

Étude des anomalies de vitesses verticales des courants obtenues par ADCP de coque durant la campagne FUMSECK

Charlotte Cunci

Mémoire de Stage en laboratoire de recherche

réalisé du 01/02/2021 au 16/04/2021

sous la responsabilité de Anne Petrenko, maître de conférences (HDR) HC

Licence SVT Parcours MER Option Océanographie Physique et Biogéochimique

Année 2020 – 2021

Mediterranean Institute of Oceanography

Remerciements

Je tiens à remercier ma maître de stage et enseignante Anne Petrenko, qui m'a permis de confirmer ma passion pour l'océanographie physique, au travers d'une mise en pratique très instructive. Malgré les contraintes du distanciel, son enthousiasme et son énergie m'ont convaincue de mon intérêt pour cette voie. J'aimerais également remercier Stéphanie Barrillon qui m'a fait découvrir son projet FUMSECK et qui m'a permis d'y contribuer, ainsi que Caroline Comby qui m'a aidée tout au long de mon stage dans la compréhension de nombreux aspects théoriques et pratiques.

Merci à toutes les trois de m'avoir aiguillée, épaulée, encadrée, corrigée durant ce stage lors de nos réunions zooms/présentielles, de m'avoir prêté ce magnifique livre sur python et de m'avoir aidée à comprendre et chercher des fonctions python.

Enfin, merci à ma famille et mon copain d'avoir fait semblant de tout comprendre quotidiennement avec le même enthousiasme que moi, et de m'avoir laissée disparaître pendant des heures pour coder.

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| 1. Introduction..... | 1 |
| 2. Matériel et méthodes..... | 2 |
| 2.1. La campagne FUMSECK..... | 2 |
| 2.2. ADCP de coque | 4 |
| 2.3. Estimation de la vitesse du bateau et correction de la vitesse verticale | 5 |
| 2.4. Méthode d'identification de l'anomalie négative de vitesses verticales | 6 |
| 3. Résultats..... | 7 |
| 3.1. Moyenne mobile | 7 |
| 3.2. Histogramme des vitesses verticales | 8 |
| 3.3. Seuil | 8 |
| 3.4. Isolement de l'anomalie..... | 10 |
| 3.5. Histogrammes des vitesses verticales avec et sans l'anomalie..... | 10 |
| 3.6. Caractéristiques de l'anomalie du transect 1 | 11 |
| 3.7. Temps des anomalies sur toute la campagne..... | 11 |
| 3.8. Profondeurs et vitesses des anomalies sur toute la campagne..... | 13 |
| 3.9. Mise en parallèle avec les autres données de la campagne | 14 |
| 4. Discussion..... | 15 |
| 5. Conclusion..... | 17 |
| Références bibliographiques | 18 |

1. Introduction

Les courants verticaux sont souvent négligés en océanographie du fait de leur ordre de grandeur 10 à 1000 fois inférieur à celui des composantes horizontales (mm/s à cm/s contre cm/s à m/s). Cette composante verticale est souvent liée à la dynamique océanique de fine échelle qui est éphémère et donc difficile à échantillonner *in situ* (Mahadevan 2016 ; Petrenko *et al.* 2019). Ces événements se produisent sur des échelles temporelles allant de quelques jours à quelques semaines et sur des échelles spatiales de quelques centaines de mètres à la dizaine de kilomètres (Ferrari & Wunsch 2009). Les filaments de courant, petits tourbillons et fronts sont des structures de sub-méso à méso-échelle qui, dans l’océan, ont des impacts sur les écosystèmes planctoniques.

L’écosystème planctonique est généralement nourri par les sels nutritifs venant du fond et dynamisé par les courants ; donc difficile à étudier (Clayton *et al.* 2013). Les fronts sont caractérisés par une abondance nutritionnelle et un dynamisme des courants qui permettent aux phytoplanctons de se reproduire. De plus, au niveau de ces structures, les masses d’eau se rencontrent et se mélangent, multipliant la diversité planctonique (Martin *et al.* 2001 ; Lévy *et al.* 2001 ; Lévy 2008 ; Lévy *et al.* 2012 ; Lévy *et al.* 2015 ; Mahadevan 2016 ; McGillicuddy 2016 ; Lévy *et al.* 2018 ; Rousselet *et al.* 2019). Les cycles biogéochimiques sont modifiés par les courants horizontaux (Flierl & McGillicuddy 2002) et verticaux (Lévy *et al.* 2015 ; Mahadevan 2016 ; McGillicuddy 2016) ; ces derniers contribuent à plus de 1/3 de la nouvelle production phytoplanctonique (Lévy *et al.* 2015).

L’écosystème planctonique constitue la base des réseaux trophiques océaniques. En contribuant à 50% de la production primaire, les planctons ont un rôle fondamental sur le fonctionnement des écosystèmes marins (Ptacnik *et al.* 2008). Il est donc essentiel de les étudier et de les identifier pour comprendre la dynamique de ces écosystèmes. Or, pour mettre en place une étude efficace de ces écosystèmes dans des structures aussi dynamiques, il est indispensable de réaliser des mesures *in situ*, des observations satellites et des modèles numériques (Mahadevan 2016 ; Pascual *et al.* 2017 ; Lévy *et al.* 2018).

Le projet BioSWOT vise à comprendre le rôle des courants dans la structure et la dynamique de la communauté planctonique. Le futur satellite SWOT (Surface Water and Ocean Topography), développé par la NASA (National Aeronautics and Space Administration) en coopération avec le CNES (Centre National d’Études Spatiales), réalisera des mesures

altimétriques avec une précision centimétrique et sur une large fauchée (contrairement aux capteurs actuels effectuant des mesures seulement sous la trace du satellite). Celle-ci permettra d'observer ces tourbillons et filaments de fine échelle. Le satellite permettra ainsi de faire des progrès en océanographie physique et d'affiner les modèles de prévisions océanographiques.

FUMSECK (Facilities for Updating the Mediterranean Submesoscale – Ecosystem Coupling Knowledge, Barrillon 2019), réalisée en mai 2019 en mer Ligure, est l'une des campagnes préparatoires au lancement du satellite SWOT en 2022. Cette campagne, dont la chef de mission était Stéphanie Barrillon, a été mise en place pour garantir l'exploitation optimale des données du satellite et permettre le développement de futures mesures *in situ* couplées aux mesures du satellite. Le but était d'effectuer des tests technologiques à différents niveaux pour évaluer les potentialités et limites des instruments exploités pour l'étude des processus et la dynamique de fine échelle.

L'acquisition *in situ* des vitesses verticales représente un grand défi du fait de leur faible valeur, comme expliqué ci-dessus, et de la nature éphémère des structures de fine échelle. Il est donc indispensable de développer de nouvelles méthodologies pour les mesurer. Un des instruments étudiés, un ADCP de coque (Acoustic Doppler Current Profiler) a été mis en place durant cette campagne pour mesurer la composante verticale des vitesses de courant, sujet de ce rapport de stage. Cet instrument est habituellement utilisé pour mesurer les composantes horizontales de la vitesse, c'est pourquoi les mesures verticales ont dû être corrigées et étudiées pour vérifier leur validité. Mon travail s'inscrit dans la continuité de celui d'Ombeline Sue qui a réalisé le traitement des vitesses verticales (Sue, 2020). En m'appuyant sur ses résultats, j'ai voulu identifier et isoler de potentielles anomalies de vitesses afin de les caractériser et d'en trouver l'origine. J'ai utilisé le langage de programmation python pour réaliser ce travail. L'objectif était d'obtenir des ordres de grandeur cohérents avec des processus biologiques, comme les migrations nyctémérales d'organismes marins. C'est pourquoi mes résultats ont été comparés aux mesures de courantologie et d'abondance chlorophyllienne de la campagne FUMSECK afin de comprendre la dynamique globale de l'écosystème de la mer Ligure. Cette étude a pour but la généralisation de la mesure *in situ* de la vitesse verticale.

2. Matériel et méthodes

2.1. La campagne FUMSECK

La campagne FUMSECK a duré une semaine, du 30 avril au 07 mai 2019, dans le golfe de Gênes à bord du navire océanographique Téthys II. Le trajet du bateau, représenté en bleu sur

la Figure 1, est découpé en 13 transects. Il a été perturbé, par rapport à un tracé initial non représenté, en raison d'une tempête le 05 mai (transects 9 et 10). Le domaine expérimental était compris entre les longitudes 7,5 et 9,5 °E et les latitudes 43 et 44 °N. La stratégie générale consistait à repérer une structure de petite échelle, par exemple un tourbillon ou un front, de la caractériser à l'aide de l'ADCP et d'effectuer des mesures de vitesse verticale à l'intérieur et à l'extérieur de la structure. Durant toute la campagne, une équipe au sol informait l'équipe en mer de la meilleure route à prendre pour rencontrer les fronts grâce au traitement automatique SPASSO des données satellitaires (Software Package for an Adaptive Satellite-based Sampling for Ocean campaigns ; Doglioli *et al.*, 2013, Petrenko *et al.*, 2017). Ces bulletins quotidiens ont permis à l'équipe en mer de traverser plusieurs fronts et de mesurer les vitesses verticales en continu avec l'ADCP de coque.

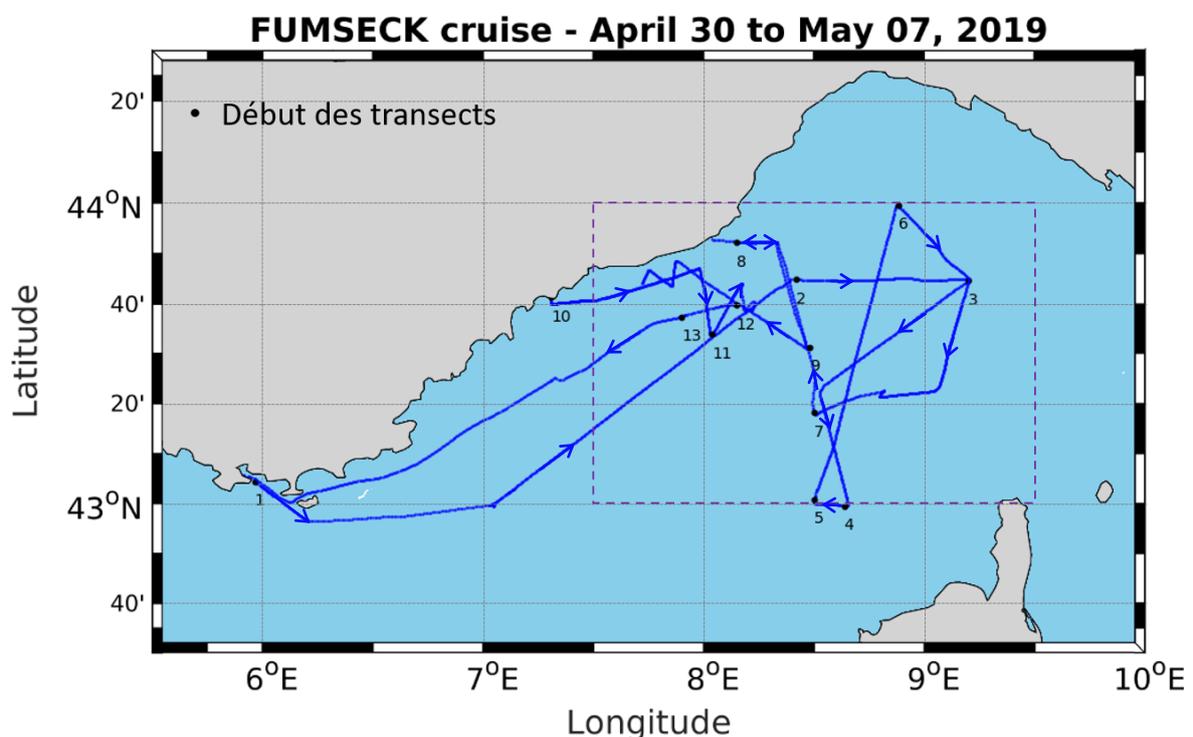


Figure 1 : Trajectoire du bateau en bleu foncé, domaine expérimental en violet et début des transects en noir avec leur numéro.

Plusieurs sauts dans le temps séparent les 13 transects (Figure 2). Au cours de la campagne, l'équipe à bord s'est arrêtée au port le 04 mai et dans la baie de Villefranche le 05 mai pour éviter une tempête. Les mesures n'ont pas été prises en compte durant ces deux périodes ni pendant les stations où le bateau était arrêté, induisant des données souvent très bruitées.

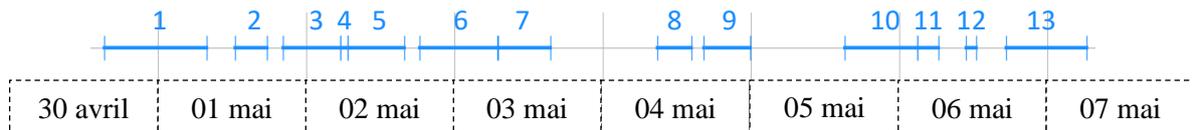


Figure 2 : Frise chronologique de la campagne avec les 13 transects représentés en bleu.

2.2. ADCP de coque

L'instrument utilisé pendant la campagne est un ADCP de coque. L'ADCP de coque est un instrument fixé sous la coque du bateau permettant de calculer les vitesses des courants marins. Une dalle acoustique (Figure 3) envoie un signal acoustique à intervalles de temps réguliers dans l'eau. Lorsque le signal est réfléchi sur les particules en mouvement, il revient à l'ADCP avec une fréquence différente. L'effet Doppler est le décalage en fréquence observé entre l'émission et la réception du signal. Il est proportionnel à la vitesse radiale et, après traitement, permet donc de calculer la vitesse des masses d'eau dans lesquelles les particules se trouvent.

L'ADCP utilisé pendant la campagne FUMSECK est un ADCP de type Ocean Surveyor RDI 75 kHz (RD Instrument 2008). Cet ADCP « Phase array » de nouvelle génération envoie quatre faisceaux acoustiques dans l'eau. Ils permettent, après traitement, d'obtenir, sur chaque tranche d'eau, les composantes horizontales de la vitesse du courant : u (Ouest– Est) et v (Sud – Nord), corrigées de la vitesse du navire et une vitesse w_{mes} verticale (positive vers le zénith), non corrigée de celle du bateau. L'ADCP a effectué des mesures sur 560 m de profondeur tous les 8 m (Figure 4), ce qui correspond à 70 mesures par colonne d'eau. Pour chaque tranche d'eau, l'ADCP a mesuré et moyenné toutes les 2 minutes les vitesses u , v et w_{mes} .



Figure 3 : Photo de la mise en place d'un ADCP sous la coque d'un bateau.

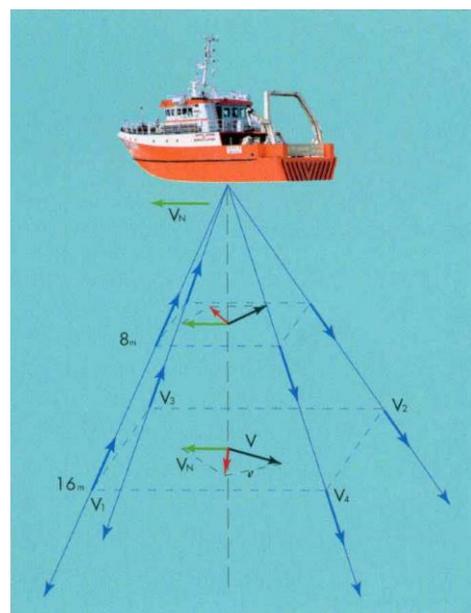


Figure 4 : Schéma du fonctionnement d'un ADCP de coque.

2.3. Estimation de la vitesse du bateau et correction de la vitesse verticale

Habituellement, l'ADCP de coque est utilisé pour mesurer les vitesses horizontales des courants, la vitesse verticale étant négligée principalement du fait d'un à trois ordres de grandeurs inférieurs (mm/s à cm/s contre cm/s à m/s). Dans le cadre de ce stage, il s'agissait de mettre en évidence qu'en utilisant un ADCP de coque, les vitesses verticales peuvent tout de même être mesurées avec un ordre de grandeur cohérent. Cependant, plusieurs corrections doivent être mises en place sur les vitesses verticales mesurées (w_{mes}). La première d'entre elle concerne la correction de la vitesse du bateau (w_{bat}).

En effet, l'ADCP de coque mesure la vitesse des particules dans le référentiel du bateau car il est fixé à sa coque. Pour obtenir les composantes u , v et w de la vitesse des particules, il faut soustraire la vitesse de l'instrument qui la mesure, ici la vitesse du bateau. Les vitesses horizontales (u et v) sont corrigées de la vitesse horizontale du bateau par le traitement classique (Figure 5 (b) et (c)). En revanche, la vitesse verticale mesurée (w_{mes}) n'est pas corrigée (Figure 5 (d)).

Il s'agit alors d'estimer une vitesse verticale moyenne du bateau (w_{bat}) pour la soustraire aux vitesses verticales mesurées (w_{mes}) et obtenir la vitesse du courant (w). Ainsi, les trois composantes u , v et w seront corrigées. L'hypothèse consiste à considérer le pilonnement du bateau comme étant d'un ordre de grandeur supérieur aux vitesses verticales et le même sur toute la colonne d'eau. La composante verticale de la vitesse du bateau, à un instant donné $w_{bat}(t)$, est alors estimée comme étant la moyenne des 70 vitesses verticales mesurées dans la colonne d'eau sous-jacente (moyenne des $w_{mes}(z,t)$). On applique l'équation :

$$w(z,t) = w_{mes}(z,t) - w_{bat}(t) \quad \text{avec } w_{bat}(t) = \text{moyenne à chaque } t \text{ des } w_{mes}(z,t).$$

Après avoir appliqué ce traitement sur tout le transect 1, des anomalies de vitesses apparaissent (Figure 5 (e)). L'anomalie que nous étudions est celle entourée en rouge. Pour une meilleure compréhension, seul le transect 1 est entièrement développé dans les résultats. Néanmoins, les anomalies des autres transects sont également analysées (Annexe II : Anomalies des transects n°3, 6, 10 et 13). Le traitement réalisé sur les vitesses verticales est conservé durant tout le rapport.

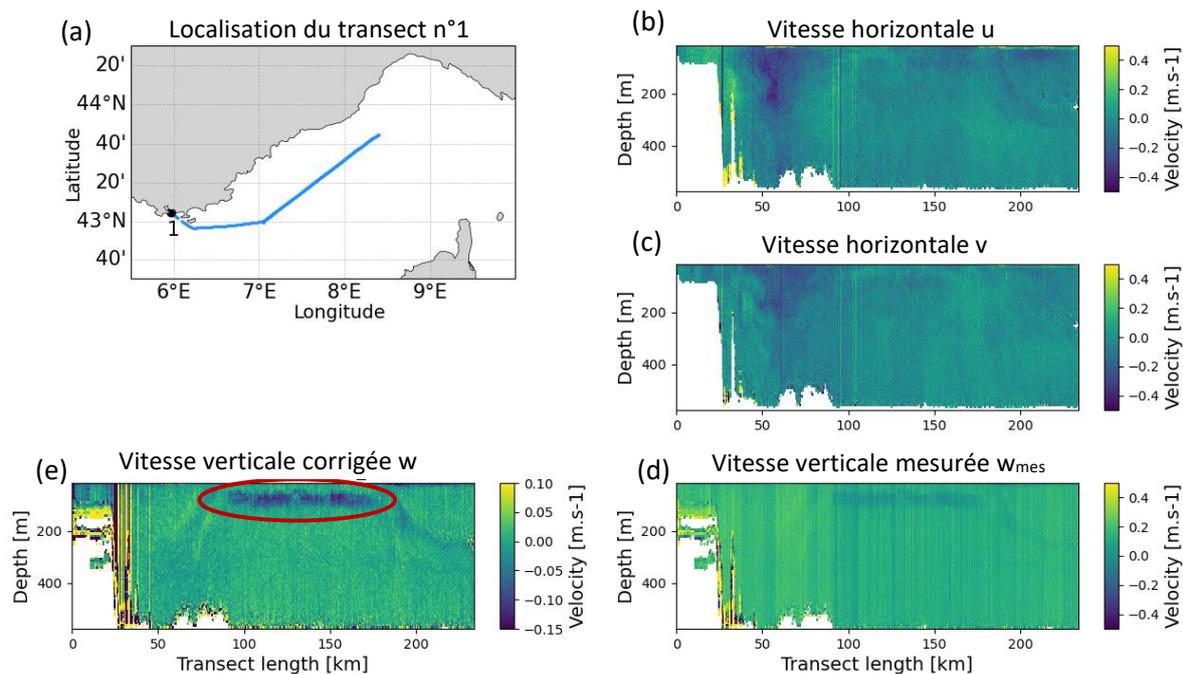


Figure 5 :

- (a) Carte du transect 1 avec son début représenté par un point et son numéro
- Vitesses horizontales corrigées u (b) et v (c)
- (d) Vitesse verticale mesurée w_{mes}
- (e) Vitesse verticale corrigée w, anomalie entourée en rouge.

2.4. Méthode d'identification de l'anomalie négative de vitesses verticales

L'objectif premier de ce stage est d'étudier l'anomalie de vitesse observable à l'œil nu. La première étude consiste à prouver que l'anomalie est remarquable. C'est pourquoi nous avons commencé par réaliser une moyenne mobile des vitesses verticales sur l'horizontale, par rapport à la distance parcourue. En moyennant sur 20 mesures, le but est de lisser les données et ainsi de vérifier que l'anomalie est encore présente.

Ensuite, nous avons cherché à l'isoler, l'objectif étant de calculer son intensité, sa durée, sa profondeur et sa localisation pour la caractériser. Ces mesures permettront, à finalité, d'identifier son origine. Pour cela, nous avons cherché un seuil grâce aux histogrammes des vitesses verticales. Il permet d'isoler les vitesses en-dessous d'une valeur, qui seront considérées comme faisant partie de l'anomalie.

Afin d'obtenir une meilleure sélection de l'anomalie et une réduction du bruit, nous avons cherché et essayé plusieurs traitements. Le meilleur traitement mis en place et le seul développé dans ce rapport, repose sur une méthode de test d'effet de regroupement. Si plus de 70% des valeurs d'un rectangle donné, sont en-dessous du seuil fixé, les valeurs sont conservées. Sinon,

les valeurs sont supprimées. Nous avons fait glisser ce rectangle sur l'horizontale (distance parcourue) puis sur la verticale (profondeur) pour couvrir entièrement le transect.

Puis, les histogrammes des vitesses verticales du transect et de l'anomalie ont été comparés et analysés, ainsi que leur écart-type et leur moyenne. Enfin, les temps, profondeurs et vitesses de l'anomalie ont pu être calculés et mis en relation avec les autres transects. Les anomalies ont ensuite été tracées sur la carte de la campagne et combinées aux données de courantologie et d'abondance chlorophyllienne dans le but de reconnaître un regroupement spatial et temporel. Après avoir identifié des concordances temporelles et spatiales, les données obtenues ont été comparées avec des données biologiques issues de la littérature pour identifier l'origine de ces anomalies. Nous nous attendions à trouver des concordances avec des processus biologiques tels que les migrations nyctémérales d'organismes marins.

3. Résultats

3.1. Moyenne mobile

L'anomalie qui apparaît sur le profil des vitesses du transect 1 est identifiable à l'œil nu (Figure 6). Dans un premier temps, le but est de vérifier que cette anomalie est remarquable.

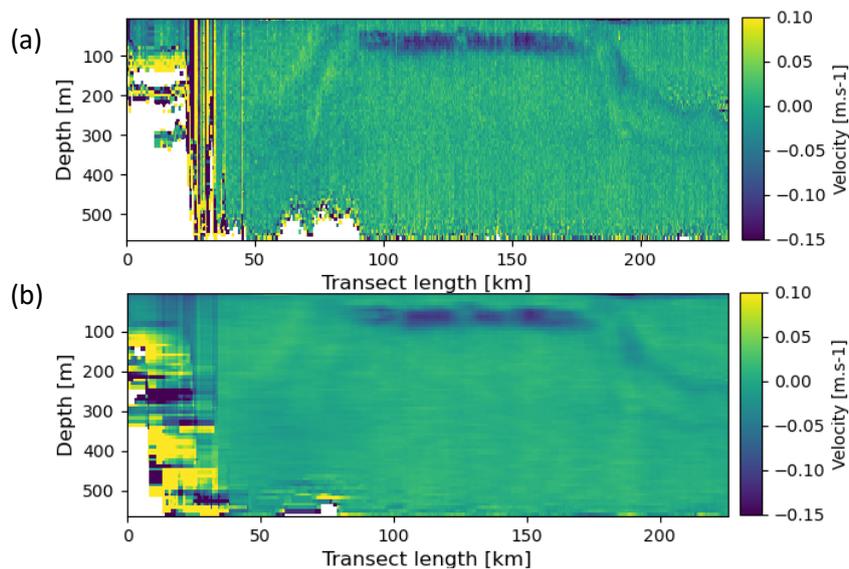


Figure 6 : Profils de vitesses verticales (a) avant et (b) après application de la moyenne mobile.

En réalisant une moyenne mobile, les petites variations sont supprimées et les valeurs sont lissées. Les tendances sur le long terme peuvent ainsi être identifiées. Or, l'anomalie est toujours identifiable après l'application d'une moyenne mobile sur 20 mesures horizontales, par rapport à la distance parcourue (Figure 6).

3.2. Histogramme des vitesses verticales

Après avoir vérifié que l'anomalie est remarquable, l'histogramme des vitesses verticales mesurées durant toute la campagne (Figure 7) est réalisé dans le but de vérifier la précision de la mesure et son ordre de grandeur. L'histogramme, qui a une forme de gaussienne, est centré en 0 et a un écart-type de 8,2 cm/s. Cet écart-type est trop élevé par rapport à l'ordre de grandeur des vitesses verticales qui est de l'ordre du cm/s voire du mm/s. Cependant, plusieurs biais entrent en compte. En effet, il existe des bruits inconnus qui pourraient fausser cet histogramme (absence de mesure dans Annexe I : Profils des vitesses verticales). Néanmoins, l'ordre de grandeur des vitesses reste cohérent avec celui attendu pour cette composante. Nous avons donc considéré que les valeurs obtenues pouvaient être utilisées en attendant de nouvelles corrections.

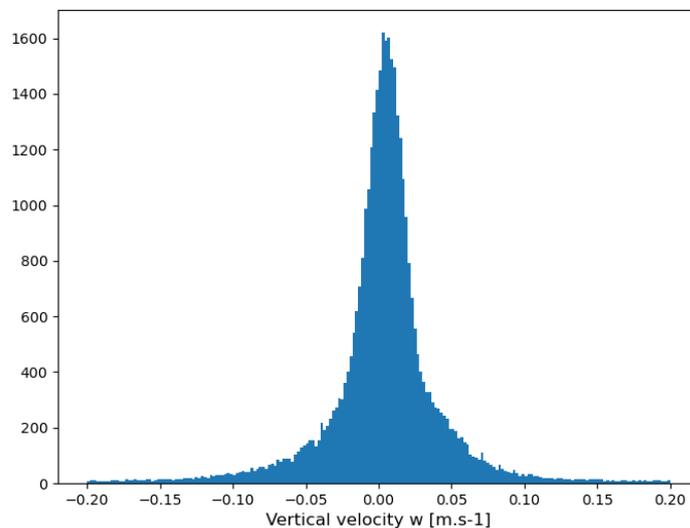


Figure 7 : Histogramme des vitesses verticales pour tous les transects.

3.3. Seuil

Afin d'isoler l'anomalie du transect 1, un seuil doit être établi. L'anomalie est composée de vitesses négatives, c'est-à-dire d'un mouvement descendant. Il s'agit donc de chercher un seuil négatif en-dessous duquel les vitesses appartiennent à l'anomalie. Pour trouver ce seuil, l'histogramme des vitesses verticales du transect 1 a été réalisé (Figure 8). Grâce à celui-ci, plusieurs informations sont obtenues. Tout d'abord, l'histogramme, qui a une forme de gaussienne, est centré en 0 et a un écart-type de 10,7 cm/s. Son analyse permet de remarquer un excédent de valeurs négatives, encadré en rouge. Nous avons supposé que ces valeurs correspondent aux vitesses appartenant à l'anomalie puisqu'elles sont négatives. A première vue, un seuil de - 5cm/s a été fixé en première approche afin d'isoler l'anomalie des autres

valeurs de vitesse. Après avoir fixé ce seuil, les vitesses verticales en-dessous de ce seuil ont été tracées pour obtenir la Figure 9.

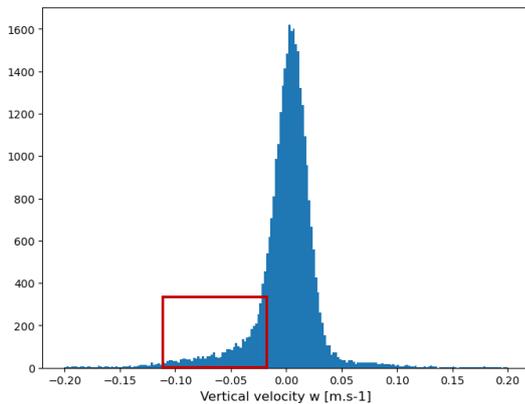


Figure 8 : Histogramme des vitesses verticales pour le transect 1.

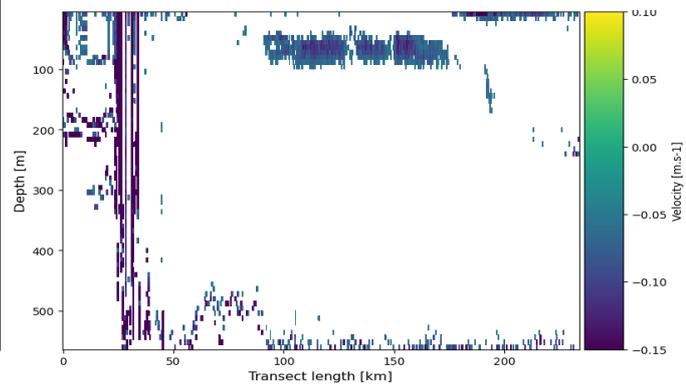


Figure 9 : Profil des vitesses verticales en-dessous de - 5 cm/s pour le transect 1.

Le seuil sélectionne bien l'anomalie. Néanmoins, nous voulions vérifier que le seuil fixé était le bon afin de ne pas perdre de mesures appartenant à l'anomalie. Pour cela, l'historgramme des vitesses verticales mesurées pour une seule colonne d'eau a été réalisé et analysé. En choisissant aléatoirement une colonne d'eau où se trouve l'anomalie, l'objectif est d'obtenir un « excédent » au niveau des vitesses verticales négatives. Cet « excédent » serait représentatif de l'anomalie et le seuil serait ainsi mieux sélectionné. La Figure 10 représente cet histogramme pour un point choisi aléatoirement au milieu de l'anomalie (la colonne d'eau au 120^{ème} km). Un seuil de - 3 cm/s a pu être sélectionné grâce à l'« excédent » encadré en rouge sur cet histogramme.

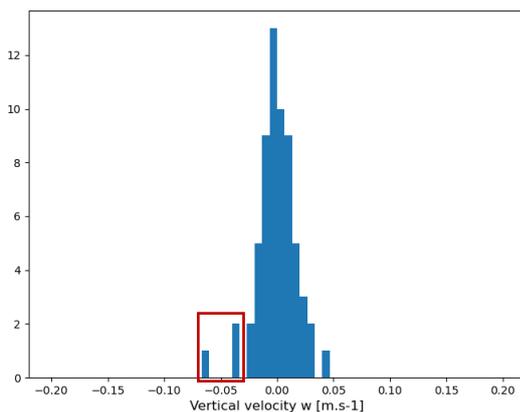


Figure 10 : Histogramme des vitesses verticales pour un seul point du transect.

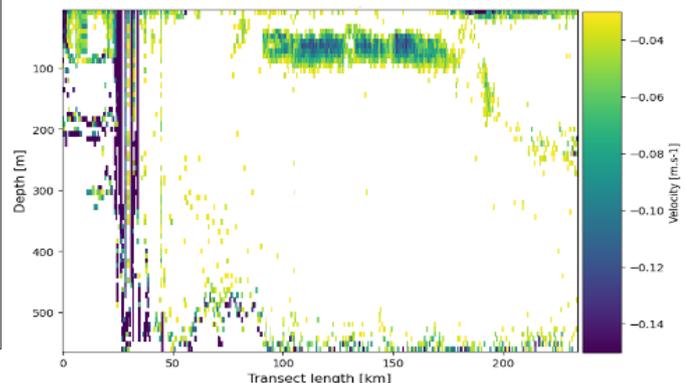


Figure 11 : Profil des vitesses verticales en-dessous de - 3 cm/s pour le transect 1.

Afin, de mieux visualiser les variations au sein de l'anomalie, l'échelle des couleurs a été modifiée, passant d'une valeur maximale de 10 cm/s à - 3 cm/s. La Figure 11 représente ce profil et confirme l'intérêt de préciser le premier seuil. En effet, l'anomalie est mieux sélectionnée et nous pouvons mieux observer ses variations.

3.4. Isolement de l'anomalie

Le profil obtenu grâce au second seuil est suffisant pour permettre l'observation de l'anomalie dans son ensemble. Néanmoins, nous pouvons constater qu'un bruit subsiste (à gauche et en bas du profil). Afin de l'éliminer, nous avons essayé plusieurs traitements avant de trouver le traitement optimal, imaginé par Stéphanie Barrillon (Figure 12). Il consiste en une méthode de test d'effet de regroupement composée de rectangles de 20 mesures en temps et 6 mesures en profondeur. Après de nombreux tests d'optimisation, nous avons choisi cette taille car elle sélectionnait mieux l'anomalie. Ce rectangle coulisse sur la longueur du transect puis sur la colonne d'eau. Si plus de 70% (valeur optimisée) des mesures dans le rectangle sont des vitesses en-dessous du seuil de - 3 cm/s, les valeurs sont gardées. Sinon, elles sont supprimées. Par exemple, le premier rectangle (1) étant rempli à plus de 70% de vitesses en-dessous de - 3 cm/s, les valeurs sont conservées (Figure 12 : Schéma de la méthode de test de regroupement imaginée par Stéphanie Barrillon.). Au contraire, les deuxième et troisième rectangles (2) et (3), n'étant pas suffisamment remplis, les valeurs sont supprimées. Cette méthode a été appliquée et nous avons obtenu la Figure 13. Nous pouvons constater que ce traitement sélectionne bien l'anomalie voulue en supprimant le bruit parasite.

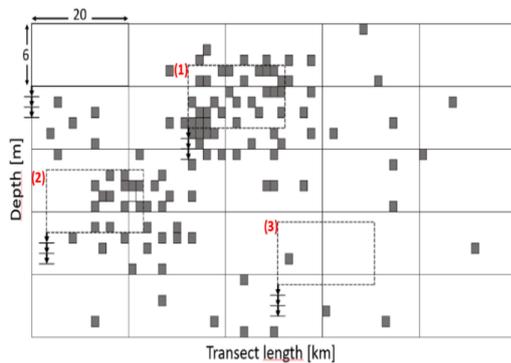


Figure 12 : Schéma de la méthode de test de regroupement imaginée par Stéphanie Barrillon.

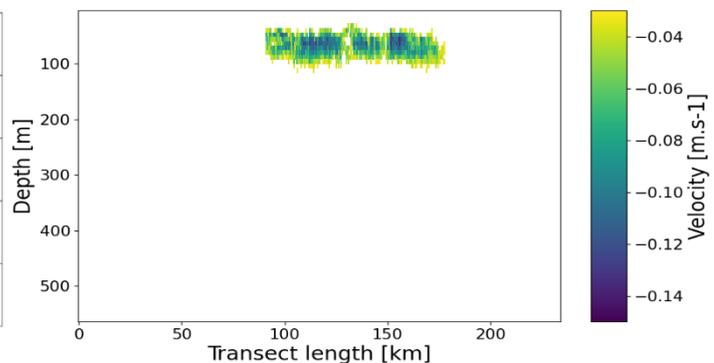


Figure 13 : Anomalie obtenue après application de la méthode de test de regroupement pour le transect 1.

3.5. Histogrammes des vitesses verticales avec et sans l'anomalie

Après avoir isolé l'anomalie, les histogrammes des vitesses verticales ont pu être tracés en conservant seulement les valeurs de la Figure 13. Tout d'abord, en traçant les histogrammes avec l'anomalie en rouge, l'« excédent » de vitesses verticales négatives peut être visualisé (Figure 14 (a)). L'anomalie peut ensuite être retirée de l'histogramme et nous obtenons une gaussienne (Figure 14 (b)) dont le centre est plus proche de 0 que précédemment mais dont l'écart-type ne change pas significativement.

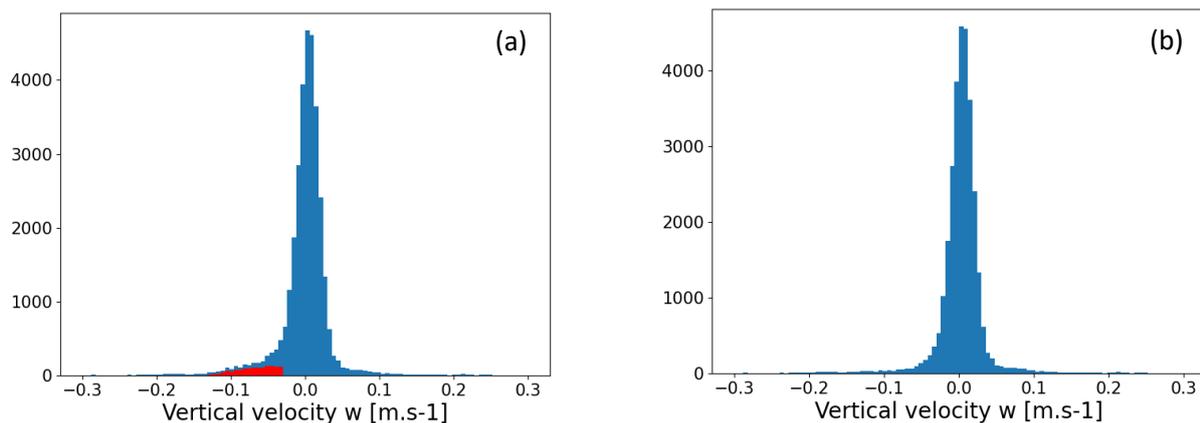


Figure 14 : Histogrammes des vitesses verticales avec l'anomalie en rouge (a) et après avoir retiré l'anomalie (b) pour le transect 1.

3.6. Caractéristiques de l'anomalie du transect 1

Ensuite, en isolant l'anomalie, ses caractéristiques (vitesses, temps et profondeurs) ont pu être calculées (Tableau 1). L'anomalie dure du 30 avril 19:45 au 1^{er} mai 03:17. Elle a une profondeur comprise entre 43 et 123 m et une vitesse moyenne de - 6,8 cm/s avec un écart-type de 2,5 cm/s. Pour obtenir une vision spatiale de l'anomalie dans la zone considérée, l'anomalie a été tracée sur la carte du transect 1 en rouge (Figure 15).

Tableau 1 : Caractéristiques de l'anomalie du 1^{er} transect.

| | | | |
|----------------|------------|------------------------|-------|
| Temps | Début | 30/04/2019 19:45:38 | |
| | Fin | 01/05/2019 03:17:36 | |
| | Durée | 07:31:58 | |
| Profondeur (m) | Moyenne | 80,3 | |
| | Minimale | 43 | |
| | Maximale | 123 | |
| Vitesse | Unités | m/s | cm/s |
| | Moyenne | -0,068 | -6,8 |
| | Minimale | -0,143 | -14,3 |
| | Maximale | -0,030 | -3,0 |
| | Ecart-type | 0,025 | 2,5 |

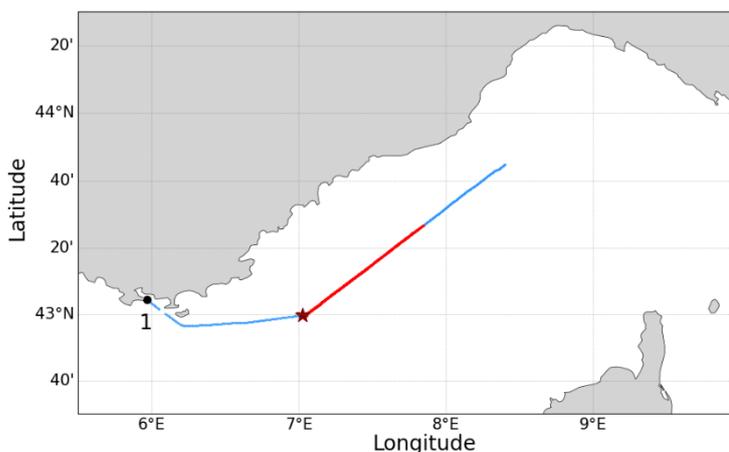


Figure 15 : Carte du transect en bleu avec un point noir et son numéro pour marquer son début, et anomalie en rouge avec une étoile marron pour marquer son début.

3.7. Temps des anomalies sur toute la campagne

Après avoir étudié l'anomalie du transect 1, nous avons réalisé le même traitement sur les autres transects. Une frise chronologique a été réalisée afin d'identifier la présence des anomalies sur les différents transects de la campagne (Figure 16). Cette frise est intéressante car elle rend

compte d'une périodicité du phénomène dans le temps, aux alentours de minuit. Tous les jours une anomalie apparaît, excepté la nuit du 03 mai quand l'équipe à bord a fait un arrêt au port et le matin du 05 mai lorsque l'équipe était dans la baie de Villefranche pour se réfugier de la tempête.

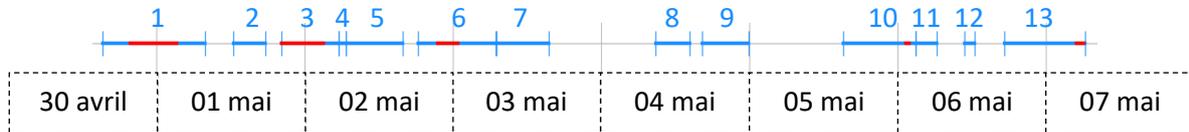


Figure 16 : Frise chronologique de la campagne avec les 13 transects en bleu et les anomalies en rouge.

La dernière anomalie (transect n°13) se trouve à la fin de la campagne, c'est-à-dire près de la côte lorsque le bateau est rentré au port. L'endroit où est détectée l'anomalie est donc certainement brouillé par la côte (Annexe I : Profils des vitesses verticales du transect 13). En outre, le tableau des temps des anomalies (Tableau 2), permet de voir que l'anomalie se produit de 05:01 à 06:11, ce qui ne correspond pas aux autres horaires des anomalies. Pour cela, l'anomalie de ce transect n'a pas été prise en compte dans la suite de l'étude car elle est sans doute due à des mesures faussées par la côte.

Tableau 2 : Temps des transects et des anomalies.

| Transect | Durée du TRANSECT | | | Durée de l'ANOMALIE | | |
|----------|------------------------|------------------------|----------|------------------------|------------------------|----------|
| | début | fin | durée | début | fin | durée |
| 1 | 30/04/2019 15:13:28 | 01/05/2019 07:51:37 | 16:38:09 | 30/04/2019 19:45:38 | 01/05/2019 03:17:36 | 07:31:58 |
| 3 | 01/05/2019 20:10:29 | 02/05/2019 05:28:28 | 09:17:59 | 01/05/2019 20:12:30 | 02/05/2019 03:00:28 | 06:47:58 |
| 6 | 02/05/2019 18:20:28 | 03/05/2019 06:57:12 | 12:36:44 | 02/05/2019 21:32:29 | 03/05/2019 00:52:28 | 03:19:59 |
| 10 | 05/05/2019 15:14:48 | 06/05/2019 02:58:48 | 11:44:00 | 06/05/2019 01:16:48 | 06/05/2019 01:54:50 | 00:38:02 |
| 13 | 06/05/2019 17:21:00 | 07/05/2019 06:27:03 | 13:06:03 | 07/05/2019 05:01:03 | 07/05/2019 06:11:01 | 01:09:58 |

Ce tableau indique que les anomalies des transects n° 1, 3 et 6 ont une durée importante (environ de trois à sept heures). Pour replacer ces horaires dans un contexte de recherche de processus biologiques, nous avons comparé les cycles solaires car ils influencent les organismes marins. En effet, la présence de lumière joue un rôle fondamental dans les processus de production biologique. Durant cette période du 30 avril au 07 mai, et dans la zone considérée, le soleil se levait entre 05:15 et 05:23 et se couchait entre 19:24 et 19:40 (UTC). Pour ces trois premiers transects, les temps des anomalies sont compris entre le lever et le coucher du soleil. En effet, les anomalies commencent toutes entre 19:45 et 21:32, après le coucher du soleil et se

terminent toutes entre 00:52 et 03:17 avant le lever du soleil. Néanmoins, les heures ne correspondent pas parfaitement. Il se peut que le bateau soit rentré plus tard, ou ait quitté plus tôt la zone où les anomalies avaient lieu ou que l'ADCP n'ait pas détecté les débuts et fins d'anomalies parce qu'elles étaient moins intenses et plus dispersées. On peut voir par exemple que l'anomalie du transect n°3 ne commence qu'à partir de 20:12 mais qu'elle ne pouvait pas être mesurée avant puisque le transect débute seulement à partir de 20:10 (en rouge dans le Tableau 2). De plus, le bateau s'était arrêté entre le transect n°2 et le transect n°3, induisant des mesures très bruitées.

3.8. Profondeurs et vitesses des anomalies sur toute la campagne

Les moyennes des profondeurs et des vitesses des anomalies ont été regroupées dans le Tableau 3. Comme énoncé précédemment, nous avons écarté les mesures du transect 13 considérant qu'elles sont sûrement faussées par la côte. C'est pourquoi ces mesures n'ont pas été prises en compte dans les moyennes (en rouge dans le Tableau 3). Ces résultats moyennés pour les anomalies des transects n° 1, 3, 6 et 10, montrent qu'elles se produisent en surface de 43 à 123 m de profondeur avec une moyenne autour de 80,18 m. Nous constatons également que les profondeurs minimales et maximales des trois premiers transects sont presque similaires (en bleu dans le Tableau 3).

Concernant les vitesses, la moyenne des vitesses verticales des anomalies est de - 6,5 cm/s avec un écart-type de - 2,4 cm/s en moyenne. Au vu des vitesses observées, cet écart-type est très important. L'écart entre les valeurs est en effet important puisque la vitesse minimale est de - 17,9 cm/s et la vitesse maximale de - 3,0 cm/s.

Tableau 3 : Profondeurs et vitesses des anomalies des transects 1, 3, 6 et 10.

| Transect | Profondeur (m) | | | Vitesse | | | | | | | |
|----------|----------------|-----|-----|---------|------|------------|------|----------|-------|----------|------|
| | moy. | min | max | moyenne | | écart-type | | minimale | | maximale | |
| | | | | m/s | cm/s | m/s | cm/s | m/s | cm/s | m/s | cm/s |
| 1 | 80,28 | 43 | 123 | -0,068 | -6,8 | 0,025 | -2,5 | -0,143 | -14,3 | -0,030 | -3,0 |
| 3 | 82,32 | 43 | 123 | -0,071 | -7,1 | 0,027 | -2,7 | -0,156 | -15,6 | -0,030 | -3,0 |
| 6 | 78,13 | 43 | 115 | -0,072 | -7,2 | 0,031 | -3,1 | -0,179 | -17,9 | -0,030 | -3,0 |
| 10 | 79,99 | 59 | 99 | -0,048 | -4,8 | 0,012 | -1,2 | -0,081 | -8,1 | -0,030 | -3,0 |
| Moy | 80,18 | 47 | 115 | -0,065 | -6,5 | 0,024 | -2,4 | -0,139 | -13,9 | -0,030 | -3,0 |

L'anomalie du transect n°10 a une durée très courte (environ une demi-heure d'après le Tableau 2). En outre, ses vitesses sont plus faibles que pour les trois premiers transects. En effet, alors que les trois premiers transects ont des vitesses moyennes autour de - 7 cm/s,

l'anomalie du transect n°10 a une vitesse moyenne de - 4,8 cm/s (en vert dans le Tableau 3). De plus, ses profondeurs extrêmes sont de 59 et 99 m alors que les trois premiers transects ont des profondeurs plus extrêmes avec un minimum à 43 m et un maximum à 123 m. Pour savoir si ces caractéristiques différentes (durée, profondeurs et vitesses) sont dues à l'entrée ou à la sortie d'une zone spatiale particulière qui influencerait la présence de l'anomalie, toutes les anomalies ont été tracées sur la carte de la trajectoire du bateau (Figure 17).

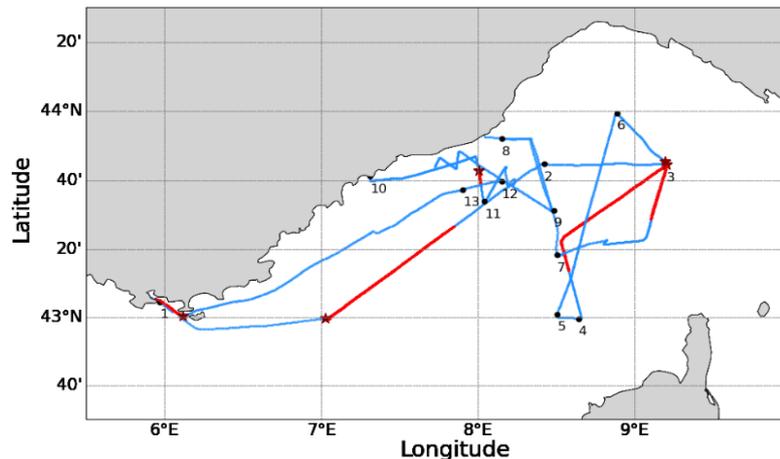


Figure 17 : Carte de la trajectoire du bateau (en bleu) avec un point noir et un chiffre pour marquer le début des transects et anomalies de vitesses négatives (en rouge) avec une étoile marron pour marquer le début.

3.9. Mise en parallèle avec les autres données de la campagne

Enfin, pour rechercher les processus biologiques à l'origine des anomalies, ces résultats ont été mis en parallèle avec les mesures de courantologie et d'abondance chlorophyllienne de la campagne FUMSECK (Comby, 2020) afin de comprendre la dynamique globale de ce phénomène (Figure 18). D'après la circulation méditerranéenne globale, trois zones courantologiques majeures se rencontrent en mer Ligure (Millot, 1987), le courant Nord en violet, formé par les deux courants provenant de part et d'autre de la Corse, une zone intermédiaire en vert et une zone de recirculation cyclonique en orange (Astraldi *et al.*, 1990, Comby, 2020). Les zones intermédiaires et de recirculation cyclonique sont plus salées que le courant Nord (Kieffer, 2020). Or, la présence des anomalies est observée uniquement dans ces deux zones. Les interprétations doivent donc prendre en compte les deux processus : temporel et spatial. C'est probablement pour cela que l'anomalie du transect n°10 commence bien plus tard que les autres et qu'elle a des caractéristiques différentes des anomalies des transects n°1, 3 et 6. En effet, dans la zone du courant Nord, il n'y a pas d'anomalie et elle ne commence que dans la zone intermédiaire (Figure 18).

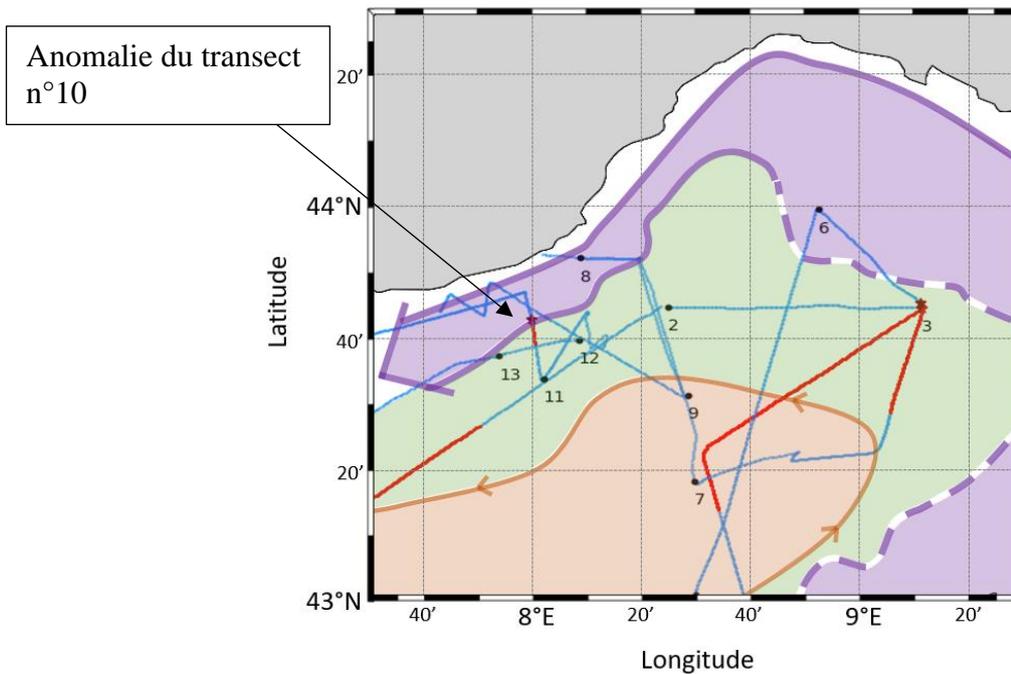


Figure 18 : Schéma des courants en mer Ligurie tracé à partir des données de courantologie et d'abondance chlorophyllienne et superposé à la trajectoire du transect et aux anomalies. Flèche montrant le début de l'anomalie du transect n°10. Adapté de Comby, 2020

4. Discussion

Le traitement réalisé à partir de la méthode de test d'effet de regroupement a permis d'isoler les anomalies. L'anomalie du transect 1 a été étudiée plus en détail, mais la méthode utilisée est valable pour les autres anomalies, ce qui permet de savoir que ce traitement fonctionne pour différentes données. L'hypothèse de départ supposait que les anomalies étaient dues à des migrations nyctémérales d'organismes marins dont la taille et l'espèce étaient inconnues. Grâce aux résultats obtenus, un schéma plus ou moins répétitif peut être observé avec des anomalies commençant après le coucher du soleil et se terminant avant le lever du soleil. Les profondeurs des anomalies se situent en surface et leurs vitesses sont de l'ordre du cm/s. Ces caractéristiques sont typiques des migrations nyctémérales des essaims de krill en Méditerranée. Des observations de leur distribution et de leur migration en mer Ligurie par ADCP ont déjà été publiées dans les années 2000 (Tarling *et al.* 1999 ; Tarling *et al.* 2001). Ces études montrent en effet que les migrations verticales du krill en surface sont influencées par la lumière du soleil.

Les échantillons prélevés au filet lors de plusieurs campagnes en mer Ligurie en mai (Sardou & Andersen, 1993 ; Sardou *et al.*, 1996) ont montré que deux groupes de zooplanctons

dominaient : les ptéropodes et les euphausiacés. Ces derniers étaient respectivement et majoritairement composés des espèces *Cavolinia inyexa* et *Meganyctiphanes norvegica*. Néanmoins, des différences d'abondance et des migrations saisonnières de la côte vers le centre de la mer Ligure sont possibles, indépendamment des fronts (Boucher, 1984). Par exemple, *Nematoscelis megalops* est abondamment présente à d'autres mois de l'année comme en septembre (Tarling *et al.* 2001). Ces trois espèces sont donc probablement à l'origine de mouvements verticaux en mer Ligure, dont ceux mesurés par ADCP de coque durant la campagne FUMSECK. Cette hypothèse semble cohérente puisque le krill est abondant en Méditerranée (McGehee *et al.* 2004) de 40 à 100 m de profondeur. Ces euphausiacés mesurent 1 à 3 cm de long (Labat & Cuzin-Roudy 1996) et servent de nourriture au rorqual commun (Littaye *et al.* 2004 ; Laran & Gannier 2008 ; Panigada *et al.* 2017).

Les anomalies observées dans notre étude semblent dépendre de la zone géographique. En effet, trois anomalies (transects n° 3, 6 et 10) débutent dans la zone intermédiaire et l'anomalie du transect n°6 continue dans la zone de recirculation cyclonique. Ces deux zones sont plus salées (Kieffer, 2020), ce qui est en accord, compte tenu de la localisation en zone cyclonique, avec des remontées des eaux profondes plus salées et plus riches en nutriments, favorisant la croissance phytoplanctonique. Cela pourrait expliquer la présence de krill dans ces zones.

Nous nous sommes concentrés sur l'anomalie la plus importante dans cette étude, cependant nous pouvons voir d'autres anomalies au début et à la fin de l'anomalie principale. Les essaims de krill montent à la surface et redescendent en profondeur en formant deux bandes (Tarling *et al.* 1999 ; Tarling *et al.* 2001 ; Sourrisseau *et al.* 2009 ; Annexe III : Figures 5 et 6 issues de Tarling *et al.* (2001)). Dans les données de la campagne FUMSECK, ces deux bandes de montées (transect n°1, 2 et 9) et de descentes (transects n° 1, 3, 6 et 11) peuvent être observées à l'œil nu (Annexe I : Profils des vitesses verticales). D'après Tarling *et al.* (2001), les individus d'un essaim ne vont pas à la même vitesse. Les premiers semblent ralentir pour rester en essaim avec les derniers (Wiebe *et al.* 1992 ; Heywood 1996). Ces deux bandes seraient donc justifiées par deux rails de krill migrant vers la surface à des vitesses différentes.

Dans l'étude de Tarling *et al.* (2001), l'espèce *M. norvegica* (Figure 19) migre vers le bas à des vitesses allant de - 2,8 cm/s à - 11,1 cm/s, ce qui correspond à l'ordre de grandeur des vitesses verticales moyennes des anomalies dans notre étude de - 3,0 cm/s à - 13,9 cm/s. Même si l'enfoncement par satiété reste une hypothèse de caractéristique commune aux essaims de krill qui, lorsque les concentrations en phytoplanctons sont importantes, s'enfoncent

passivement (Tarling *et al.* 2001) ; ces vitesses semblent correspondre à une nage active et non à un enfoncement passif (Sourisseau *et al.* 2009). Comme le soulignent Tarling & Thorpe (2017), ces vitesses descendantes semblent être générées par les krills battant continuellement leurs pléopodes (appendices locomoteurs), leur permettant ainsi de surmonter leur flottabilité négative pour maintenir leur position dans la colonne d'eau et rester pélagiques. Cela pourrait expliquer que l'anomalie reste « statique » en surface alors qu'elle est composée de vitesses négatives. Les essaims de krill seraient donc responsables des vitesses verticales négatives mesurées dans notre étude.



Figure 19 : *Meganyctiphanes norvegica*.
Source : [Wikimedia Commons](#)

Cette nouvelle hypothèse semble cohérente. Néanmoins, des biais subsistent sur les mesures prises par ADCP de coque et sur leur traitement. Cette méthode est encore préliminaire et demande encore des ajustements. De plus, l'ADCP réalise une moyenne de toutes les vitesses mesurées entre chaque intervalle de temps-profondeur. Les déplacements du krill sont donc moyennés dans cet intervalle et les vitesses pourraient être sous ou surestimées. Enfin, des interférences inconnues apparaissent dans les profils des vitesses verticales. (Annexe I : Profils des vitesses verticales). Celles-ci seraient peut-être dues à la distribution des organismes au sein de l'essaim (Tarling & Thorpe 2017).

5. Conclusion

Ce travail avait pour but d'isoler et d'identifier des anomalies de vitesses verticales obtenues par ADCP de coque afin d'en trouver l'origine et de comprendre la dynamique des écosystèmes en mer Ligure. L'objectif était d'obtenir un ordre de grandeur cohérent pour ces vitesses verticales (de l'ordre du mm/s à cm/s) pour pouvoir généraliser la mesure *in situ* de cette composante et garantir l'exploitation optimale des données du futur satellite SWOT, dont le lancement est prévu en 2022. Le défi était le caractère éphémère et dynamique dans l'océan des

vitesse verticales et leur ordre de grandeur, 10 à 1000 fois inférieur à celui des composantes horizontales. En outre, l'instrument utilisé était un ADCP de coque, qui mesure habituellement les composantes horizontales. Après avoir estimé une vitesse moyenne du bateau, une anomalie de vitesses verticales négatives a été trouvée sur plusieurs transects (Sue, 2020). Grâce à une méthode de test de regroupement, les anomalies ont pu être isolées et caractérisées (temps, profondeur, vitesse). Le schéma répétitif de cette anomalie et ses caractéristiques sont typiques des migrations nyctémérales des essaims de krill. En effet, le krill réalise des migrations verticales sous forme d'essaims en Méditerranée, probablement liées aux coucher et lever du soleil. Ces euphausiacés ont des vitesses négatives, mesurées dans cette étude, de - 3,0 cm/s à - 13,9 cm/s qui sembleraient leur permettre de maintenir leur position dans la colonne d'eau. Il est notamment important de noter les similitudes des zones géographiques où les anomalies se produisent. Il semblerait que ces zones plus salées favoriseraient la production phytoplanctonique et donc l'accumulation de krill. Cependant, cette étude est à approfondir, notamment certains aspects sur le traitement effectué. Néanmoins, grâce à cette étude, les prochaines campagnes auront des informations concernant les horaires et profondeurs de probables anomalies.

Références bibliographiques

- Astraldi, M., Gasparini, G., Manzella, G. & Hopkins, T., 1990. Temporal variability of currents in the eastern ligurian sea. *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 95(C2) :1515–1522.
- Barrillon, S., 2019. FUMSECK cruise, RV Téthys II. <https://doi.org/10.17600/18001155>
- Boucher, J., 1984. Localization of zooplankton populations in the Ligurian marine front: role of ontogenetic migration. *Deep-Sea Research* 31 (5), 469–484 .
- Clayton, S., Dutkiewicz, S., Jahn, O., & Follows M. J., 2013. Dispersal, eddies, and the diversity of marine phytoplankton. *Limnology and Oceanography : Fluids and Environments*, 3(1) :182–197.
- Comby, C., 2020. 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 de M2 Océanographie physique et biogéochimique. Université d'Aix-Marseille.
- Doglioli, A. & Rousselet, L., 2013. Users Guide for LATEXtools. fahal-00859246f
- Ferrari, R. & Wunsch, C., 2009. Ocean circulation kinetic energy: Reservoirs, sources, and sinks. *Annual Review of Fluid Mechanics*, **41**, 253–282.

- Flierl, G. & McGillicuddy, D. J., 2002. Mesoscale and submesoscale physical-biological interactions. *The sea*, 12 :113–185.
- Heywood, K.J., 1996. Diel vertical migration of zooplankton in the northeast Atlantic. *Journal of Plankton Research* 18 (2), 163–184.
- Kieffer, L., 2020. Couplage physique-biologie à fines échelles océanique, analyse des données de FUMSECK. Rapport de stage de L3 Océanographie physique et biogéochimique. Université d'Aix-Marseille.
- Labat J.Ph. and Cuzin-Roudy, J. 1996. Population dynamics of the krill *Meganyctiphanes norvegica* (M.Sars, 1857) (Crustacea: Euphausiacea) in the Ligurian Sea (NW Mediterranean Sea). Size structure, growth and mortality modelling. *Journal of Plankton Research* Vol.18 no.12 pp.2295-2312.
- Laran, S. & Gannier, A., 2008. Spatial and temporal prediction of fin whale distribution in the northwestern Mediterranean Sea, *ICES Journal of Marine Science*, Volume 65, Issue 7, October 2008, Pages 1260–1269, <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsn086>
- Lévy, M., 2008. The modulation of biological production by oceanic mesoscale turbulence. in *Transport and Mixing in Geophysical Flows* (Weiss J. B. & A. Provenzale, Ed.), Springer, 219–261, 262 pp.
- Lévy, M., Franks, P.J., & Smith, K.S., 2018. The role of submesoscale currents in structuring marine ecosystems. *Nature communications*, 9(1) :1–16.
- Lévy, M., Iovino, D., Resplandy, L., Klein, P., Madec, G., Tréguier, A.-M., *et al.*, 2012. Large-scale impacts of submesoscale dynamics on phytoplankton: Local and remote effects. *Ocean Modelling*, **43**, 77–93.
- Lévy, M., Jahn, O., Dutkiewicz, S., Follows, M.J., & F. d'Ovidio, 2015. The dynamical landscape of marine phytoplankton diversity. *Journal of The Royal Society Interface*, 12(111) :20150481.
- Lévy, M., Klein, P., & Treguier, A.-M., 2001. Impact of sub-mesoscale physics on production and subduction of phytoplankton in an oligotrophic regime. *Journal of marine research*, 59(4) :535–565.
- Littaye A. *et al.* 2004. The relationship between summer aggregation of fin whales and satellite-derived environmental conditions in the northwestern Mediterranean Sea. *Remote Sensing of Environment* 90 (2004) 44–52
- 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. & Fasham M.J., 2001. Phytoplankton production and community structure in an unstable frontal region. *Journal of Marine Systems*, **28**, 65–89.

McGehee, D. E., Demer, D. A. and Warren, J. D., 2004. Zooplankton in the Ligurian Sea: Part I. Characterization of their dispersion, relative abundance and environment during summer 1999, *J. Plankton Res.*, 26, 1409-1418, doi: <https://doi.org/10.1093/plankt/fbh132>

McGillicuddy, D.J., 2016. Mechanisms of Physical-Biological-Biogeochemical Interaction at the Oceanic Mesoscale. *Annual Review of Marine Science*, 8, 125–159.

Millot, C., 1987. Circulation in the western mediterranean-sea. *Oceanologica Acta*, 10(2) :143–149.

Panigada, S., Lauriano, G., Donovan, G., Pierantonio, N., Cañadas, A., Vázquez, J. A., *et al.*, 2017. Estimating cetacean density and abundance in the Central AND WESTERN Mediterranean Sea through aerial surveys: implications for MANAGEMENT, Deep-Sea Research Part II, <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr2.2017.04.018>

Pascual, A., Ruiz, S., Olita, A., Troupin, C., Claret, M., Casas, B., *et al.*, 2017. A multiplatform experiment to unravel meso-and submesoscale processes in an intense front (alborex). *Frontiers in Marine Science*, 4 :39.

Petrenko, A.A., Doglioli, A.M., Nencioli, F., Kersalé, M., Hu, Z. & F. d'Ovidio, 2017. A review of the LATEX project: mesoscale to submesoscale processes in a coastal environment. *Ocean Dynamics*, 24, 513–533.

Petrenko, A.A., 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

Ptacnik, R., Solimini, A. G., Andersen, T., Tamminen, T., Brettum, P., Lepistö, L., *et al.*, 2008. Diversity predicts stability and resource use efficiency in natural phytoplankton communities. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105 (13) :5134–5138.

RD Instrument. 2008. ADCP coordinate transformation: Formulas and calculations. RDI Manual P/N 951-6079-00, 31 pp.

Rousselet, L., Doglioli, A.M., de Verneil, A., Pietri, A., Della Penna, A., Berline, L., *et al.*, 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.

Sardou, J. & Andersen, V., 1993. Micronekton et macroplankton en mer Ligure (Méditerranée): migrations nyctémérales et distributions verticales. *Oceanol. Acta*, 16, 381–392.

Sardou, J., Etienne, M. & Andersen, V., 1996. Seasonal abundance and vertical distributions of macroplankton and micronekton in the northwestern Mediterranean Sea. *Oceanol. Acta*, 19, 645–656.

Sourisseau, M., Simard, Y., Saucier, F. J., 2009. Krill diel vertical migration fine dynamics, nocturnal overturns, and their roles for aggregation in stratified flows (vol 65, pg 574, 2008) . *Canadian journal of fisheries and aquatic sciences* , 65(4), 574-587 . Publisher's official

version : <https://doi.org/10.1139/F09-017> , Open Access version :
<https://archimer.ifremer.fr/doc/00000/7373/>

Sue, O., 2020. Mesure de la composante verticale de vitesse basée sur les données courantométriques obtenues par ADCP de coque durant la campagne FUMSECK 2019. Rapport de stage de L2 Océanographie physique et biogéochimique. Université d'Aix-Marseille.

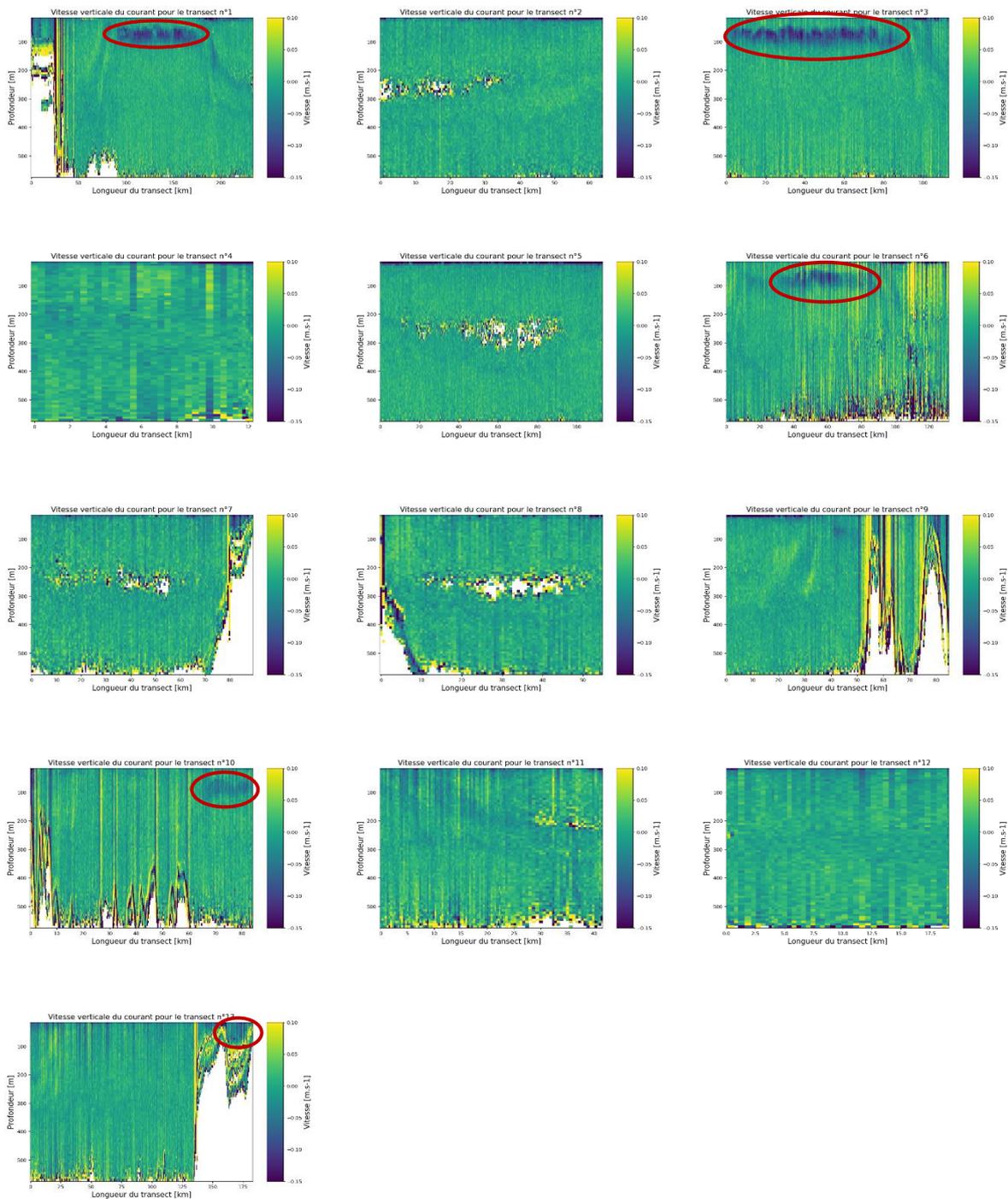
Tarling, G. A., Buchholz, F., & Matthews, J. B. L., 1999. The effect of lunar eclipse on the vertical migration behaviour of *Meganyctiphanes norvegica* (Crustacea: Euphausiacea) in the Ligurian Sea. *Journal of Plankton Research*, 21(8) 1475–1488.

Tarling, G. A., Matthews, J. B. L., David P., Guerin O. & Buchholz F., 2001. The swarm dynamics of northern krill (*Meganyctiphanes norvegica*) and pteropods (*Cavolinia inyexa*) during vertical migration in the Ligurian Sea observed by an acoustic Doppler current profiler. *Deep-Sea Research I* 48 (2001) 1671–1686.

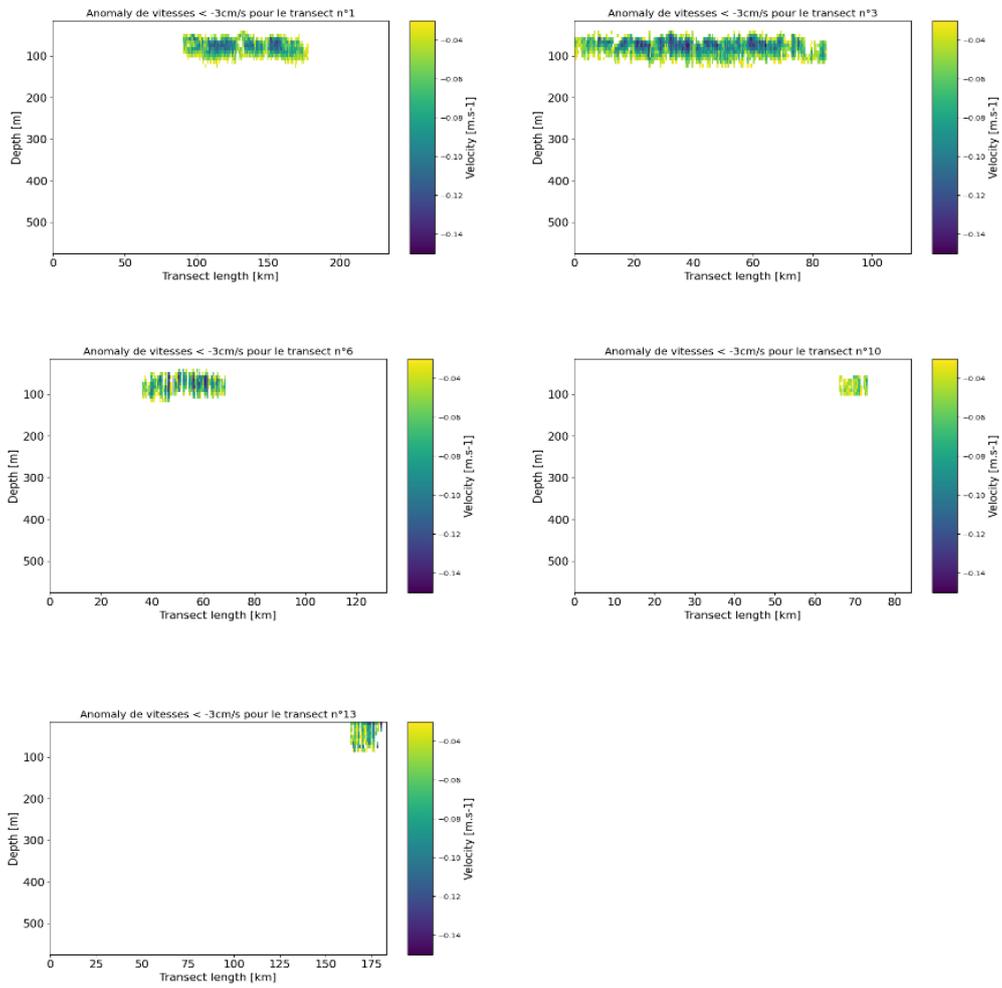
Tarling G. A., Thorpe S. E., 2017. Oceanic swarms of Antarctic krill perform satiation sinking. *Proc. R. Soc. B* 284: 20172015. <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2017.2015>

Wiebe, P.H., Copley, N.J., Boyd, S.H., 1992. Coarse-scale horizontal patchiness and vertical migration of zooplankton in Gulf Stream warm-core ring 82-H. *Deep-Sea Research* 39 (Suppl.), S247–S278.

Annexe I : Profils des vitesses verticales



Annexe II : Anomalies des transects



Annexe III : Figures 5 et 6 issues de Tarling *et al.* (2001)

Figure 5

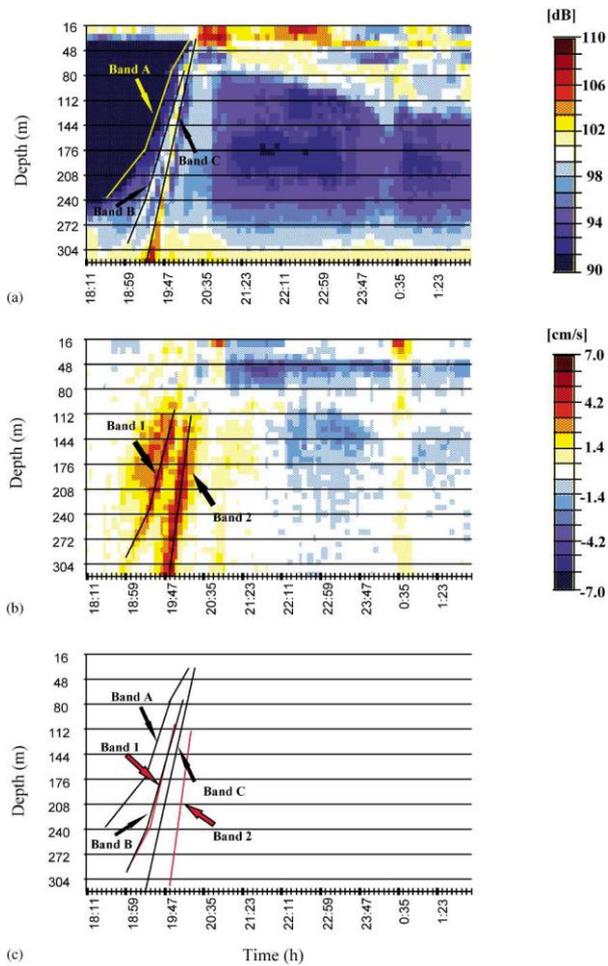


Figure 6

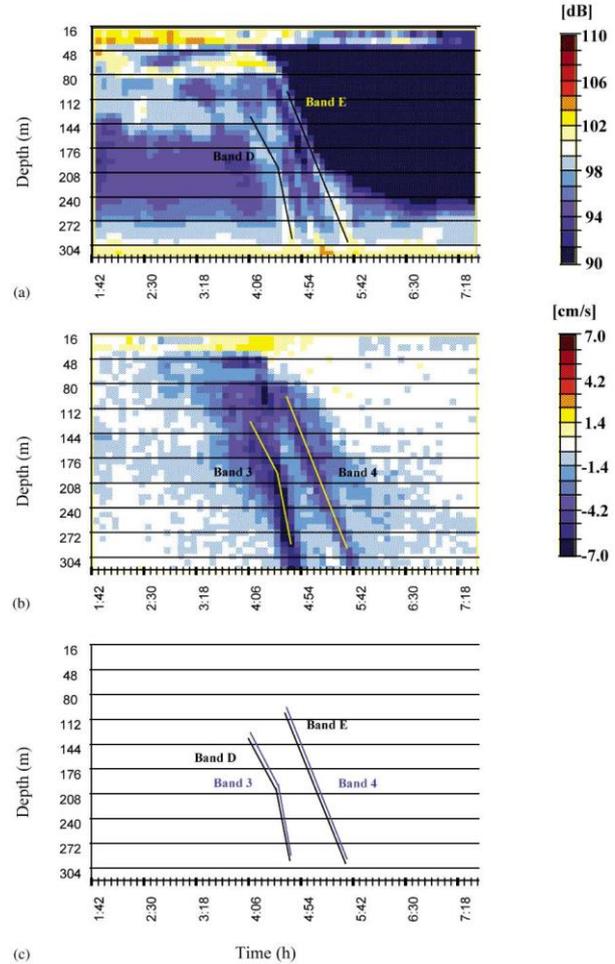


Fig. 5. (a) The relative backscatter (dB) measured by 150 kHz ADCP during the period from 18:00 to 02:00 h on 19–20 September 1997 highlighting three major bands of high backscatter (Bands A, B and C). (b) The Doppler-shift vertical velocity (cm s^{-1}) during the corresponding period highlighting two major bands of high upward velocity (Bands 1 and 2). (c) A comparison of depth and timing of the backscattering and Doppler bands.

Fig. 6. (a) The relative backscatter (dB) measured by 150 kHz ADCP during the period from 01:30 to 07:30 h on 21 September 1997 highlighting two major bands of high backscatter (Bands D and E). (b) The Doppler-shift vertical velocity (cm s^{-1}) during the corresponding period highlighting two major bands of high downward velocity (Bands 3 and 4). (c) A comparison of depth and timing of the backscattering and Doppler bands.

Annexe IV : Programme python

Mon programme est accessible ici : (github.com)

Résumé

Mots-clés : campagne FUMSECK, ADCP de coque, vitesse verticale des courants, migration nycthémerale, essaims de krill

Les vitesses verticales sont souvent négligées en océanographie du fait de leur faible ordre de grandeur, du mm/s à cm/s, et de leur caractère éphémère, les rendant difficiles à mesurer *in situ*. Pourtant, cette composante de la vitesse joue un rôle fondamental dans les processus de production phytoplanctonique. C'est pourquoi la campagne FUMSECK a utilisé un ADCP de coque, mesurant habituellement les composantes horizontales, pour mesurer ces vitesses dans la mer Ligure. Le but de ce stage était d'identifier des anomalies de vitesses verticales. Une méthode de test de regroupement a permis d'isoler et de caractériser ces anomalies avec un ordre de grandeur cohérent. Elles survenaient entre le coucher et le lever du soleil, à des profondeurs comprises entre 43 et 123 m et étaient composées de vitesses verticales négatives de - 3,0 cm/s à - 13,9 cm/s. Elles ont pu être identifiées comme des migrations nycthémerales d'essaims de krill.

Abstract

Keywords: FUMSECK campaign, vessel-mounted ADCP, current vertical velocity, nycthemeral migrations, krill swarms

Vertical velocities are often neglected in oceanography because of their low order of magnitude of mm/s to cm/s, and because of their ephemeral nature, making them difficult to measure *in situ*. However, this velocity component plays a fundamental role in phytoplankton productivity and growth. Therefore, the FUMSECK cruise used a vessel-mounted ADCP, usually measuring horizontal components, to measure these velocities in the Ligurian Sea. The goal of this study was to identify vertical velocity anomalies. Using a grouping test method, we were able to isolate and characterize these anomalies with a reasonable order of magnitude. They occurred between sunset and sunrise, at depths between 43 and 123 m and were composed of negative vertical velocities from - 3.0 cm/s to - 13.9 cm/s. They were identifiable as nycthemeral migrations of krill swarms.