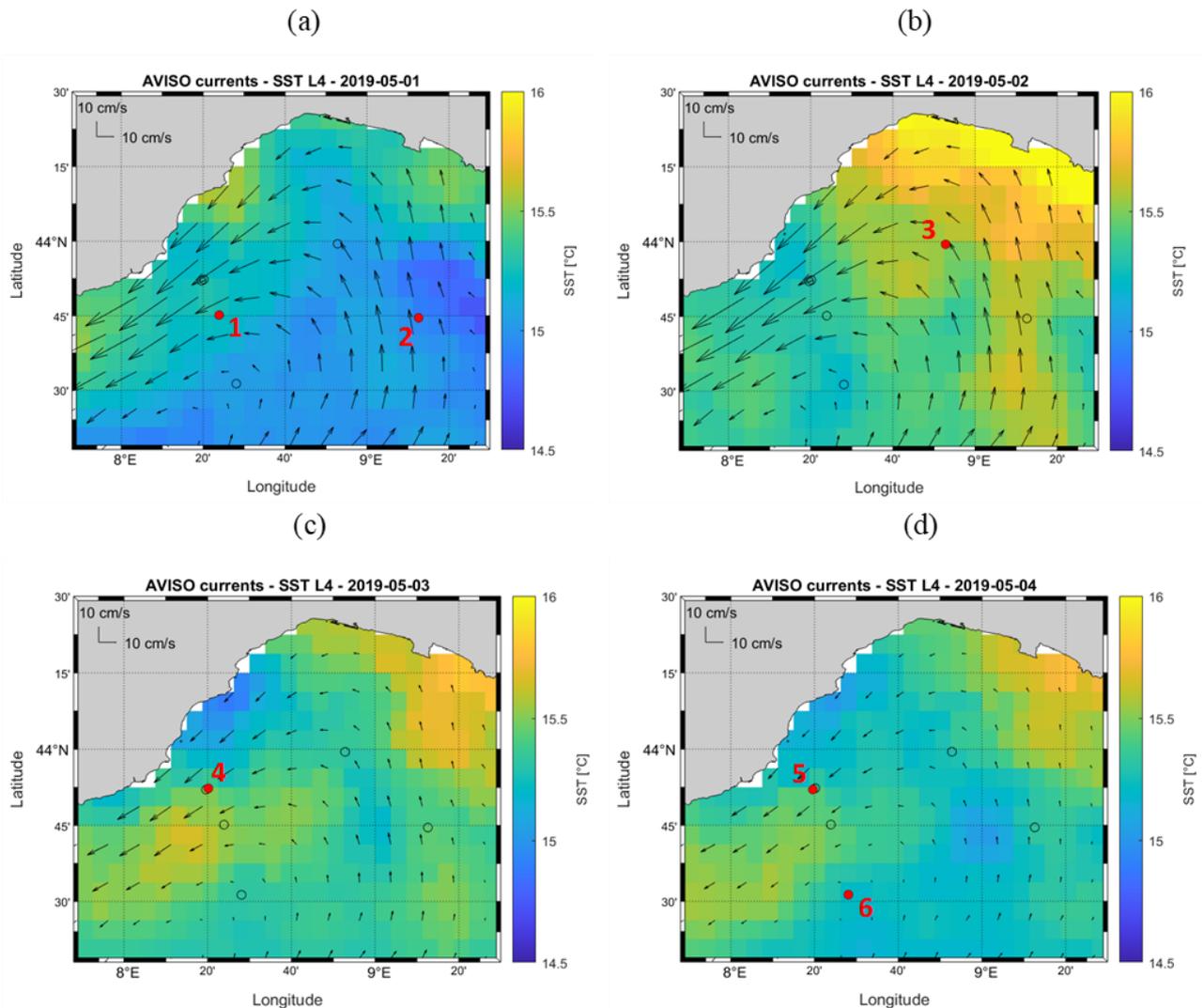


Fig. 8 Cartes de SST mesurée par satellite du 01/05/2019 au 04/05/2019 (a à d) et superposée aux courants altimétriques et aux stations d'échantillonnage des vitesses verticales.

nous permet pas de distinguer plus que la circulation cyclonique générale déjà mise en évidence par les données de courantologie AVISO.

La Fig. 9 (a à d) montre l'évolution de la concentration en chlorophylle du 01/05/2019 au 04/05/2019 dans la zone d'étude de la campagne FUMSECK. Une variation temporelle entre les journées d'échantillonnage des vitesses verticales est observable, mais les structures hydrodynamiques majeures restent identifiables par la présence des gradients d'abondance chlorophyllienne. En effet, il est possible de distinguer en premier lieu la présence du courant Nord, moins abondant en chlorophylle, le long des côtes Liguro-Provençales au Nord de la mer Ligure. Le point de départ de ce courant côtier dans la région d'étude est une zone elle-même moins abondante en chlorophylle, située au Nord et à l'Est des stations 2 et 3 respectivement. Par ailleurs, la bordure du courant Nord est marquée par un front de chlorophylle, observable à la station 4.

En second lieu, l'intérieur de la recirculation cyclonique (au Sud de la station 6) se différencie par une concentration en chlorophylle beaucoup plus élevée.

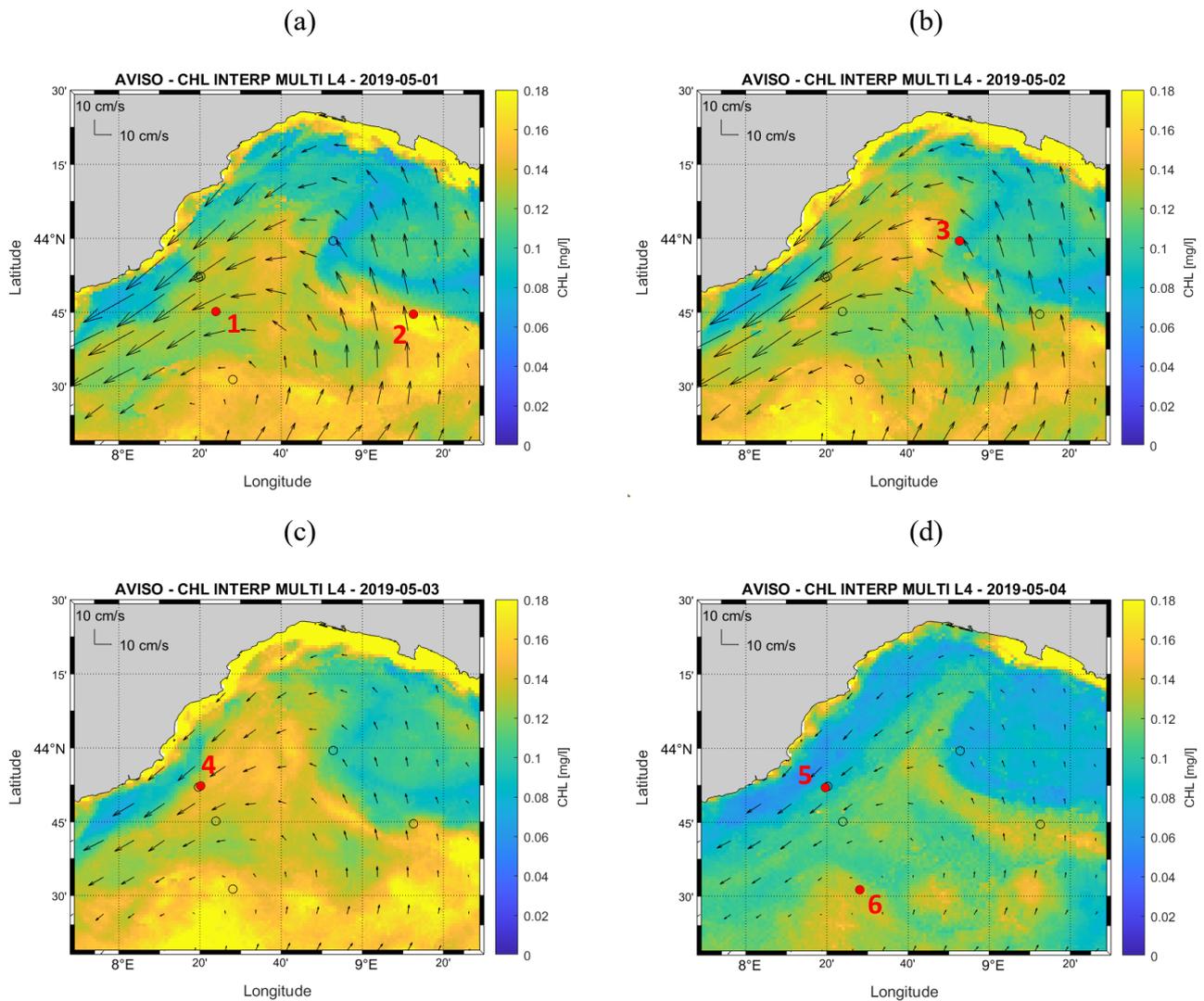


Fig. 9 Cartes d'abondance chlorophyllienne mesurée par satellite du 01/05/2019 au 04/05/2019 (a à d) et superposée aux courants altimétriques et aux stations d'échantillonnage des vitesses verticales.

Enfin, il est possible d'isoler ces deux premières zones par une région intermédiaire. Cette troisième zone, d'abondance chlorophyllienne variable, présente une limite bien plus marquée au Nord avec la recirculation cyclonique par la présence d'un front de chlorophylle le long des stations 2 et 3, que dans sa partie Sud.

4 Discussion

4.1 Comparaison des méthodes de déploiement

Lors de la campagne FUMSECK, trois instruments de mesure acoustique ont été déployés pour l'acquisition des vitesses verticales : le Sentinel V, un L-ADCP ainsi qu'un *Free-Fall* ADCP (FF-ADCP, 300 kHz). Sachant que le Sentinel V fournit deux mesures différentes (mesure directe par le 5^{ème} faisceau et mesure indirecte estimée à partir des quatre faisceaux), quatre jeux de données sont donc disponibles.

En effet, les données du Sentinel V et celles du L-ADCP, qui ont été traitées par la méthode décrite ci-dessus, sont complétées par les enregistrements du FF-ADCP, dont les données ont été traitées par Jean-Luc Fuda² selon une méthodologie différente.

La Fig. 10 représente, pour les quatre mesures de vitesses verticales à disposition, la valeur moyennée de w et son écart-type sur l'ensemble de la profondeur échantillonnée et pour chacune des stations. Notons que la station 1 n'a pas été échantillonnée par le FF-ADCP, et que, pour rappel, le L-ADCP n'a pas été déployé à la station 4.

Les valeurs moyennes de vitesses verticales en fonction des stations, déterminées pour chaque instrument, sont dans l'ordre de grandeur des vitesses verticales moyennes correspondant au mm.s^{-1} avec une tendance majoritairement négative.

Les écarts-types présentent une plus grande variabilité selon l'instrument de mesure. En effet, bien que tous les ordres de grandeurs de ces écarts-types correspondent au cm.s^{-1} , ils peuvent être classés par ordre décroissant de la manière suivante : L-ADCP ($\sim 1.3 \text{ cm.s}^{-1}$), Sentinel V quatre faisceaux ($\sim 1.1 \text{ cm.s}^{-1}$), Sentinel V 5^{ème} faisceau ($\sim 1.0 \text{ cm.s}^{-1}$) et FF-ADCP ($\sim 0.7 \text{ cm.s}^{-1}$). Ainsi, si l'on considère uniquement la méthode de profil d'un ADCP fixé à une bathysonde, la mesure acquise avec la plus grande précision apparaît être celle issue du Sentinel V et, plus spécifiquement, celle de la mesure du 5^{ème} faisceau. Cependant, l'intégration à ces comparaisons des données du FF-ADCP, présentant les plus faibles écarts-types, permet d'en déduire que la technique de déploiement de l'instrument semble prendre une importance prépondérante. Outre le fait que la fréquence du FF-ADCP (300 kHz) implique une précision intrinsèque moins bonne que celle du Sentinel V (500 kHz), la technique *free-fall* permet de s'affranchir en grande partie de l'agitation de la colonne d'eau car il n'y a pas de force de rappel s'exerçant sur l'instrument et perturbant la mesure. Notons que sur la station 4, réalisée dans des conditions de houle très importante, les écarts-types moyens des deux jeux de données du Sentinel V sont les plus élevés, tandis que celui du FF-ADCP est similaire à ceux des autres stations pour ce même instrument. Autrement dit, au-delà des valeurs optimales des écarts-types obtenues avec le FF-ADCP, leur stabilité sur l'ensemble des stations met en évidence la très faible sensibilité de cette technique à l'agitation du milieu.

Enfin, la Fig. 11 permet d'observer les valeurs moyennes de w mesurées dans trois épaisseurs de la colonne d'eau : 0-50 m, 50-100 m, et 100-150 m, pour les instruments déployés sur la bathysonde. La plus grande variabilité des vitesses verticales est contenue dans les 50 premiers mètres, sous l'influence directe des conditions météorologiques. En dessous, les moyennes et les écarts-types sont réduits, et la différence entre les profondeurs 50-100 m, et 100-150 m, pour une station et pour un instrument donné est assez peu marquée.

² Aix Marseille Univ., Université de Toulon, CNRS, IRD, MIO UM 110, 13288, Marseille, France

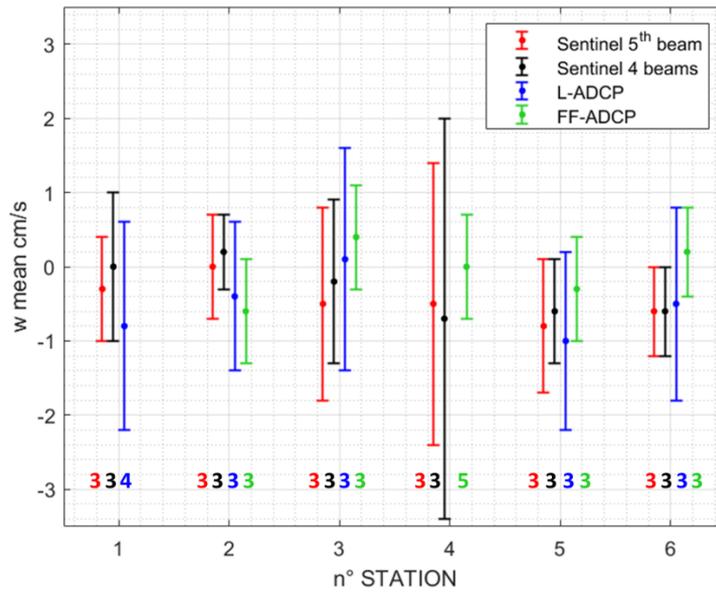


Fig. 10 Comparaison des moyennes (points) et écarts-types (traits pleins) des profils *downcasts* des vitesses verticales, moyennées en profondeur, en fonction des stations, et pour chaque instrument : Sentinel V 5^{ème} faisceau (rouge), Sentinel V 4 faisceaux (noir), L-ADCP (bleu), et FF-ADCP (vert). Les numéros en dessous de chaque barre d'erreur correspondent au nombre de plongées effectuées par les instruments considérés.

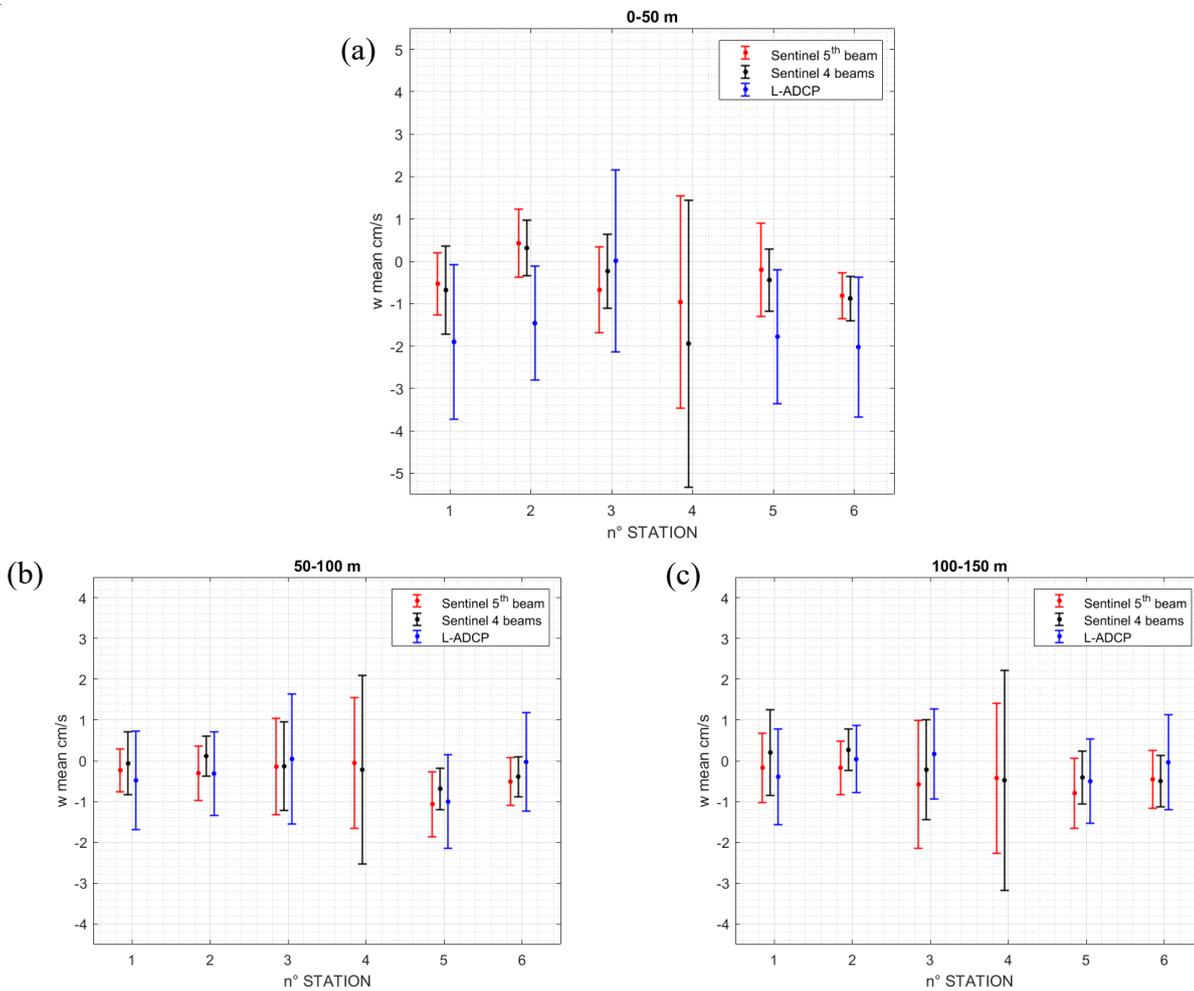


Fig. 11 Comparaison des moyennes et écarts-types des profils *downcasts* des vitesses verticales, moyennées entre trois épaisseurs 0-50 m (a), 50-100 m (b) et 100-150 m (c), en fonction des stations, et selon l'instrument : Sentinel V 5^{ème} faisceau (rouge), Sentinel V 4 faisceaux (noir), L-ADCP (bleu).

En conclusion sur les instruments et la méthodologie des mesures de vitesses verticales *in situ*, nos résultats montrent que le Sentinel V est l'instrument le plus précis parmi ceux testés, et que la méthodologie en *free-fall* est la plus prometteuse.

4.2 Étude bilan de la dynamique 3D

À la suite de l'analyse des données de courantologie mesurées *in situ* et des données physico-chimiques satellitaires, il est maintenant possible d'établir un schéma bilan (Fig. 12) avec :

- les données de courantologie issues du Sentinel V 5^{ème} faisceau : pour la vitesse verticale, représentées par les cercles vectorisés ;
- les données de courantologie issues des quatre faisceaux du Sentinel V : pour les vitesses horizontales, représentées par les vecteurs rouges ;
- la cartographie satellite d'abondance chlorophyllienne donnée pour le 4 mai 2019, représentative du milieu de la campagne FUMSECK.

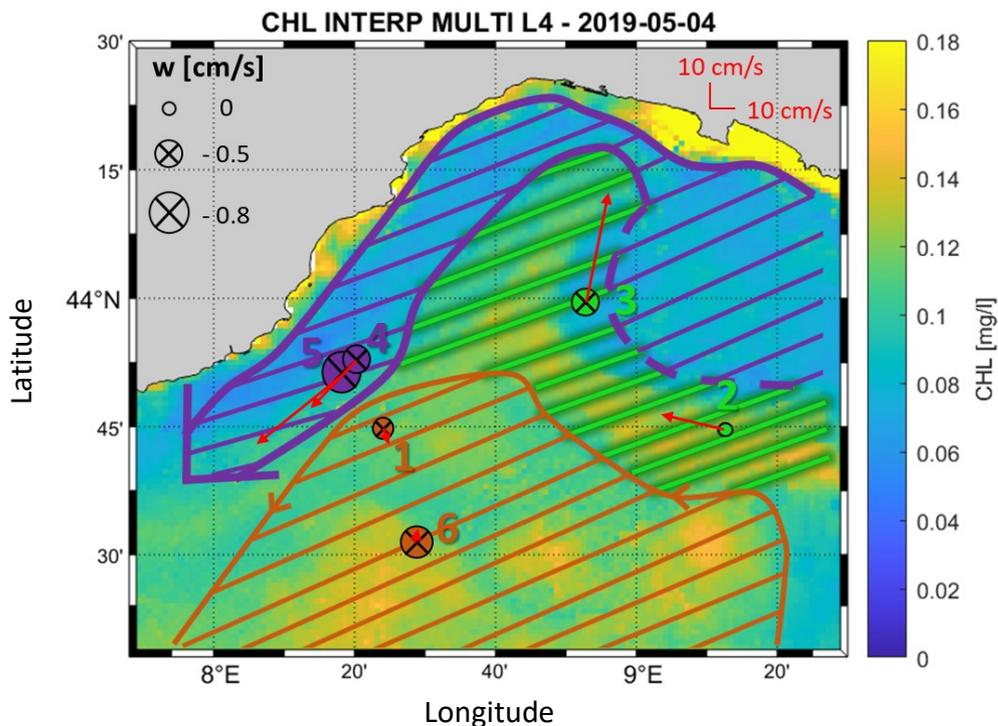


Fig. 12 Schéma bilan représentant la dynamique tridimensionnelle dans la zone étudiée lors de la campagne FUMSECK réalisée du 30/04/2019 au 07/05/2019, superposée à la carte d'abondance chlorophyllienne mesurée par satellite du 04/05/2019.

Les résultats de ces travaux ont montré que les vitesses verticales mesurées sont globalement toutes faiblement négatives sur l'ensemble de la zone d'étude, impliquant une dynamique verticale de type *downwelling* au niveau des stations échantillonnées. Sans toutefois correspondre à une véritable plongée des masses d'eau typiques des *downwellings* côtiers ou des processus de convection hivernale, la région Ligure en période printanière peut être propice à une plongée de faible intensité des masses d'eau de surface en certains endroits.

En dernier lieu, cette dynamique verticale est certainement due à des processus différents d'une station à l'autre. En effet, sur la Fig. 12 on observe très distinctement trois zones soumises à des processus hydrodynamiques différents :

- la recirculation cyclonique, dans laquelle se situent les stations 1 et 6 ;
- le courant Liguro-Provençal, dans lequel se situent les stations 4 et 5 ;
- une zone intermédiaire, dans laquelle se situent les stations 2 et 3.

5 Conclusions et perspectives

La campagne FUMSECK (2019) en mer Ligure a permis de mettre en œuvre différents instruments pour l'acquisition *in situ* des vitesses verticales, jusqu'ici très largement négligées, ou bien estimées par des calculs théoriques. L'analyse de ces données constitue donc une approche innovante dans l'étude des processus hydrodynamiques de fine échelle.

Le développement de la méthode d'analyse des mesures *in situ* de vitesses verticales a été réalisé de manière à être applicable à différents ADCP déployés en profils verticaux. Ainsi, la robustesse de la chaîne de traitement mise en place est vérifiée à l'aide de quatre jeux de données, issus de trois instruments différents. Les valeurs moyennes obtenues pour ces vitesses verticales sont systématiquement de l'ordre du mm.s^{-1} , tandis que les écarts-types évalués sont de l'ordre du cm.s^{-1} .

Par ailleurs, les données acquises par le 5^{ème} faisceau du Sentinel V présentent la plus grande précision pour un déploiement à partir de la bathysonde. Si l'on tient compte de la très faible sensibilité du déploiement du FF-ADCP aux conditions d'agitation de la colonne d'eau, se traduisant systématiquement par les écarts-types les plus faibles (légèrement inférieurs au cm.s^{-1}), alors le déploiement du Sentinel V selon la technique du *free-fall* semble être la meilleure méthodologie à mettre en œuvre dans le futur pour la mesure *in situ* des vitesses verticales.

Ensuite, cette nouvelle mesure *in situ* des vitesses verticales apporte une contribution importante à l'analyse de la dynamique dans la zone d'étude. En effet, cette dernière permet de compléter les informations issues des observations par satellite et des mesures de courantologie horizontale aboutissant à une vision synoptique de la région étudiée. Ainsi, nous avons pu reconstruire une vision tridimensionnelle de cette dynamique de fine échelle en établissant le schéma bilan présenté en Fig. 12.

Bien que peu de stations collectant des enregistrements de vitesses verticales aient été réalisées en raison des conditions météorologiques et de la durée limitée de la campagne, ce travail expérimental et novateur aboutit à une analyse tridimensionnelle cohérente de la courantologie dans les 150 premiers mètres de la colonne d'eau. De manière générale, ces vitesses verticales, de l'ordre du mm.s^{-1} , sont faiblement négatives, et elles peuvent être liées à des processus différents. Certaines de ces valeurs peuvent notamment être expliquées par le positionnement des stations en bordure du courant Nord, ou dans la recirculation cyclonique.

Pour rappel, il serait possible d'affiner l'étude de la mesure *in situ* de courantologie horizontale en mettant en place une correction spécifique à ces enregistrements issus des ADCP déployés en profils verticaux.

En outre, le déploiement du SeaExplorer et celui du MVP durant la campagne FUMSECK nous offrent la possibilité de finaliser cette étude en comparant les vitesses verticales acquises *in situ* par les ADCP à l'estimation de ces vitesses issues des anomalies de vol du glider d'une part, et d'autre part, au calcul théorique des vitesses verticales par l'utilisation de l'équation- ω .

En dernier lieu, la période et la région durant laquelle la campagne FUMSECK s'est déroulée impliquent de faibles contrastes entre les stations. Sachant que la méthodologie de mesure *in situ* des vitesses verticales est mise en place, et après ce premier test en conditions réelles, il est maintenant intéressant de réaliser d'autres campagnes afin de valider, voire de généraliser, l'acquisition directe de la composante verticale du courant, essentielle à de très nombreuses études : qu'elles soient physiques, biologiques ou biogéochimiques. Pour ce faire, plusieurs campagnes sont en préparation. En effet, la campagne VVPTTest prévue au large de Marseille à l'été 2020 permettra de tester le déploiement du Sentinel V en *free-fall*. Par la suite, des campagnes telles que PROTEVS-Gibraltar (octobre 2020) ou PROTEVS-BIOSWOTMED (courant 2022) pourront permettre la validation définitive de cette mesure *in situ* des vitesses verticales dans des zones océaniques avec une dynamique de fine échelle et/ou à des périodes pour lesquelles cette composante verticale du courant devrait être bien plus marquée et contrastée.

Références

- Barrillon, S. 2019. FUMSECK cruise, RV Téthys II. <https://doi.org/10.17600/18001155>
- Capet, X., McWilliams, J. C., Molemaker, M. J. and A.F. Shchepetkin. 2008. Mesoscale to Submesoscale Transition in the California Current System. *Journal of Physical Oceanography*, **38**. Part 1: 29–43, Part 2: 44–64, Part 3: 2256–2269.
- Dickey, T. D. 2003. Emerging ocean observations for interdisciplinary data assimilation systems. *Journal of Marine Systems*, **40**, 5–48.
- Doglioli, A. 2015. OSCAHR cruise, RV Téthys II. <https://doi.org/10.17600/15008800>
- d’Ovidio, F., Fernández, V., Hernández-García, E. and C. López. 2004. Mixing structures in the Mediterranean Sea from finite-size Lyapunov exponents. *Geophysical Research Letters*, **31**.
- Ferrari, R. and C. Wunsch. 2009. Ocean circulation kinetic energy: Reservoirs, sources, and sinks. *Annual Review of Fluid Mechanics*, **41**, 253–282.
- Fiekas, V., Leach, H., Mirbach, K. and J. Woods. 1994. Mesoscale instability and upwelling. Part 1: Observations at the North Atlantic intergyre front. *Journal of Physical Oceanography*, **24**, 1750–1758.
- Firing, E. and R. Gordon. 1990. Deep ocean acoustic Doppler current profiling. *Proceedings of the IEEE Fourth Working Conference on Current Measurements*, Clinton, MD, Current Measurements Technology Committee of the Oceanic Engineering Society, 192–201.
- Fischer, J. and M. Visbeck. 1993. Velocity profiling with self-contained ADCPs. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **10**, 764–773.
- Lévy, M. 2008. The modulation of biological production by oceanic mesoscale turbulence. in Transport and Mixing in Geophysical Flows (Weiss J. B. and A. Provenzale, Ed.), Springer, 219–261, 262 pp.
- Lévy, M., Iovino, D., Resplandy, L., Klein, P., Madec, G., Tréguier, A.-M., Masson, S. and K. Takahashi. 2012. Large-scale impacts of submesoscale dynamics on phytoplankton: Local and remote effects. *Ocean Modelling*, **43**, 77–93.
- Mahadevan, A. 2016. The impact of submesoscale physics on primary productivity of plankton. *Annual review of marine science*, **8**, 161–184.
- Martin, A.P., Richards, K.J. and M.J. Fasham. 2001. Phytoplankton production and community structure in an unstable frontal region. *Journal of Marine Systems*, **28**, 65–89.
- McGillicuddy, 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. *Proceedings of the Royal Society A*, **472**.

- Millot, C. 1999. Circulation in the western Mediterranean Sea. *Journal of Marine Systems*, **20**, 423–442.
- Millot, C. and I. Taupier-Letage. 2005. Circulation in the Mediterranean Sea. in *The Mediterranean Sea* (Saliot A., Ed.), Springer, **5**, part. K, 29–66.
- RD Instrument. 2008. ADCP coordinate transformation: Formulas and calculations. RDI Manual P/N 951-6079-00, 31 pp.
- Petrenko, A.A., Doglioli, A.M., Nencioli, F., Kersalé, M., Hu, Z. and F. d'Ovidio. 2017. A review of the LATEX project: mesoscale to submesoscale processes in a coastal environment. *Ocean Dynamics*, **24**, 513–533.
- Polzin, K., Kunze, E., Hummon, J. and E. Firing. 2002. The Finescale Response of Lowered ADCP Velocity Profiles. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **19**, 205–224.
- Richardson, P.L. 1983. Eddy kinetic energy in the North Atlantic from surface drifters. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **88**, 4355–4367.
- Rousselet, L. 2018. Étude de l'influence de la circulation à (sous)mésoéchelle sur la distribution spatiale des éléments biogéochimiques et biologiques à l'aide de mesures in situ et satellites couplées physique-biogéochimie. <http://www.theses.fr/s182477>
- 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 A. Petrenko. 2019. Vertical motions and their effects on a biogeochemical tracer in a cyclonic structure finely observed in the Ligurian Sea. *Journal of Geophysical Research*, **124**, 3561–3574.
- Rudnick, D.L. 1996. Intensive Surveys of the Azores Front 2. Inferring the Geostrophic and Vertical Velocity Fields. *Journal of Geophysical Research*, **101**, 16,291–16,303.
- Strass, V. H. 1994. Mesoscale instability and upwelling. Part 2: Testing the diagnostics of vertical motion with a three-dimensional ocean front model. *Journal of Physical Oceanography*, **24**, 1759–1767.
- Thurnherr, A. M. 2010. A practical assessment of uncertainties in full-depth velocity profiles obtained with Teledyne/RDI Workhorse Acoustic Doppler Current Profilers. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **27**, 1215–1227.
- Thurnherr, A. M. 2011. Vertical velocity from LADCP data. *2011 IEEE/OES 10th Current, Waves and Turbulence Measurements (CWTM)*, Monterey, CA, 198–204.
- Thurnherr, A. M. 2012. The finescale response of lowered ADCP velocity measurements processed with different methods. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **29**, 597–600.
- Visbeck, M. 2002. Deep velocity profiling using lowered acoustic Doppler current profilers: Bottom track and inverse solutions. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **19**, 794–807.