

Couplage physique-biologie à fines échelles océaniques

Analyse des données de la campagne FUMSECK en
mer Ligure

Lola Kieffer

Mémoire de stage en laboratoire de recherche
Sous la direction de S. Barrillon, chercheuse au MIO

Licence SVT parcours Mer option physique et biogéochimie promotion 2019-2020
Institut Méditerranéen d'Océanologie

Remerciements

Je tiens à remercier en premier ma maître de stage, S. Barrillon, sans qui ce stage n'aurait pu être possible et qui n'a cessé de me soutenir, m'encourager et m'encadrer depuis Janvier, et ce malgré la mise en place du télétravail à la fin du stage. Merci d'avoir lu et relu, corrigé et recorrecté mon rapport et mes innombrables fautes.

Merci à toute l'équipe OPLC (Océanographie Physique Littorale et Côtière) du MIO de m'avoir (longuement) écoutée lors des présentations de mes travaux sur Skype et merci à Caroline de m'avoir laissée utiliser sa super figure.

Et enfin, merci à ma famille et mes ami(e)s de m'avoir relue, d'avoir écouté contre leur gré mes explications et d'avoir partagé mes galères informatiques.

Table des matières

1	Introduction	1
2	Matériel et méthodes	3
2.1	La campagne FUMSECK	3
2.2	Données in-situ/Instruments	4
2.3	Caractérisation des masses d'eau	4
3	Résultats	5
3.1	Identification des masses d'eau	5
3.2	Évolution des masses d'eau en fonction de la profondeur	9
3.3	Circulation globale	14
4	Discussion	15
4.1	Physique	15
4.2	Biologie	16
5	Conclusion	17
	Références	19
	Annexes	I

1 Introduction

Les masses d'eau océaniques sont caractérisées par leur température, salinité et densité ou masse volumique. Leur circulation en profondeur dépend de la différence de leur masse volumique, qui est en lien direct avec la température et la salinité comme le montre l'équation d'état de l'eau de mer. Avec l'évaporation, la masse volumique ainsi que la salinité des masses en surface, chauffées par le rayonnement solaire, augmentent. Plus denses, elles plongent en profondeur où elles se modifient au contact des eaux environnantes, qui ont des propriétés physiques différentes.

Dans le contexte climatique actuel, il est crucial de comprendre les mécanismes influençant les cycles biogéochimiques, notamment celui du carbone. L'océan absorbe actuellement 25 % des 2.5 Gt de carbone émis par les activités anthropiques. Il est stocké à plus ou moins long terme grâce à des processus physiques (subduction) et biologiques (sédimentation). Contribuant à 50 % de la production primaire, la communauté planctonique joue un rôle important dans la stabilisation et le fonctionnement des écosystèmes marins et des cycles biogéochimiques (Ptacnik et al., 2008), notamment le cycle du carbone (Falkowski et al., 1998). Cependant, la diversité planctonique est dynamique, les planctons sont dispersés par les courants, compliquant leur étude (Clayton et al., 2013). La variation de la diversité planctonique augmente d'autant plus à méso- (~ 100 km) et submésos-échelle (~ 10 km) (Lévy et al., 2001; Lévy, 2008; Lévy et al., 2015) avec la modification de la distribution de la matière biogéochimique par les mouvements verticaux (Lévy et al., 2015; Mahadevan, 2016; McGillicuddy Jr, 2016) et horizontaux (Flierl and McGillicuddy, 2002). En effet, la physique à submésos-échelle est responsable de plus de 1/3 de la nouvelle production et de la subduction du phytoplancton à plus grande échelle (Lévy et al., 2015). De récents travaux suggèrent une tendance à l'augmentation de la production et de la diversité planctonique par la dynamique océanique à submésos-échelle, notamment sur les fronts, où, d'une part, les nutriments sont plus abondants et, d'autre part, les phytoplanctons sont en contact avec d'autres communautés phytoplanctoniques présentes dans les masses adjacentes (Lévy et al., 2015, 2018). Par ailleurs, l'upwelling formé par un tourbillon cyclonique fait remonter les eaux riches en nutriments dans la couche euphotique, provoquant une augmentation de la production phytoplanctonique (Falkowski et al., 1991). Il est cependant difficile d'étudier les structures à fine échelle car elles sont très éphémères, de quelques mois pour les tourbillons à quelques jours pour les fronts. Or, une étude efficace des processus physiques à fine échelle nécessite des observations et des échantillonnages in-situ, ainsi que des observations satellites et des modèles numériques (Mahadevan, 2016; Pascual et al., 2017; Lévy et al., 2018).

Récemment, la NASA (National Aeronautics and Space Administration) et le CNES (Centre National d'Études Spatiales) ont programmé conjointement la mise en place d'un nouveau satellite d'altimétrie SWOT (Surface Water and Oceanographic Topography)

dont le but est de mesurer précisément la quantité d'eau douce globale. Le lancement est prévu début 2022. Il permettra, entre autres, de caractériser la circulation océanique de méso et subméso-échelle à une résolution spatiale de 15 km et moins. Cela marquera une avancée importante en océanographie physique, biologique et biogéochimique. Pour anticiper le lancement de ce nouvel outil, l'Institut Pierre-Simon-Laplace (IPSL) et l'Institut Méditerranéen d'Océanologie (MIO) ont créé conjointement le projet BioSWOT, soutenu par le CNES, qui vise à exploiter les observations du satellite SWOT pour l'analyse des couplages biogéochimiques dans l'océan de surface. Depuis 2015, trois campagnes océanographiques ont été organisées, dont la campagne FUMSECK (Facilities for Updating the Mediterranean Submesoscale-Ecosystem Coupling Knowledge) en 2019 dirigée par S. Barrillon (MIO). Cette campagne s'est déroulée durant une semaine, du 30 Avril 2019 au 7 Mai 2019, en mer Ligure, à bord du navire océanographie Téthys II, dans le but de tester de nouvelles méthodes et instruments océanographiques permettant l'étude des phénomènes et de la dynamique océanique à fine échelle spatiale (de 0.1 km à 100 km) et temporelle (1 à 10 jours). Le bateau était équipé d'un MVP (Moving Vessel Profiler), d'un thermosalinographe (TSG), d'un fluorimètre et d'un ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) pour mesurer la température, la salinité, la fluorescence en profondeur et les courants horizontaux, ainsi que d'un cytomètre en flux automatisé pour mesurer les concentrations et la diversité des communautés planctoniques en surface. Plusieurs instruments ont été également testés pour mesurer la vitesse verticale. Le site d'étude est le même que pour la campagne OSCAHR (Observing Submesoscale Coupling At High Resolution, PIs : A.M. Doglioli et G. Grégori (Doglioli and Grégori, 2015)), qui visait à étudier les effets d'une structure à méso-échelle sur la distribution planctonique et les cycles biogéochimiques associés.

La mer Ligure est caractérisée principalement par un régime oligotrophe. Au printemps, les couches supérieures se stratifient augmentant les chances d'apparition d'efflorescences phytoplanctoniques en surface (Sverdrup, 1955). D'après la circulation méditerranéenne globale, nous observons trois courants majeurs en mer Ligure (Millot, 1987). Formés à partir de l'eau Atlantique provenant du Déroit de Gibraltar (Millot, 1987), les deux courants de part et d'autre de la Corse (WCC (Western Corse Current) et ECC (Eastern Corse Current)) circulant vers le nord se rejoignent dans le golf de Gênes pour former le courant Nord (NC), anciennement connu sous l'appellation de courant Liguro-Provençal (Millot, 1999), qui longe les côtes italiennes et françaises vers l'Ouest, suivant le relief de la pente continentale (Fig.1). Ces courants forment une circulation antihoraire qui, selon certaines conditions météorologiques, peut s'intensifier pour former une gyre cyclonique (Astraldi et al., 1990).

Ce stage a pour vocation d'utiliser les données du MVP afin de différentier et caractériser les masses d'eau rencontrées tout au long de la campagne FUMSECK. Nous commencerons par différentier les différentes eaux en longitude et latitude sur les dia-

grammes température-salinité (TS) afin de repérer les zones de fronts et de les comparer à ceux identifiés par les Finite-Size Lyapunov Exponents (FSLEs) calculés grâce aux courants géostrophiques issus de l’altimétrie satellite. Après avoir repéré les principales masses d’eau rencontrées, nous les étudierons en fonction de la profondeur. Ces données physiques seront mises en parallèle, lorsque cela est possible, avec les données biologiques de fluorescence en profondeur et du cytomètre en flux automatisé en surface pour comprendre leur lien avec la dynamique planctonique.

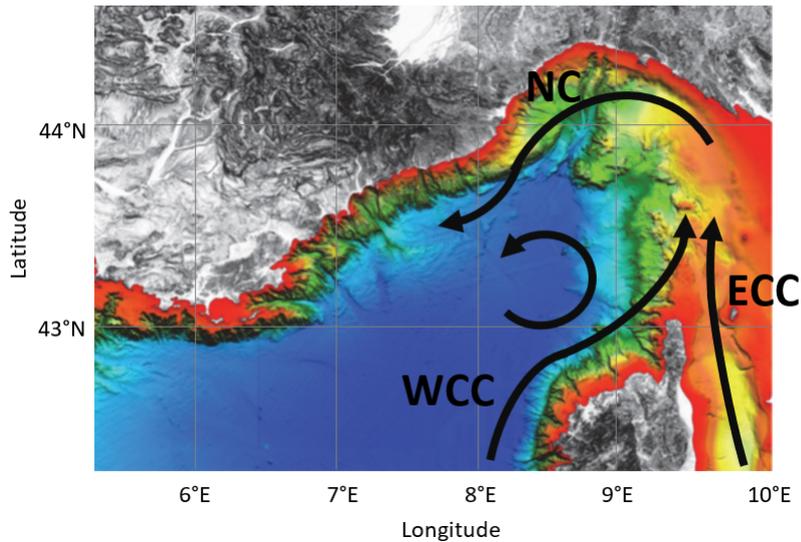


FIGURE 1 – Schéma des principaux courants en mer Ligure formés par l’eau d’Atlantique (NC = Courant Nord ; WCC = Courant Corse Ouest ; ECC = Courant Corse Est) (Millot, 1987) avec en fond une carte bathymétrique de la mer Ligure (bleu : bassin profond ; rouge : plateau continental ; vert et jaune : pente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

2 Matériel et méthodes

2.1 La campagne FUMSECK

La campagne FUMSECK s’est déroulée du 30 Avril 2019 au 7 Mai 2019 par une équipe de l’Océanographie Physique, Littorale et Côtière (OPLC) et de l’axe transverse Couplage du MIO dans le golfe de Gênes à bord du N/O Téthys II. Les profils MVP ont été établis entre N 43 ° et N 44 ° et entre 5 m et 300 ou 350 m de profondeur, selon la topographie, jusqu’au nord de la Corse avec des stations de mesure de vitesses verticales entre les transects (Fig.2), chaque transect durant en moyenne 8h. L’équipe sur le bateau était accompagnée par une équipe à terre qui leur transmettait les informations satellites sous forme de bulletins journaliers à l’aide du logiciel SPASSO (Software Package for an Adaptive Satellite-based Sampling for Ocean campaigns (Doglioli et al., 2013)),

susceptibles de modifier leur trajectoire initiale (repérage d'une structure à submésos-échelle, d'un front ou d'un filament de fluorescence).

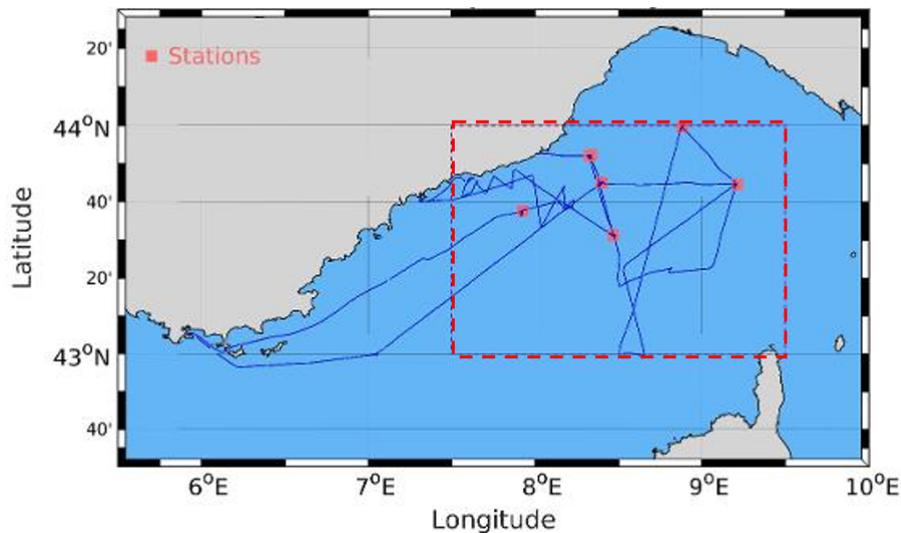


FIGURE 2 – Carte des transects d'intérêt (encadré en rouge) de la campagne FUMSECK du 30/04/2019 au 07/05/2019 avec les localisations des stations (points rouges).

2.2 Données in-situ/Instruments

Le bateau était équipé d'un MVP200 (Moving Vessel Profiler), avec le « gros poisson » (Multi Sensor Free Fall Fish), ainsi que d'une sonde CTD (conductivité, température, profondeur) classique, d'un thermo-salinomètre SeaBird SBE 21 et d'un fluorimètre 10-AU-005-CE Turner Designs pour récupérer les paramètres physique classiques en surface et dans la colonne d'eau. Il était également équipé d'un ADCP de coque RDI 75 kHz, pour la mesure des courants le long de la trajectoire, et enfin d'un ADCP Sentinel, d'un L-ADCP et d'un FF-ADCP (Free Fall ADCP) pour les mesures de vitesses verticales par station. Deux cytomètres en flux automatisé, cytosense et C6, quantifiaient toutes les 20 minutes l'abondance des communautés planctoniques dans l'eau de surface (synchococcus, prochlorococcus, microplanctons, nanoplanctons et picoeucaryotes). Le GPS 2 têtes Hemisphere VS330 permettait d'obtenir le cap, la position et l'altitude.

2.3 Caractérisation des masses d'eau

La campagne FUMSECK a été divisée en 7 transects (Fig.2). L'objectif est de visualiser les caractéristiques de température et salinité des masses d'eau rencontrées sur la campagne. Les diagrammes Température-Salinité (TS) seront d'abord traités transect par transect pour repérer les différentes masses d'eau et les fronts entre celles-ci, visibles sur les cartes des FSLEs (Finite-Size Lyapunov Exponents). Ces cartes sont créées à partir des

courants géostrophiques calculés à partir des données satellites d'altimétrie et permettent de visualiser la trajectoire des particules et notamment de remarquer les structures de méso- et subméso-échelle.

L'étude transect par transect permet de déduire les caractéristiques des masses d'eau récurrentes puis de les rassembler sur un seul diagramme TS réunissant les 7 transects. Ensuite, la variation de ces masses d'eau en fonction de la profondeur sera étudiée tout au long de la campagne.

Le couplage avec la biologie est étudié en comparant les résultats obtenus sur les masses d'eau aux données de fluorescence en fonction de la profondeur, puis aux données du cytomètre en flux automatisé caractérisant les abondances (nombre de cellules.L⁻¹) des colonies planctoniques suivantes : prochlorococcus, synechococcus, microplanctons, nanoplanctons et picoeucaryotes.

La densité sur les diagrammes TS est calculée en prenant en compte la salinité absolue d'après l'équation thermodynamique de l'eau de mer (TEOS-10).

3 Résultats

3.1 Identification des masses d'eau

Dans cette partie, chacun des diagrammes TS correspondant à chaque transect a été différencié selon la longitude et/ou la latitude de sorte à visualiser les caractéristiques des masses d'eau impliquées et les zones de fronts.

Nous étudierons les transects 3 et 6 pour illustrer cette partie. Le transect 3 a été réalisé entre le 1er et le 2 Mai 2019 près de la Corse en partant du Nord vers le Sud. Sur la carte des FSLEs, nous remarquons deux fronts (en blanc sur la Fig.3) aux mêmes endroits où l'ADCP a enregistré des changements de direction des courants à 16 m de profondeur : de Sud-Est, les courants passent en direction de l'Est après le premier front, puis direction Nord-Est et Nord après le deuxième front.

Ces changements sont visibles par une variation de caractéristiques de température et salinité des masses d'eau (Fig.4). La masse noire, qui correspond à la fin du transect après le deuxième front, est bien moins salée que les deux autres et est bien visible sur le graphique de la salinité (Fig.5). Les masses d'eau ne se différencient plus entre 38.4 g.kg⁻¹ et 38.8 g.kg⁻¹ de salinité. La température ne semble pas affectée par le premier front mais augmente légèrement en profondeur au niveau du deuxième front, comme montré sur le graphique de la température (Fig.5).

Le transect 6 a été réalisé le 4 Mai 2019 et correspond à l'entrée dans le courant Nord (de E 8.47 ° et N 43.53 ° à E 7.89 ° et N 43.8 °) (Fig.1). La carte des FSLEs superposée aux courants ADCP à 16 m de profondeur montre un front sur le début du transect (Fig.6) avec un changement de la direction des courants de Nord-Ouest à Sud-Ouest. Les

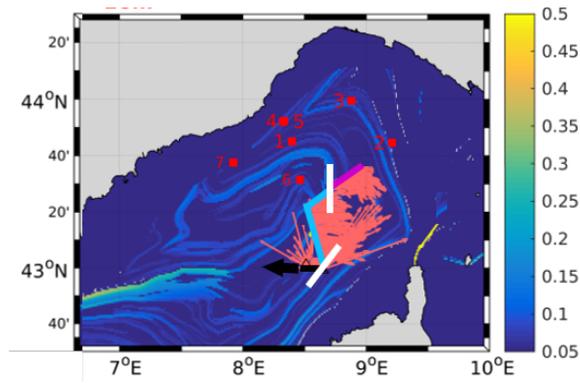


FIGURE 3 – Carte satellite des fronts (FSLEs) en surface (filaments bleus clairs) superposée aux courant ADCP à 16 m de profondeur (flèches orange) le long du transect (ligne noire) fait en direction du Sud (flèche noire). Plus la valeur de FSLEs est élevée, plus la séparation des trajectoires des particules est rapide. Les traits blancs mettent en évidence deux fronts qui traversent le transect accompagnés de changement de direction des courants. Les couleurs magenta, bleu et noire correspondent à celles sur la Fig.4.

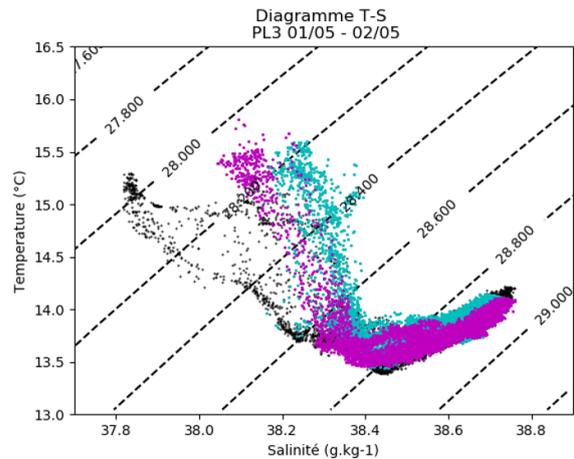


FIGURE 4 – Diagramme de la température ($^{\circ}\text{C}$) en fonction de la salinité (g.kg^{-1}) avec la masse volumique (kg.m^{-3} , moins 1000), du transect 3 fait entre le 1er et le 2 Mai 2019. Magenta : de N 43.67° - E 9.08° à N 43.48° - E 8.71° ; bleu : de N 43.48° - E 8.71° à N 43.1° - E 8.62° ; noire : de N 43.1° - E 8.62° à N 43° - E 8.55° .

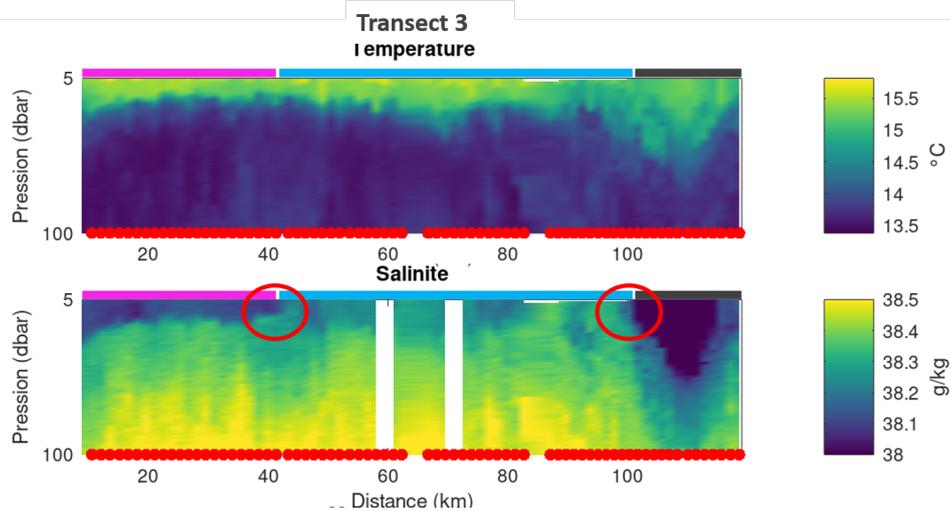


FIGURE 5 – Graphique de la température ($^{\circ}\text{C}$) et de la salinité (g.kg^{-1}) mesurées par le MVP en fonction de la profondeur calculée avec la pression et de la distance depuis le début du transect pour chaque profil (point rouge) du transect 3. Les traits magenta, bleus et noirs correspondent à la séparation faite Fig.4. Les fronts sont encadrés en rouges et marqué par une brusque variation de la salinité.

caractéristiques de température et salinité des deux colonnes d'eau sont bien distinctes sur le diagramme TS (Fig.7). Toutes les mesures de température sont situées entre 13.5°C

et 16.3 °C. Nous remarquons que la colonne d'eau située entre N 43.5 ° et N 43.6 ° de latitude (vert clair) est globalement moins salée que la colonne située entre N 43.6 ° et N 43.8 ° de latitude (bleue).

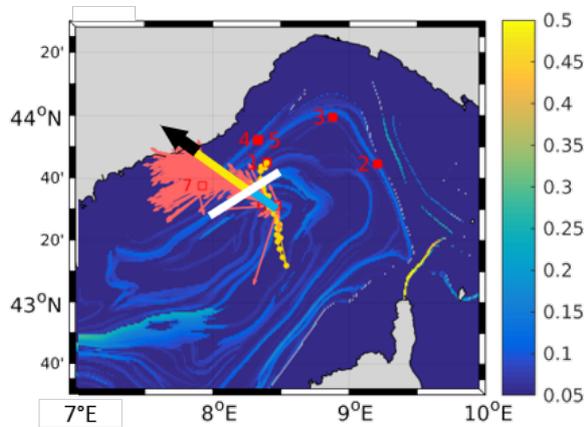


FIGURE 6 – Carte satellite des fronts (FSLEs) en surface (filaments bleus clairs) superposée aux courants ADCP à 16 m de profondeur (flèches orange) le long du transect (ligne noire) fait en direction du Nord-Ouest (flèche noire). Le trait blanc met en évidence un front qui traverse le début du transect accompagné d'un changement de direction des courants, de Nord-Ouest à Sud-Ouest. Les couleurs jaune et bleu correspondent à celles sur la Fig.7.

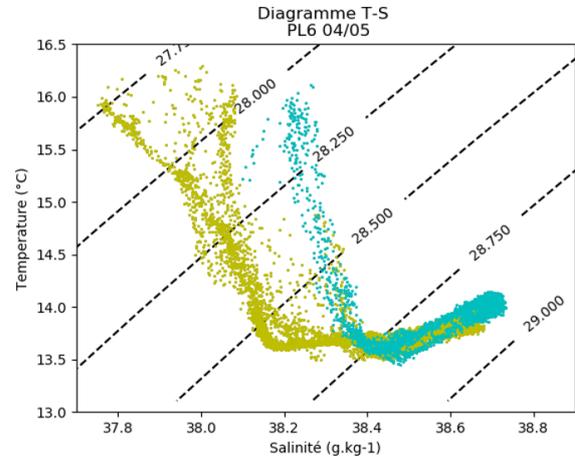


FIGURE 7 – Diagramme de la température (°C) en fonction de la salinité (g.kg^{-1}) avec la masse volumique (kg.m^{-3} , moins 1000), du transect 6 fait le 4 Mai 2019. Chaque couleur correspond aux colonnes d'eau de part et d'autre d'une séparation en latitude ($\text{N } 43.6^\circ$) et en longitude ($\text{E } 8.31^\circ$), visible sur la Fig.6.

Le front est marqué par une brusque et forte diminution de la salinité en surface, comme montré sur le graphique de la salinité (Fig.8) autour de 15 km depuis de début du transect ($\text{N } 43.6^\circ$ et $\text{E } 8.31^\circ$). Cela correspond à l'observation faite sur la carte des FSLEs (Fig.6). Encore une fois, nous remarquons le front sur le graphique de la salinité par rapport à la profondeur par un fort gradient de salinité mais pas, ou peu, sur celui de la température (Fig.8). Comme sur le transect 3, le même amas de points est visible aux deux latitudes entre 38.4 - 38.8 g.kg^{-1} de salinité. Cette dernière particularité est remarquable sur tous les transects.

Grâce à ces deux transects, nous pouvons identifier une masse très peu salée, entre 37.8 - 38 g.kg^{-1} de salinité (noire sur la Figure 4), une masse d'eau peu salée, comprise entre 37.8 - 38.2 g.Kg^{-1} de salinité (jaune sur la Figure 7), une masse plus salée, entre 38.3 - 38.4 g.kg^{-1} de salinité (bleu sur les Figures 4 et 7) et une masse intermédiaire entre 38.1 - 38.3 g.kg^{-1} de salinité (magenta sur la Figure 6). Nous remarquons également que toutes les colonnes d'eau acquièrent les mêmes caractéristiques à une certaine profondeur (entre 38.4 - 38.8 g.kg^{-1} de salinité et entre 1028.75 - 1029.0 kg.m^{-3} de masse volumique) (Fig.4 et 7).

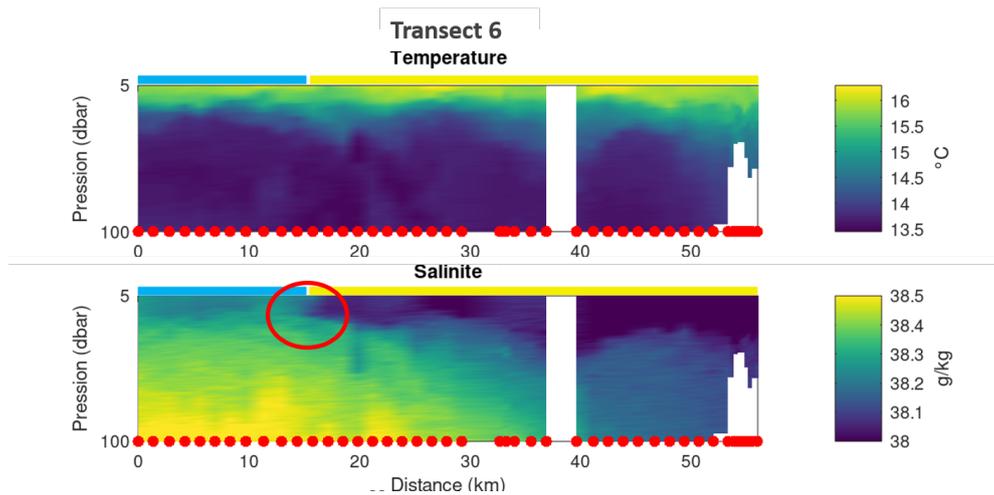


FIGURE 8 – Graphique de la température ($^{\circ}\text{C}$) et de la salinité ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) mesurées par en MVP en fonction de la profondeur et de la distance depuis le début du transect pour chaque profil (point rouge) du transect 6. Les traits bleus et jaunes correspondent à la séparation faite Fig.7.

Tous les transects ont été analysés de la même façon (voir Annexe 1) et les résultats ont été synthétisés dans la Fig.9. Les couleurs de cette figure sont différentes de celles utilisées précédemment. La Fig.9 représente tous les transects, les diagrammes T-S de chaque transect sont répertoriés dans l'Annexe 1. La masse d'eau vert clair (entre $38.28 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ et $38.41 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ de salinité) a été différenciée de la masse noire ($> 38.41 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) dans l'hypothèse que, étant également moins dense, cette masse pourrait adopter une dynamique différente en profondeur ou représenter la partie supérieure de la masse noire.

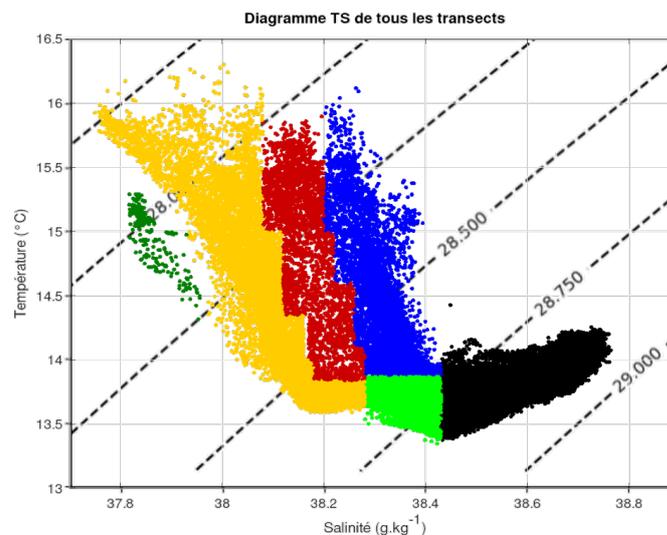


FIGURE 9 – Visualisation sur le diagramme TS global, rassemblant tous les transects, des six masses d'eau différenciées précédemment. La masse volumique est exprimée en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, moins 1000.

3.2 Évolution des masses d'eau en fonction de la profondeur

A partir des données de la Fig.9, nous pouvons visualiser l'évolution des masses d'eau définies précédemment en fonction de la profondeur et établir, lorsque cela est possible, leur lien avec la biologie marine. Pour la suite, les masses d'eau chaudes ($> 15\text{ }^{\circ}\text{C}$) seront mises en valeurs par des étoiles dans le but de visualiser d'éventuels mouvements verticaux. La Fig.10, représentant le transect 1, fait apparaître un front horizontal à 50 km du début du transect (N 43.31° - E 7.61°) entre 0 m et 25 m de profondeur, visible sur la carte des FSLEs, entre la masse bleue et la masse jaune de la Fig.9, ainsi qu'un front vertical à environ 25 m de profondeur et depuis le front précédent jusque 100 km (N 43.62° et E 8.15°). Ce dernier peut être interprété par la subduction de la masse bleue, plus froide, plus salée et plus dense, sous la masse jaune, plus chaude, moins salée et moins dense. De plus, nous remarquons une remontée de la partie froide de la masse bleue en surface au début du transect (N 43.17° - E 7.35°), accompagnée d'une remontée de la fluorescence en surface, ainsi qu'une augmentation de la concentration de prochlorococcus (Fig.17).

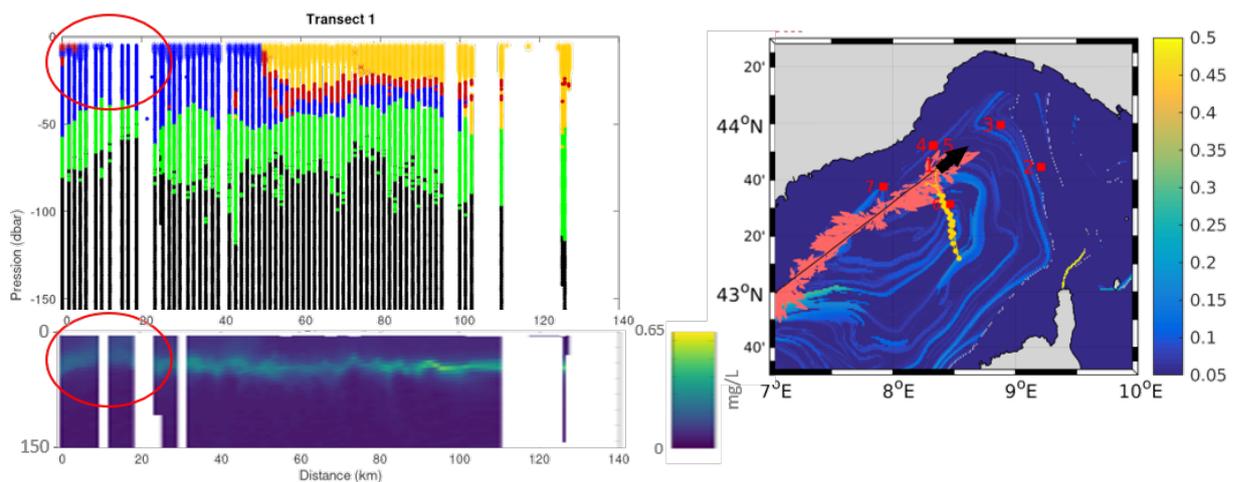


FIGURE 10 – Masses d'eau identifiées du transect 1 (gauche, au-dessus) avec la fluorescence mesurée en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (gauche, en-dessous) en fonction de la profondeur et de la distance parcourue; localisation du transect 1 (à droite, ligne noire) et sa direction (flèche noire) sur la carte satellite des fronts (FSLEs) en surface (filaments bleus clairs) superposés aux courants ADCP à 16 m de profondeur (flèches orange). Les couleurs représentent les masses d'eau identifiées dans la Fig.9 ainsi que les eaux supérieures à $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (étoiles). Les cercles rouges montrent la similarité entre la remontée de fluorescence en surface et l'apparition en surface de la partie de la masse bleue inférieure à $15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Sur le transect 2 (Fig.11) apparaissent deux fronts horizontaux à 20 km (N 43.74° - E 8.67°) et 40 km (N 43.75° - E 8.9°) entre la surface et 50 m de profondeur. Une partie froide de la masse bleue (très salée) apparaît au milieu du transect entre les deux fronts et autour de 30 m de profondeur et forme un front vertical avec la masse rouge chaude. A ce même endroit, nous observons une augmentation de la fluorescence, qui semble suivre

l'incurvation de la masse bleue froide. A la fin du transect, après le deuxième front, nous observons une remontée en surface de la partie froide ($< 15\text{ }^{\circ}\text{C}$) de la masse jaune (peu salée) ainsi qu'une augmentation de la concentration de synechococcus en surface (Fig.17).

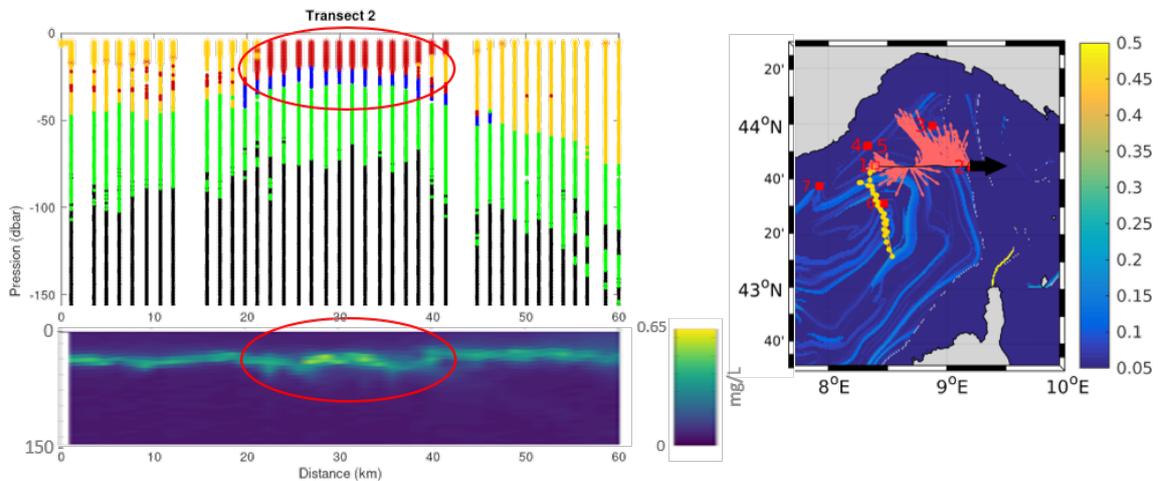


FIGURE 11 – Masses d'eau identifiées du transect 2 (gauche, au-dessus) avec la fluorescence mesurée en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (gauche, en-dessous) en fonction de la profondeur et de la distance parcourue; localisation du transect 2 (à droite, ligne noire) et sa direction (flèche noire) sur la carte satellite des fronts (FSLEs) en surface (filaments bleus clairs) superposés aux courants ADCP à 16 m de profondeur (flèches orange). Les couleurs représentent les masses d'eau identifiées dans la Fig.9 ainsi que les eaux supérieures à $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (étoiles). Les cercles rouges montrent la similarité entre l'augmentation de la fluorescence et l'apparition de la masse bleue inférieure à $15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Nous observons sur la Figure 12 les deux fronts du transect 3 repérés dans la partie 3.1 (Fig.3, 4, 5). A 100 km de distance ($\text{N } 43.10^{\circ}$ - $\text{E } 8.62^{\circ}$), la partie froide de la masse bleue apparait presque en surface. A ce même endroit les concentrations de prochlorococcus, synechococcus et nanoeucaryotes 2 augmentent en surface (Fig.17). Au niveau du deuxième front en fin de transect, marqué par l'apparition de la masse verte (très peu salée) entre 0 m et 50 m ainsi qu'un enfoncement général des autres masses d'eau en profondeur, nous remarquons une forte diminution de la fluorescence et une forte diminution de la concentration de nanoeucaryotes 2.

Les plus fortes concentrations de nanoeucaryotes 2 et microeucaryotes (Fig.16) apparaissent au début du transect 4 (Fig.13), au même niveau qu'une remontée de la masse bleue froide et salée proche de la surface, entre 0 et 15 km ($\text{N } 43.11^{\circ}$ - $\text{E } 8.55^{\circ}$). En fin de transect, à 90 km, nous remarquons l'apparition de la masse jaune s'enfonçant de la surface jusqu'à environ 90 m de profondeur.

Au début du transect 5 (Fig.14) nous remarquons la même tendance qu'à la fin du transect 4 : la présence de la masse jaune s'enfonçant plus profondément encore, jusqu'à environ 130 m de profondeur, associée avec une diminution globale de la fluorescence.

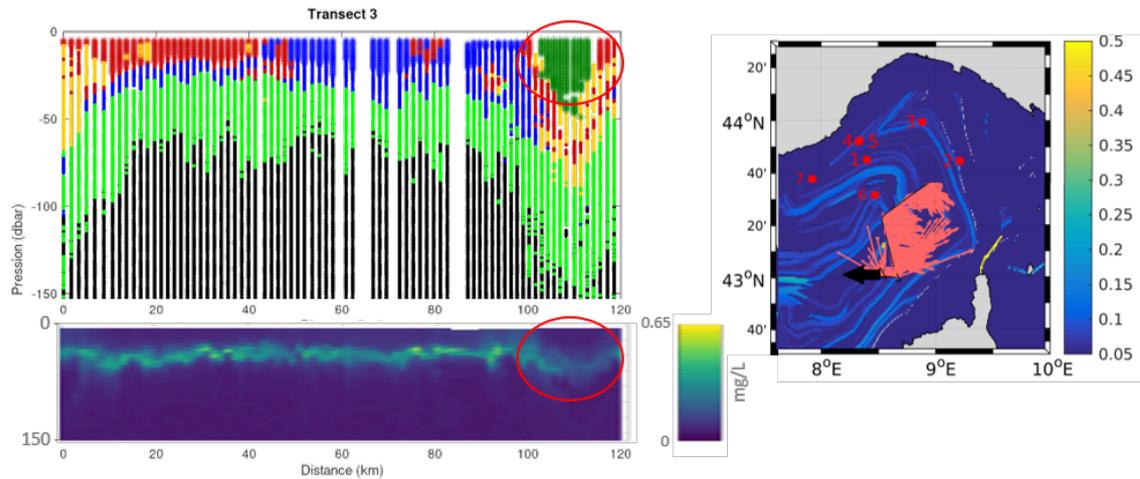


FIGURE 12 – Masses d’eau identifiées du transect 3 (gauche, au-dessus) avec la fluorescence mesurée en mg.L^{-1} (gauche, en-dessous) en fonction de la profondeur et de la distance parcourue; localisation du transect 3 (à droite, ligne noire) et sa direction (flèche noire) sur la carte satellite des fronts (FSLEs) en surface (filaments bleus clairs) superposés aux courants ADCP à 16 m de profondeur (flèches orange). Les couleurs représentent les masses d’eau identifiées dans la Fig.9 ainsi que les eaux supérieures à $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (étoiles). Les cercles rouges montrent la similarité entre l’augmentation de la fluorescence et l’apparition de la masse verte.

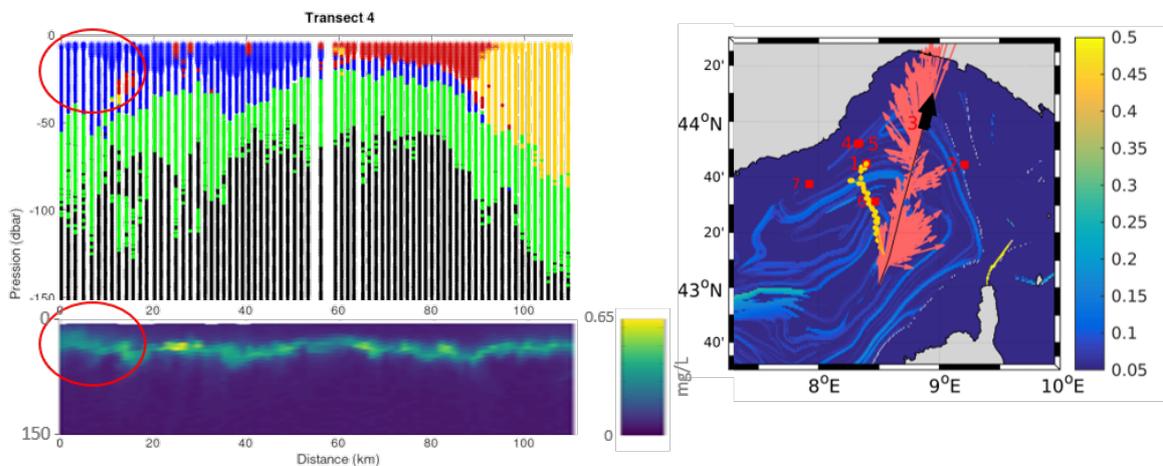


FIGURE 13 – Masses d’eau identifiées du transect 4 (gauche, au-dessus) avec la fluorescence mesurée en mg.L^{-1} (gauche, en-dessous) en fonction de la profondeur et de la distance parcourue; localisation du transect 4 (à droite, ligne noire) et sa direction (flèche noire) sur la carte satellite des fronts (FSLEs) en surface (filaments bleus clairs) superposés aux courants ADCP à 16 m de profondeur (flèches orange). Les couleurs représentent les masses d’eau identifiées dans la Fig.9 ainsi que les eaux supérieures à $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (étoiles). Les cercles rouges montrent la similarité entre la remontée en surface de la masse bleue froide et l’augmentation de la fluorescence en surface.

Nous remarquons également l'apparition de la masse rouge froide entre 10 m et 50 m de profondeur autour de 15 km (N 43.89 ° - E 9.02 °). A la même latitude, nous observons la fluorescence former un cercle et diminuer à l'endroit où apparait la masse rouge. Nous pouvons voir à 38 km du début du transect (N 43.73 ° - E 9.2 °) un front formé par la masse jaune et la masse bleue entre 0 m et 60 m de profondeur, au même endroit où la fluorescence s'étale verticalement en profondeur. Entre 40 et 60 km, le changement de direction des courants (de Sud-Est à Sud-Ouest, Fig.14) semble mettre en jeu la même masse d'eau (rouge), laissant penser à la présence d'un tourbillon. A la fin du transect, autour de 80 km (N 43.38 ° - E 9.04 °), nous pouvons observer l'apparition de la masse jaune froide entre 25 m et 50 m de profondeur au milieu de la masse bleue froide, formant deux fronts de part et d'autre de la masse jaune. A la même latitude et profondeur que ces deux fronts (N 43.45 ° - E 9.09 ° et N 43.36 ° - E 8.89 °) nous observons la plus forte augmentation de fluorescence de toute la campagne. Entre ces deux fronts, en surface, nous observons une forte augmentation de la concentration de *synechococcus* et une plus faible augmentation de microeucaryotes et nanoeucaryotes 1 et 2 (Fig.17).

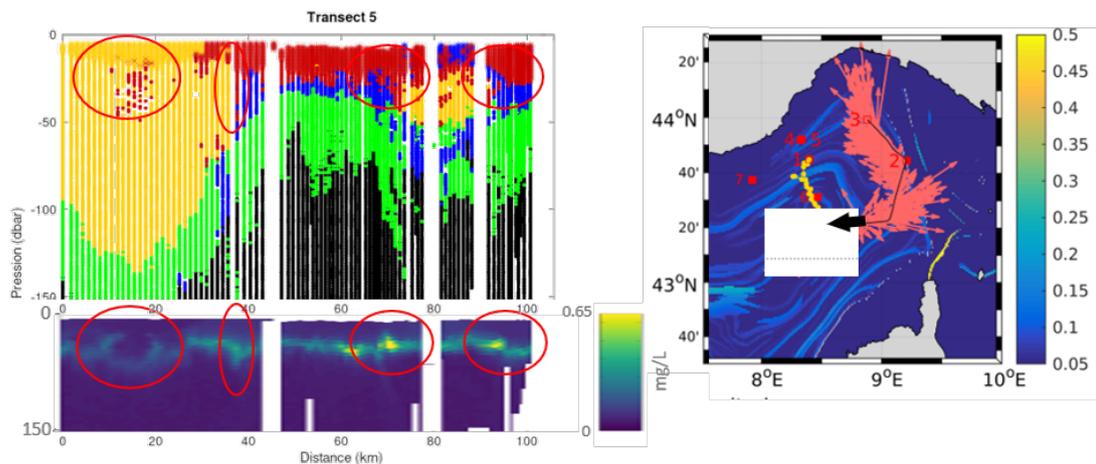


FIGURE 14 – Masses d'eau identifiées du transect 5 (gauche, au-dessus) avec la fluorescence mesurée en mg.L^{-1} (gauche, en-dessous) en fonction de la profondeur et de la distance parcourue ; localisation du transect 5 (à droite, ligne noire) et sa direction (flèche noire) sur la carte satellite des fronts (FSLEs) en surface (filaments bleus clairs) superposés aux courants ADCP à 16 m de profondeur (flèches orange). Les couleurs représentent les masses d'eau identifiées dans la Fig.9 ainsi que les eaux supérieures à 15 °C (étoiles). Les cercles rouges montrent plusieurs similarités entre les masses d'eau et la fluorescence.

Nous constatons sur le transect 6 (Fig.15) le front précédemment remarqué à 15 km du début du transect (N 43.6 ° - E 8.31 °) (Fig.6, 7 et 8). La masse bleue apparaît donc en début de transect, accompagnée par une remontée de la fluorescence vers la surface (Fig.15). Après le front, la masse bleue est présente sous la masse jaune, au même endroit où la fluorescence augmente légèrement. La masse bleue disparaît à 25 km (N 43.64 ° - E 8.22 °) et nous observons la présence de la masse jaune sur l'ensemble de la colonne

d'eau ainsi qu'une forte diminution de la fluorescence sur cette partie.

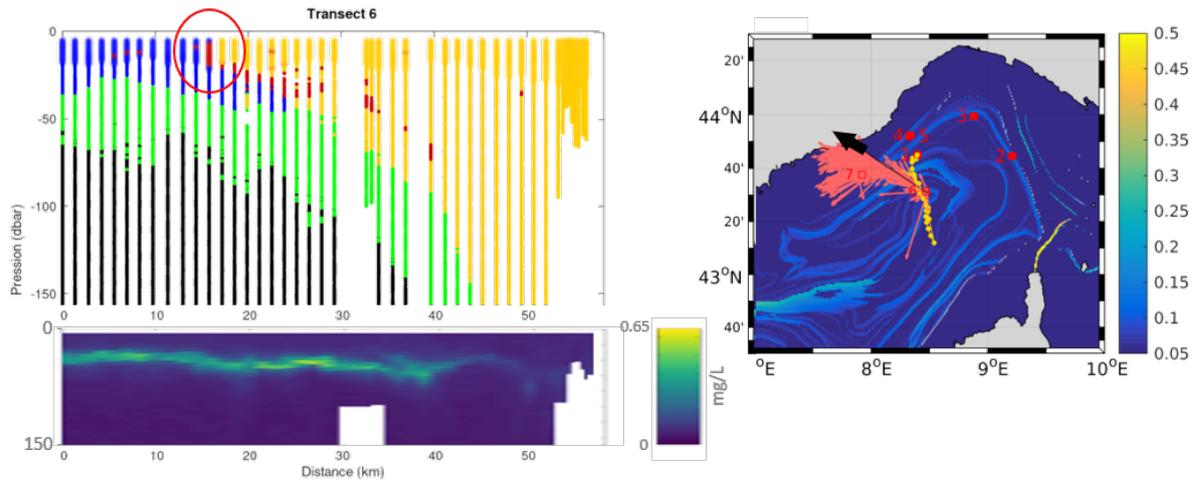


FIGURE 15 – Masses d'eau identifiées du transect 6 (gauche, au-dessus) avec la fluorescence mesurée en mg.L^{-1} (gauche, en-dessous) en fonction de la profondeur et de la distance parcourue; localisation du transect 6 (à droite, ligne noire) et sa direction (flèche noire) sur la carte satellite des fronts (FSLEs) en surface (filaments bleus clairs) superposés aux courants ADCP à 16 m de profondeur (flèches orange). Les couleurs représentent les masses d'eau identifiées dans la Fig.9 ainsi que les eaux supérieures à 15°C (étoiles). Le cercle rouge montre le front entre la masse bleue et la masse jaune ($\text{N } 43.6^\circ - \text{E } 8.31^\circ$).

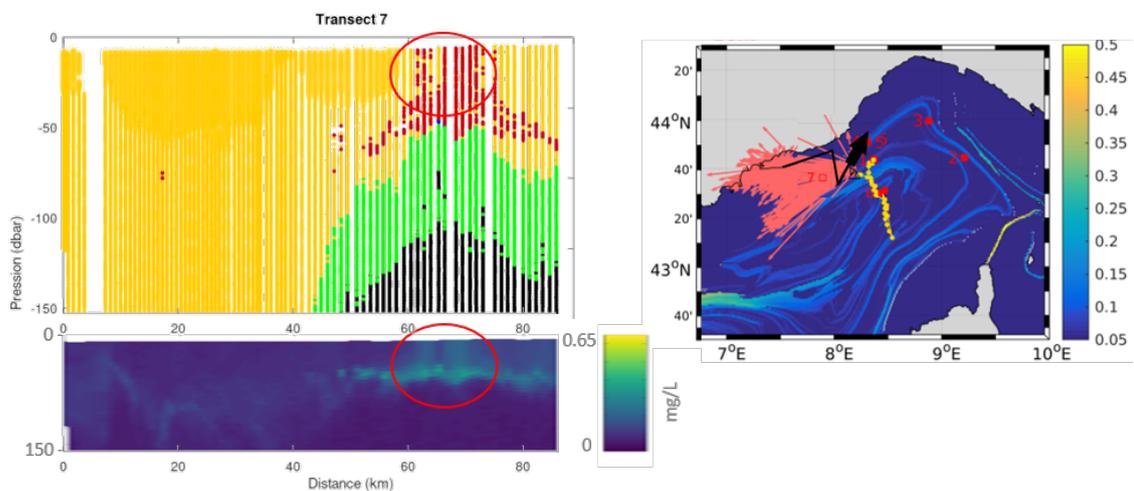


FIGURE 16 – Masses d'eau identifiées du transect 7 (gauche, au-dessus) avec la fluorescence mesurée en mg.L^{-1} (gauche, en-dessous) en fonction de la profondeur et de la distance parcourue; localisation du transect 7 (à droite, ligne noire) et sa direction (flèche noire) sur la carte satellite des fronts (FSLEs) en surface (filaments bleus clairs) superposés aux courants ADCP à 16 m de profondeur (flèches orange). Les couleurs représentent les masses d'eau identifiées dans la Fig.9 ainsi que les eaux supérieures à 15°C (étoiles). Les cercles rouges montrent la similarité entre l'augmentation de la fluorescence en surface et l'apparition de la masse rouge inférieure à 15°C .

Le transect 7 correspond à l'entrée dans le courant Nord (Fig.1). La première moitié du transect est composée majoritairement de la masse jaune jusqu'à plus de 200 m de profondeur, associée à une quasi-disparition de la fluorescence. A 40 km (N 43.78 ° - E 7.98 °), la partie froide de la masse jaune (< 15 °C) remonte jusqu'à atteindre la surface. Sur la seconde moitié du transect, on observe une remontée des masses d'eau et la réapparition de la masse noires et de la masse verte jusque respectivement 100 m et 50 m de profondeur. De plus, entre 60 km et 70 km (N 43.6 ° - E 8.02 ° et N 43.61 ° - E 8.07 °), la masse rouge froide apparait entre la surface et 60 m de profondeur, associée à une nette augmentation de la fluorescence en surface.

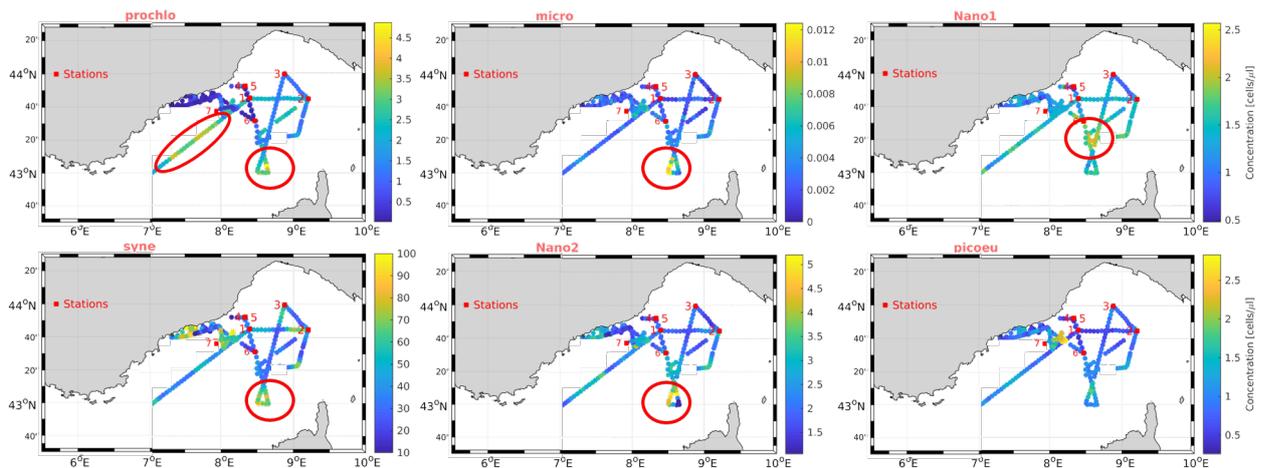


FIGURE 17 – Carte des concentrations (nombre de cellules/ μL) des prochlorococcus, synechococcus, micro-, nano- et picoeucaryotes mesurées en surface par les cytomètres en flux automatisés sur toute la campagne ; maximums de concentrations (cercles rouges).

3.3 Circulation globale

Avec ces résultats, nous pouvons maintenant visualiser l'évolution spatiale des masses d'eau sur toute la campagne en fonction de la longitude et de la latitude (Fig.18), la variabilité temporelle n'étant pas prise en compte. La circulation semble se stabiliser après 125 m de profondeur avec en majorité la masse noire, ainsi que la masse jaune dans les zones du courant Nord (Fig.19). La position des masses d'eau correspond à l'analyse faite par C. Comby (stage M2) (Fig.19). La circulation se complexifie entre la surface et 125 m de profondeur. Les vitesses verticales mesurées négatives aux stations 3, 4 et 5 pourraient correspondre aux observations faites sur les transects 4, 6 et 7 avec l'enfoncement de la masse peu salée (jaune) en profondeur (Fig.13, 14, 16). Le maximum de vitesse verticale négative à la station 5 pourrait correspondre avec le début du transect 7 (Fig.16) où nous voyons l'enfoncement maximal de la masse jaune.

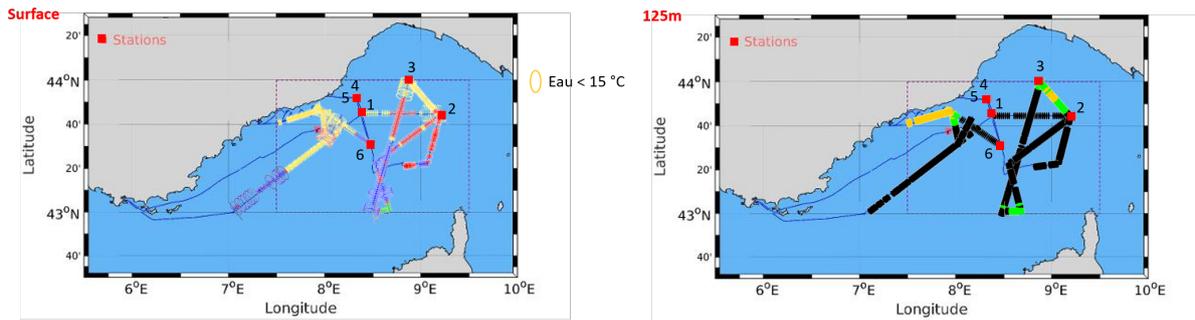


FIGURE 18 – Visualisation de la position des masses d’eau en surface (à gauche) et à 125 m de profondeur (à droite) identifiées pendant la campagne, d’après la Fig.9.

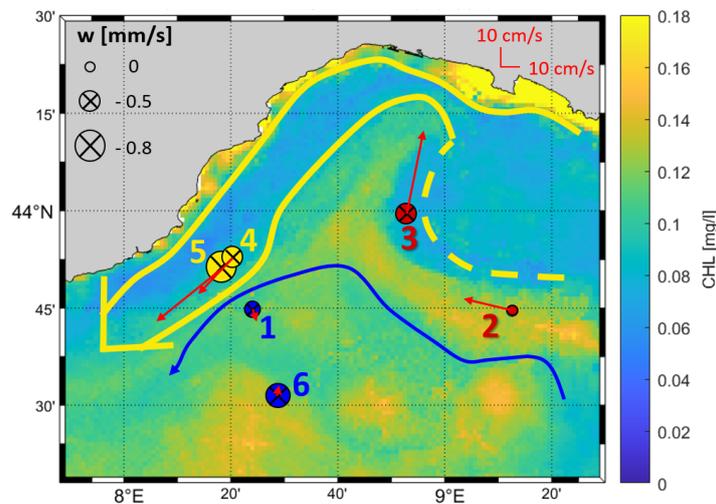


FIGURE 19 – Visualisation schématique des courants dans la mer Ligurie à partir des données satellites et de l’ADCP durant la campagne FUMSECK, avec en fond la carte de la concentration en chlorophylle en surface pour le 4 Mai 2019. Courant Nord (jaune) ; Zone intermédiaire (entre jaune et bleu) ; Recirculation cyclonique (en dessous de la ligne bleue). Les cercles (\otimes) représentent le sens et l’intensité de la vitesse verticale des courants mesurés à chaque station, la longueur des flèches rouges montrent l’intensité des courants horizontaux. Adaptée de C. Comby.

4 Discussion

4.1 Physique

A l’issue de ces résultats, six masses d’eau avec des caractéristiques thermo-halines bien distinctes ont été identifiées. Parmi elles, nous relevons deux masses principales : l’une principalement entre 37.8 g.kg^{-1} et 38.2 g.kg^{-1} de salinité (jaune) et l’autre principalement entre 38.2 g.kg^{-1} et 38.4 g.kg^{-1} de salinité (bleue). D’après la circulation schématique de C. Comby (Fig.19), la masse jaune peut être identifiée comme étant le courant Nord, et la masse bleue comme étant le courant intermédiaire à l’intérieur de

la recirculation cyclonique (Fig.19). Lorsqu'elles se rencontrent, elles forment des fronts visibles notamment en surface sur les transects 1 et 6 (Fig.10 et 15). La masse bleue étant plus dense et plus salée, elle peut avoir tendance à subduire sous la masse jaune tel que sur le transect 1. Nous considérons la masse autour de 38.2 g.kg^{-1} de salinité (rouge) comme une masse de mélange entre les deux principales. Nous la trouvons principalement dans la zone intermédiaire et dans les zones de fronts entre les masses jaunes et bleues, comme sur les transects 1, 3, 4 et 5 (Fig.10,12,13 et 14).

Les masses vertes claires et noires sont les plus denses ($> 1028.7 \text{ kg.m}^{-3}$) et les plus salées ($38.41 - 38.78 \text{ g.kg}^{-1}$). Elles sont présentes sur tous les transects entre en moyenne 50 m et 300 m de profondeur, sauf pour les transects 4, 5 et 7 (Fig.13,14 et 16) où elles s'enfoncent en profondeur sous le courant Nord (jaune). Nous pouvons les considérer comme une masse d'eau intermédiaire (WIW) avant l'eau Levantine (LIW) que nous aurions pu voir si les prélèvements avaient été effectués plus profondément.

La présence sur le transect 5 (Fig.14) de la masse de mélange (rouge) sur une large zone en surface peut être mise en parallèle avec l'intensification du vent à cette date (2 et 3 Mai 2019), favorisant le mélange des couches de surface.

Une masse très peu salée ($37.8 \text{ g.kg}^{-1} - 38 \text{ g.kg}^{-1}$) apparaît entre 0 m et 50 m uniquement sur le transect 3 (Fig.12), accompagnée de la subduction de toutes les masses d'eau au même endroit. Cela peut être dû à la proximité avec le courant de Corse Ouest (WCC), mais les mesures faites durant la campagne FUMSECK ne permettent pas de confirmer cette théorie.

L'apparition de la partie froide de la masse de mélange entre 0 m et 50 m sur la fin du transect 7 (Fig.16) laisse supposer la présence d'un front, indirectement visible sur ce transect, mais présent sur la carte des FSLEs, accompagnée d'une remontée d'eaux froides en surface (Annexe 2).

4.2 Biologie

En ce qui concerne les données biologiques, plusieurs hypothèses sont envisageables. Il semblerait que, de manière générale, la fluorescence diminue en présence de l'eau jaune (transects 5 et 7), sauf lorsque celle-ci remonte en surface (transects 2, 3 et 4). A l'inverse, la masse bleue, plus salée, semble être plus favorable à la croissance planctonique qui a tendance à suivre l'évolution de la masse bleue autant verticalement qu'horizontalement (transects 1, 3 et 4) et même à s'intensifier en sa présence (transect 2), notamment pour les prochlorococcus, synechococcus, microeucaryotes et nanoeucaryotes 2.

D'après la théorie émise par Lévy et al. (2015), nous pouvons nous attendre à une intensification de la dynamique planctonique au niveau des fronts. Et en effet, sur le transect 5 nous avons pu relever une forte augmentation de la fluorescence au niveau des deux fronts situés à 25 m de profondeur. Les données du cytomètre en flux étant prises

à la surface, nous ne pouvons pas identifier les espèces phytoplanctoniques présentes. Si nous considérons la présence de la masse rouge sur le transect 7 comme synonyme d'un front, nous pouvons envisager l'augmentation de la fluorescence à cet endroit comme une conséquence de ce front, en plus de la remontée de nutriments dans la zone euphotique induite par la remontée d'eau froide en surface. Pour confirmer cette dernière théorie il aurait fallu mesurer les paramètres chimiques de l'eau.

5 Conclusion

Ce travail s'inscrit dans les travaux de recherche sur le couplage physique-biologie à fines échelles océaniques. La campagne FUMSECK a permis la collecte de données in-situ et le test d'instruments qui seront utilisés en liaison avec le satellite SWOT lors de futures campagnes océanographiques. Ce stage est en relation avec le travail de C. Romby (stage M2, MIO) qui a traité et analysé les données de vitesses verticales mesurées aux stations rencontrées lors de la campagne FUMSECK. La mesure de vitesses verticales précises et fiables pourront permettre la compréhension des efflorescences planctoniques sur les zones de fronts en profondeur Lévy et al. (2018).

A l'issue de ce stage, nous avons identifié deux masses d'eau principales dans les couches supérieures de la mer Ligure qui forment la plupart des zones de front : une masse d'eau correspondant au courant Nord ($37.8 - 38.2 \text{ g.kg}^{-1}$ de salinité) pouvant s'enfoncer jusque 215 m de profondeur, et une masse correspondant à la recirculation cyclonique ($38.2 - 38.4 \text{ g.kg}^{-1}$ de salinité) jusque environ 50 m de profondeur. Plus profondément, une eau intermédiaire (WIW) a été identifiée à partir de 50 m et sous les deux masses principales, dont la densité est comprise entre 1028.7 kg.m^{-3} et 1028.9 kg.m^{-3} et la salinité entre 38.41 g.kg^{-1} et 38.78 g.kg^{-1} . L'apparition d'une masse d'eau en surface (de N 43.07° - E 8.63° à N 43° - E 8.62°) moins salée ($37.8 - 37.98 \text{ g.kg}^{-1}$) et faisant chuter la fluorescence peut s'expliquer par la proximité avec le courant ouest de la Corse (WCC). Les résultats trouvés semblent confirmer la théorie de Lévy et al. (2015) présageant des efflorescences planctoniques sur les zones de front. Il est cependant impossible de tirer des conclusions sur les communautés planctoniques présentes dans ces zones en l'absence de données du cytomètre en flux en profondeur. Par ailleurs, plusieurs paramètres n'ont pas été pris en compte tels que la variation temporelle et les concentrations en nutriments qui pourraient aider à expliquer la dynamique planctonique. Ce travail pourrait être continué avec une analyse multivariée permettant de comprendre l'impact des différents paramètres physiques sur les communautés planctoniques.

Références

- M. Astraldi, G. Gasparini, G. Manzella, and T. Hopkins. Temporal variability of currents in the eastern ligurian sea. *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 95(C2) :1515–1522, 1990.
- S. Clayton, S. Dutkiewicz, O. Jahn, and M. J. Follows. Dispersal, eddies, and the diversity of marine phytoplankton. *Limnology and Oceanography : Fluids and Environments*, 3 (1) :182–197, 2013.
- A. Doglioli and G. Grégori. Oscahr cruise, rv téthys ii, 2015.
- A. Doglioli, A. Petrenko, F. Nencioli, F. d’Ovidio, L. Rousselet, A. Della Penna, A. Ody, J. André, L. Berline, C. Yohia, et al. Spasso, 2013.
- P. G. Falkowski, D. Ziemann, Z. Kolber, and P. K. Bienfang. Role of eddy pumping in enhancing primary production in the ocean. *Nature*, 352(6330) :55–58, 1991.
- P. G. Falkowski, R. T. Barber, and V. Smetacek. Biogeochemical controls and feedbacks on ocean primary production. *Science*, 281(5374) :200–206, 1998.
- G. Flierl and D. J. McGillicuddy. Mesoscale and submesoscale physical-biological interactions. *The sea*, 12 :113–185, 2002.
- M. Lévy. The modulation of biological production by oceanic mesoscale turbulence. In *Transport and Mixing in Geophysical Flows*, pages 219–261. Springer, 2008.
- M. Lévy, P. Klein, and A.-M. Treguier. Impact of sub-mesoscale physics on production and subduction of phytoplankton in an oligotrophic regime. *Journal of marine research*, 59(4) :535–565, 2001.
- M. Lévy, O. Jahn, S. Dutkiewicz, M. J. Follows, and F. d’Ovidio. The dynamical landscape of marine phytoplankton diversity. *Journal of The Royal Society Interface*, 12(111) : 20150481, 2015.
- M. Lévy, P. J. Franks, and K. S. Smith. The role of submesoscale currents in structuring marine ecosystems. *Nature communications*, 9(1) :1–16, 2018.
- A. Mahadevan. The impact of submesoscale physics on primary productivity of plankton. *Annual review of marine science*, 8 :161–184, 2016.
- D. J. McGillicuddy Jr. Mechanisms of physical-biological-biogeochemical interaction at the oceanic mesoscale. *Annual Review of Marine Science*, 8 :125–159, 2016.
- C. Millot. Circulation in the western mediterranean-sea. *Oceanologica Acta*, 10(2) :143–149, 1987.
- C. Millot. Circulation in the western mediterranean sea. *Journal of Marine Systems*, 20 (1-4) :423–442, 1999.
- A. Pascual, S. Ruiz, A. Olita, C. Troupin, M. Claret, B. Casas, B. Mourre, P.-M. Poulain, A. Tovar-Sanchez, A. Capet, et al. A multiplatform experiment to unravel meso-and submesoscale processes in an intense front (alborex). *Frontiers in Marine Science*, 4 : 39, 2017.

- L. Prieur, F. D'ortenzio, V. Taillandier, and P. Testor. Physical oceanography of the ligurian sea. *The Mediterranean Sea in the Era of Global Change 1*, pages 49–78, 2020.
- R. Ptacnik, A. G. Solimini, T. Andersen, T. Tamminen, P. Brettum, L. Lepistö, E. Willén, and S. Rekolainen. Diversity predicts stability and resource use efficiency in natural phytoplankton communities. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105 (13) :5134–5138, 2008.
- H. Sverdrup. The place of physical oceanography in oceanographic research. *J. mar. Res.*, 14(4) :287–294, 1955.

Annexe 1

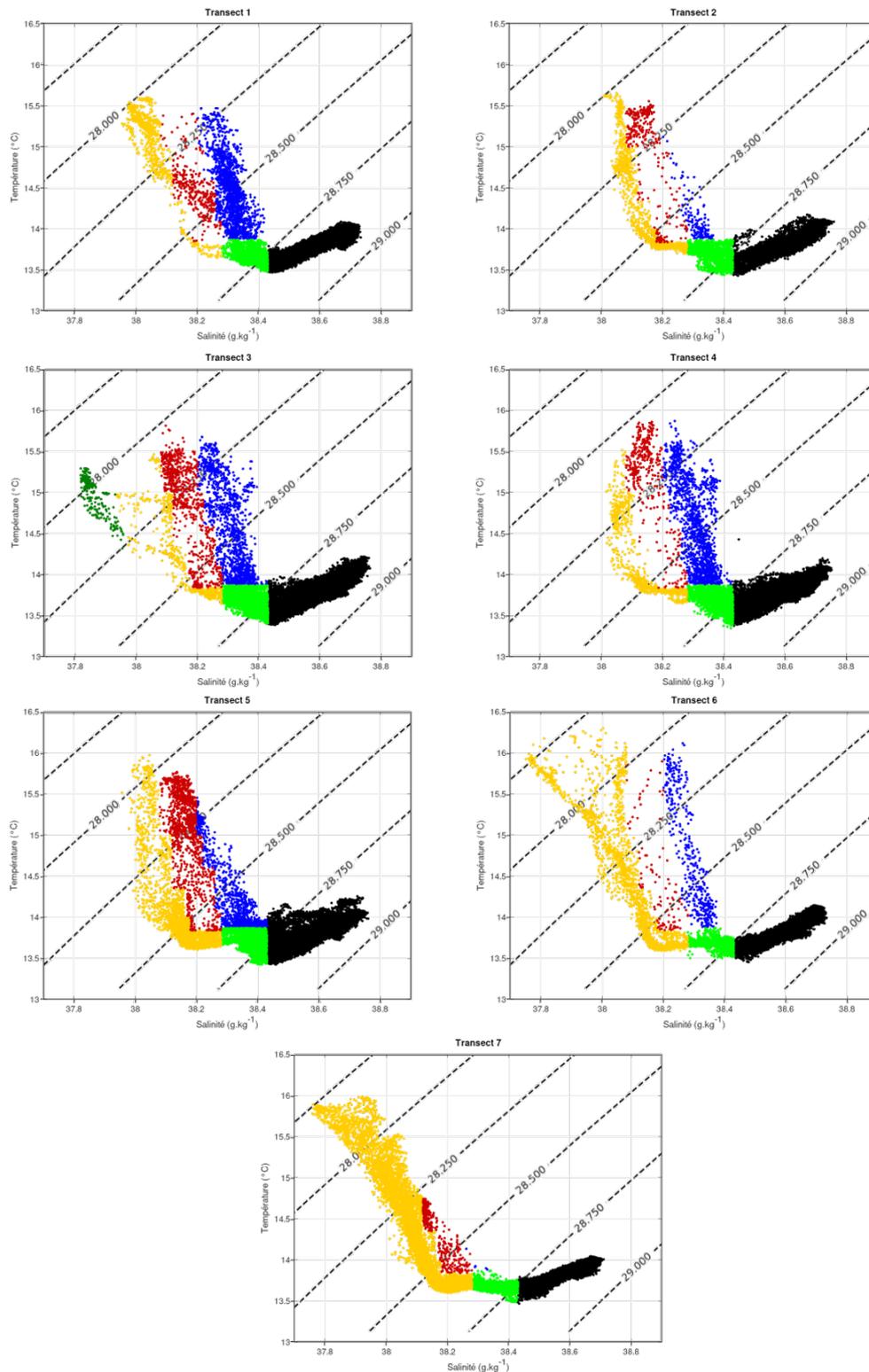


FIGURE 20 – Diagrammes température salinité de chaque transect. Les couleurs correspondent aux caractéristiques des masses d'eau identifiées sur la Figure 9.

Annexe 2

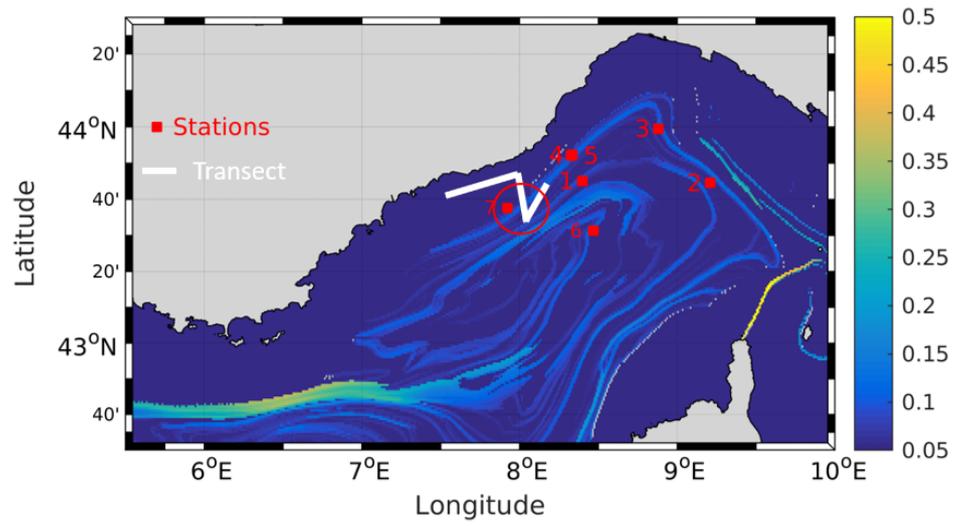


FIGURE 21 – Carte des FSLEs datant du même jour que le transect 7. Un filament traverse la fin du transect (cercle rouge).

Résumé

La campagne FUMSECK, réalisée en 2019 en mer Ligure, a effectué des mesures in-situ dans le cadre des fines échelles océaniques. Pendant ce stage, nous avons caractérisé les masses d'eau rencontrées lors de FUMSECK en les différenciant grâce à leurs caractéristiques de température et salinité mesurées par le MVP (Moving Vessel Profiler). Nous avons comparé leur dynamique en fonction de la profondeur avec les mesures d'activités planctoniques obtenues par un cytomètre en flux automatisé (surface) et un fluorimètre (surface et profondeur). Nous avons principalement différencié les caractéristiques du courant Nord (salinité 37.8-38.2) jusque 250 m de profondeur, de la recirculation cyclonique (salinité 38.2-38.4) et de plusieurs eaux de mélange intermédiaires. Plusieurs augmentations significatives de la fluorescence, donc de l'activité phytoplanctonique, ont été corrélées aux zones de fronts entre le courant Nord et les eaux intermédiaires. Des prélèvements en profondeur analysés au cytomètre en flux permettraient d'améliorer la connaissance du couplage physique-biologie.

Mots clefs : campagne FUMSECK, diagramme Température-Salinité, mer Ligure, masse d'eau, couplage physique-biologie, dynamique phytoplanctonique.

Abstract

The FUMSECK cruise, carried out in 2019 in the Ligurian Sea, performed in-situ measurements in the context of the ocean fine scales. During this internship, we characterized water masses encountered during FUMSECK by differentiating them thanks to their temperature and salinity characteristics measured by the MVP (Moving Vessel Profiler). We compared their dynamics according to depth with measurements of planktonic activities obtained by an automated flow cytometer (surface) and a fluorimeter (surface and depth). We mainly differentiated the characteristics of the Northern current (salinity 37.8-38.2) up to 250 m of depth, of cyclonic recirculation (salinity 38.2-38.4), and of several intermediate mixing waters. Several significant increases of fluorescence, hence of phytoplankton activity, have been correlated to the front areas between the Northern Current and intermediate waters. In-depth sampling with flow cytometer analysis would improve knowledge of physical-biological coupling.

Key words : FUMSECK cruise, Temperature-Salinity diagram, Ligurian Sea, water mass, physical-biological coupling, phytoplankton dynamics.