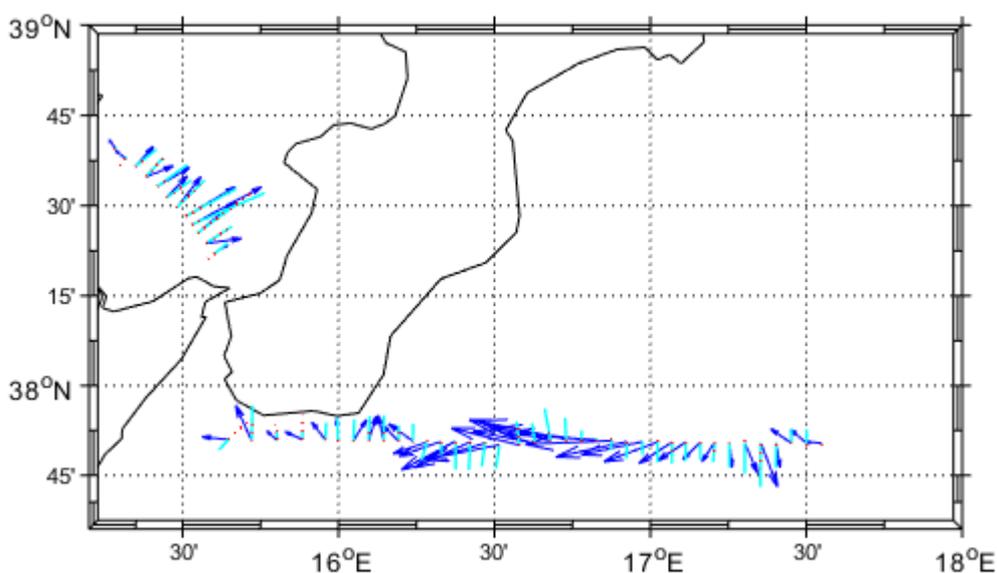


Faculté des sciences d'Aix-Marseille
Institut Méditerranéen d'Océanographie

Mémoire de stage en laboratoire de recherche
L3SVT Parcours MER

Étude du courant côtier entre l'île du Stromboli et la Calabre



Présenté par :

Lucille BARRE

Responsables du stage :

Andrea DOGLIOLI (MIO), andrea.doglioli@univ-amu.fr

Stéphanie BARRILLON (MIO), stephanie.barrillon@mio.osupytheas.fr

Année universitaire 2017-2018

Remerciements

Je tiens avant tout à remercier A. Doglioli et S. Barrillon qui ont accepté de me prendre en stage et qui m'ont proposé un sujet particulièrement intéressant qui m'a permis de progresser. Je remercie également A. Petrenko pour ses conseils et son aide précieuse. Pour finir, merci à P. Barras et C. Comby avec qui j'ai pu échanger et travailler notamment sur la réalisation des scripts MATLAB.

Table des matières

1. Introduction	1
1.1. Objectifs du stage	2
2. Matériel et Méthodes	2
2.1. Les données	2
2.2. Méthodes de calcul	5
2.2.1. Interpolation des données	5
2.2.2. Méthode dynamique	7
2.3. Logiciel et toolbox	10
3. Résultats	12
3.1. Paramètres physiques des transects	12
3.2. Composantes absolues (ADCP)	16
3.3. Composantes perpendiculaires à la vitesse du bateau (ADCP et MVP)	18
4. Discussion	21
4.1. Paramètres physiques des transects	22
4.1.1. Interpolation des données	22
4.1.2. Masses d'eau	23
4.2. Composantes absolues (ADCP)	24
4.3. Composantes perpendiculaires à la vitesse du bateau (ADCP et MVP)	28
5. Conclusion	31
Bibliographie.....	33

1. Introduction

Du latin *mediterraneus* (« qui est au milieu des terres »), la mer Méditerranée est une mer intercontinentale presque entièrement fermée. Elle résulte de la fermeture de la Téthys, un paléo-océan ouvert entre le Cambrien et le Jurassique moyen, par subduction (Dercourt et al., 1986). Aujourd'hui, la mer Méditerranée communique avec l'Atlantique par le détroit de Gibraltar et avec la Mer rouge par le Canal de Suez et est séparée en différents bassins. On recense donc 2 bassins principaux séparés par un seuil sous-marin reliant la Sicile et la Tunisie (seuil de Sicile) : le bassin est et le bassin ouest, eux-mêmes subdivisés en sous-bassins. Parmi les différents sous-bassins on compte par exemple la Mer d'Alboran, le bassin algéro-provençal ou encore la Mer Tyrrhénienne et la Mer Ionienne (Millot et Taupier-Letage, 2005).

La Méditerranée est caractérisée par une circulation générale cyclonique mais cette circulation est assez complexe du fait de la bathymétrie ou des forçages atmosphériques. La circulation des eaux superficielles est caractérisée par la circulation de 2 masses d'eau principales : l'Atlantic water (AW) et la Black Sea water (BSW). L'AW se divise en deux branches : la première franchit le seuil de Sicile quand la deuxième rejoint la mer Tyrrhénienne pour alimenter les zones de formation d'eaux profondes (Le Floch et Romanovsky, 1954). La BSW rejoint la circulation générale en Mer Egée. Cette masse d'eau est facilement reconnaissable grâce à ses caractéristiques. La Mer Noire étant un bassin de dilution (anciennement un lac d'eau douce) la BSW est peu salée (18,3-22,2) (Fieux, 2010). Les eaux intermédiaires désignent une masse d'eau principale, l'eau Levantine (LIW) (Lescaratos et al., 1993). Créée en mer Egée, l'eau Levantine, chaude (14.0-13.2°C) et salée (38.7-38.5) se propage dans la partie nord de la Méditerranée jusqu'au détroit de Gibraltar où elle rejoint l'Atlantique (Millot, 1999). Enfin, deux principales masses d'eaux profondes sont fabriquées en Méditerranée. L'eau profonde de Méditerranée occidentale (WMDW) suit la circulation générale cyclonique mais ne peut franchir le seuil de Sicile (Millot, 1999), l'Adriatic Deep Water (AdDW) suit le même schéma que la WMDW (circulation cyclonique sans franchir le seuil de Sicile) mais dans le bassin oriental (Millot and Taupier-Letage, 2005).

La complexité de la circulation de ses masses d'eau et la présence de processus propres aux océans (création de masses d'eau profondes notamment) ont mené certains scientifiques à comparer la mer Méditerranée à un océan miniature (Bethoux et al., 2000). Elle est donc particulièrement étudiée de nos jours. La campagne PEACETIME (ProcEss studies at the Air-

sEa Interface after dust deposition in the Mediterranean sea), menée en mai 2017 et ayant pour objet d'étude la Méditerranée, a pour but de mettre en évidence et de comprendre les processus mis en jeu durant les épisodes de dépôt de poussières atmosphériques (poussières sahariennes par exemple) à l'interface atmosphère/mer. La campagne PEACETIME permettra également de mettre en évidence l'impact de tels processus sur le fonctionnement de l'écosystème pélagique. Durant la campagne, de nombreuses données ont pu être récoltées suite à l'utilisation de différents outils de mesure. Le Moving Vessel Profiler (MVP) et ses capteurs associés et l'Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) ont permis d'acquérir des données d'hydrologie et d'hydrodynamique. Le traitement de ces données permettra, tout en remplissant les objectifs de la campagne PEACETIME cités précédemment, d'étudier la circulation méditerranéenne et plus précisément le courant côtier situé entre l'île du Stromboli et la Calabre.

1.1. Objectifs du stage

Ce stage a pour objectif d'étudier le courant côtier situé entre l'île du Stromboli et la Calabre en utilisant les données obtenues dans le cadre de la campagne PEACETIME. Grâce à l'utilisation de différents logiciels et méthodes de calcul, la direction et la vitesse du courant relevées par le MVP et l'ADCP pourront être obtenues et comparées afin de confirmer le caractère cyclonique de la circulation dans cette zone.

2. Matériel et Méthodes

La majeure partie du travail (traitement de données de MVP et d'ADCP) fut réalisée sur le logiciel MATLAB à l'aide de différents packages.

2.1. Les données

Les données ont été obtenues au préalable dans le cadre de la campagne PEACETIME à la suite de l'utilisation d'un Moving Vessel Profiler (MVP) et d'un Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP).

Le MVP est un appareil de mesure. Il fut associé pendant la campagne à une sonde CTD (Conductivity, Temperature, Depth), à un fluorimètre et à un Laser Optical Plankton Counter (LOPC). Tracté par le bateau, il permet, lorsqu'il est associé aux appareils de mesure cités précédemment, de mesurer entre-autre la température, la salinité, la pression, la conductivité,

la fluorescence ou la charge en particules. Le corps du MVP est appelé poisson et contient les appareils de mesure associés, il est ensuite rattaché au bateau et tracté à l'aide d'un treuil et d'un câble en kevlar. Trois phases peuvent être décrites lors de l'utilisation du MVP. La première est le déploiement. Souvent automatique, il peut également être contrôlé à bord du bateau. L'appareil entame ensuite sa descente en chute libre aussi appelée free fall, jusqu'à la profondeur donnée par l'utilisateur, il s'agit de la deuxième phase. La troisième phase désigne la remontée de l'appareil en surface. Ces trois phases sont ensuite répétées autant de fois que nécessaire. Malgré l'endommagement du câble au large de la Calabre, le MVP fut utilisé sur la majeure partie du parcours décrit durant la campagne PEACETIME (sauf passage à risque comme le détroit de Messine). Ainsi, plusieurs sections verticales ou transects ont été réalisés. Ces transects représentent environ 1000 profils (800 pendant lesquels le MVP fut associé à une sonde CTD, un fluorimètre et un LOPC et 200 pendant lesquels le MVP ne fut associé qu'à une sonde CTD) réalisés entre la surface et 350m de profondeur. Pendant le stage, 2 transects ont été étudiés : le transect PL06 situé en mer Tyrrhénienne à proximité du détroit de Messine et le transect PL07 situé en mer Ionienne au large de la Calabre. Le premier transect a été réalisé le 22 mai 2017 entre 12 et 16h. Il comporte 25 profils, correspondant à une mesure toutes les 10 minutes. Le deuxième transect a été réalisé à la suite du premier après passage du détroit de Messine, soit entre le 22 mai 2017, 22h et le 23 mai 2017, 9h. Il comporte 85 profils, correspondant à une mesure toutes les 8 minutes. Le transect PL06 est montré par la figure 1 :

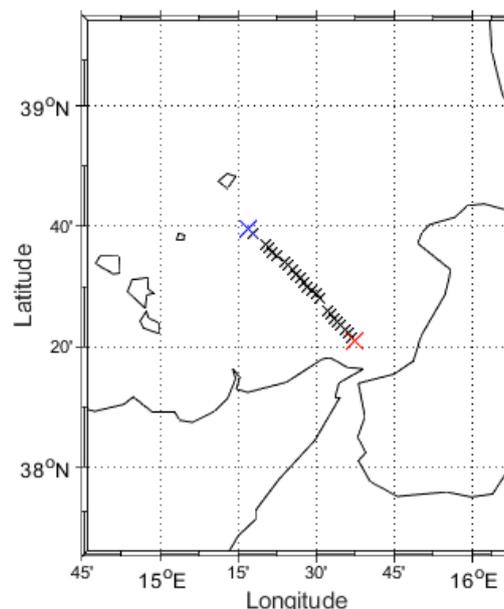


Figure 1 : Transect PL06, chaque croix représente un point de mesure. La croix bleue représente la première station du transect, la croix rouge représente la dernière station du transect.

Et le transect PL07 par la figure 2 :

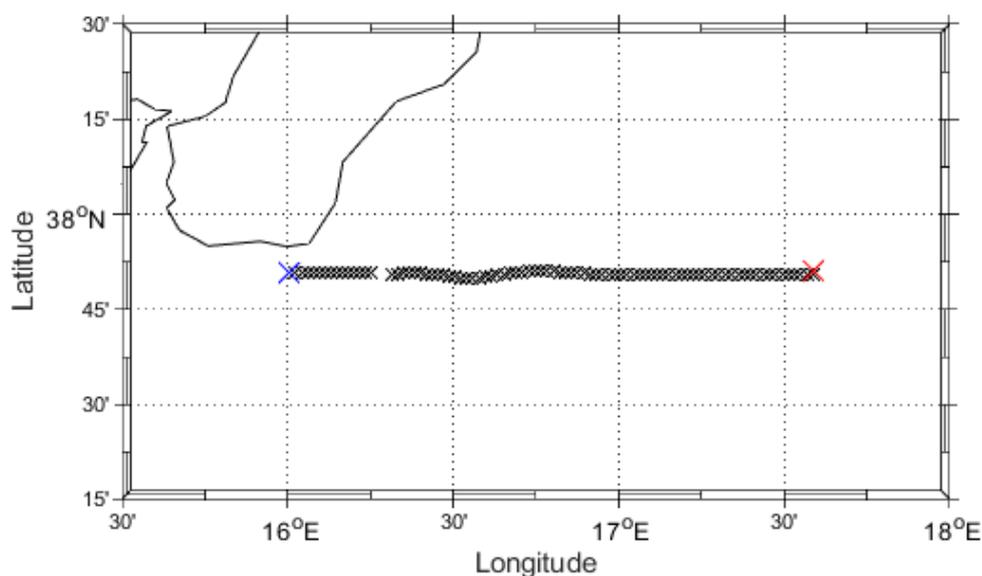


Figure 2 : Transect PL07, chaque croix représente un point de mesure. La croix bleue représente la première station du transect, la croix rouge représente la dernière station du transect.

Pendant la campagne, des mesures de courantologie ont également été effectuées à l'aide d'un ADCP. Il existe plusieurs types d'ADCP : les ADCP classiques placés sous la coque du bateau ou dans un flotteur, ou les L-ADCP (*lowered ADCP*) utilisés en station et associés à l'ensemble rosette-bathysonde (Fieux, 2010). Malgré les utilisations différentes, le principe des différents types d'ADCP reste très similaire. Pendant la campagne, un ADCP classique placé sous la coque du bateau a été utilisé. Le corps de l'ADCP appelé tête acoustique est composé de 4 dalles contenant des émetteurs et récepteurs de fréquence 150kHz (ce qui correspond à une portée de 300m environ). Cette fréquence peut changer selon la portée de l'appareil mais plus la portée augmente plus la résolution diminue. Ainsi, un signal est émis par l'un des émetteurs à intervalle de temps régulier. Le signal émis est ensuite réfléchi par les particules emportées par le courant étudié. Lorsque le signal est réfléchi, sa fréquence, fonction de la vitesse du courant, est affectée par l'effet Doppler. L'ADCP permettra donc d'obtenir un profil de courant de la couche à échantillonner en donnant les composantes absolues des vitesses du courant.

L'ADCP a été déployé pendant toute la campagne. Le transect étudié dans le cadre de ce stage contient 5046 mesures sur 48 profondeurs avec une profondeur maximale de 394m. Une mesure a été effectuée toutes les 2 minutes (figure 3).

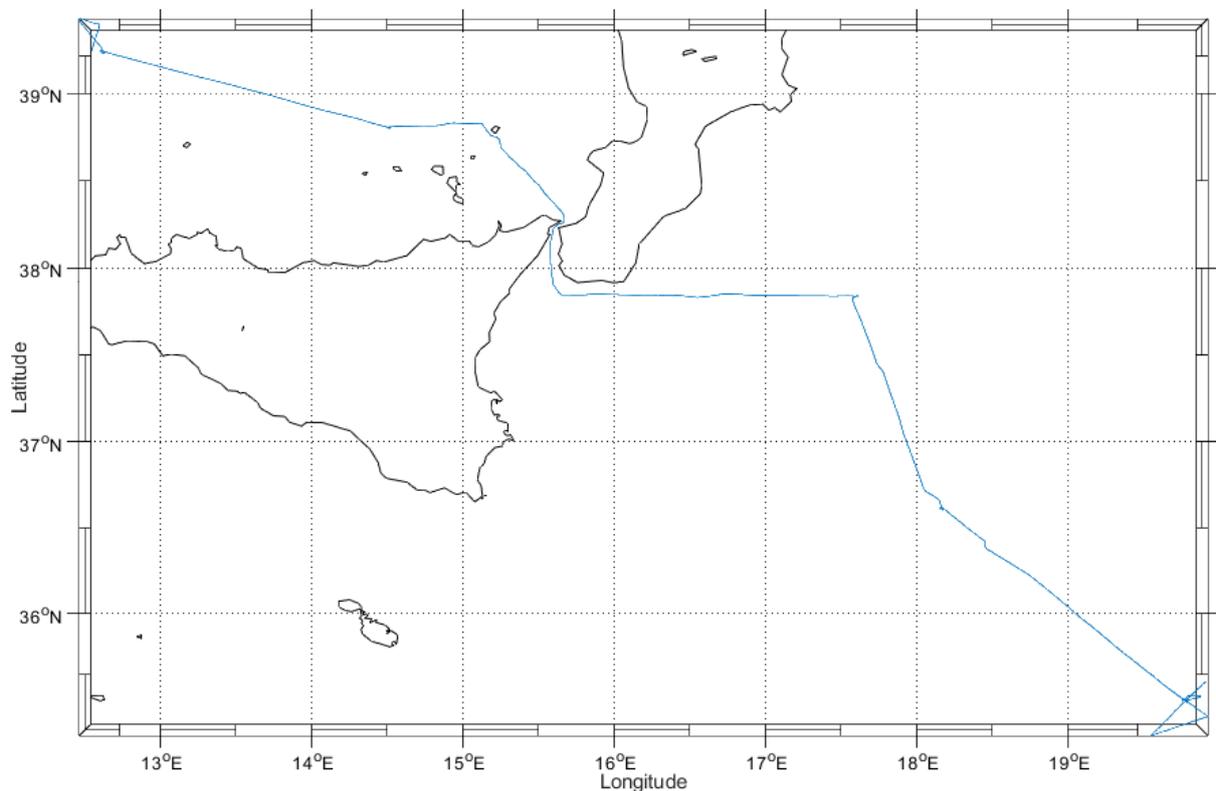


Figure 3 : Transect d’ADCP étudié. Le transect comporte 5046 points de mesure représentés par le tracé bleu.

Les mesures d’ADCP et de MVP ont donc permis d’obtenir différents jeux de données. Ces jeux de données ont été étudiés tout au long du stage. Leur traitement a demandé l’utilisation de différentes méthodes de calcul.

2.2. Méthodes de calcul

L’objectif principal du stage était d’étudier le courant côtier entre l’île du Stromboli et la Calabre. Pour ce faire les données obtenues lors de la campagne PEACETIME ont été traitées grâce à différentes méthodes de calcul.

2.2.1. Interpolation des données

En effet, pour étudier le courant concerné, il était indispensable d’obtenir sa vitesse par le calcul à partir des mesures effectuées par le MVP pour la comparer ensuite aux mesures d’ADCP. Dans un premier temps, les données de MVP ont été utilisées mais celles-ci étaient incomplètes. En effet, les données de salinité, température et masse volumique comportaient des valeurs NaN qui ne pouvaient être utilisées telles quelles. Les valeurs NaN sont présentes

lorsqu'une mesure est invalide, elles ne doivent pas être retirées lorsqu'elles sont entourées de mesures valides pour éviter la perte de données et ne peuvent être interprétées par un 0. Il a donc fallu interpoler ces valeurs. Dans un premier temps, les mesures se trouvant à plus de 267m de profondeur ont été supprimées car elles ne comportaient que des valeurs NaN. En effet, la limite de bon fonctionnement du MVP se trouve, ici, à 267m de profondeur. Dans un second temps, les valeurs NaN se trouvant dans l'intervalle de mesure ainsi obtenu ont été interpolées. Pour que la comparaison soit valable, les mesures d'ADCP se trouvant après 267m de profondeur ont également été supprimées.

L'interpolation concerne les points qui se trouvent dans l'intervalle de mesure. Ainsi interpoler permet d'obtenir de nouveaux points en se basant sur les points existants et sur l'hypothèse d'une variation continue des paramètres observés. L'interpolation des données a été réalisée à l'aide d'une fonction présente sur le logiciel utilisé. Ainsi, la méthode d'interpolation linéaire utilisée par la fonction peut être expliquée de la façon suivante : on définit une fonction f , quelconque dont on connaît la valeur en deux points :

$$f(x_a) = y_a$$

$$f(x_b) = y_b$$

On cherche à approcher la fonction f par une fonction affine \bar{f} en passant par les points (x_a, y_a) et (x_b, y_b) évoqués précédemment. On aura donc :

$$\bar{f}(x_a) = y_a$$

$$\bar{f}(x_b) = y_b$$

La valeur du point obtenu par interpolation est définie de la façon suivante :

$$\bar{f}(x_c) = y_c$$

La fonction \bar{f} s'écrira donc :

$$\bar{f}(x) = y_a + (x - x_a) \frac{(y_b - y_a)}{(x_b - x_a)}$$

La situation est représentée par la figure 4. L'interpolation permet de remplacer les valeurs NaN par des données mais cette méthode a des inconvénients. En effet, les données interpolées peuvent, selon la méthode choisie et le nombre de valeurs à interpoler, s'éloigner des valeurs

réelles. Pour des valeurs de salinité, température et masse volumique, l'interpolation linéaire reste fiable comme le montreront les résultats, d'où son utilisation.

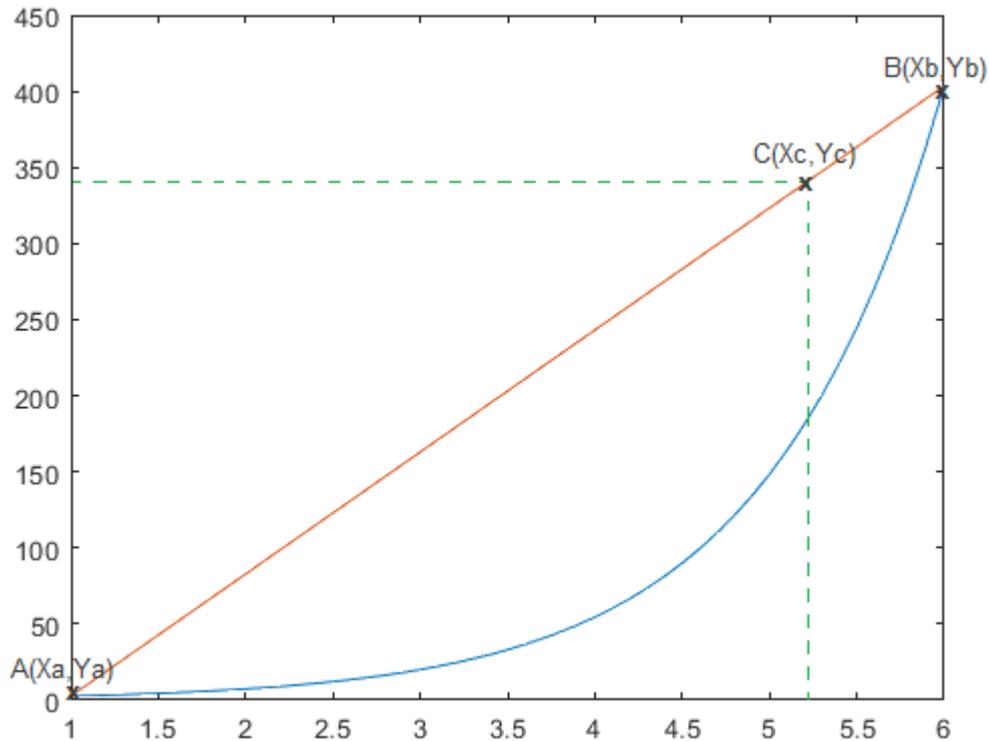


Figure 4 : Interpolation linéaire de la fonction f sur l'intervalle $[1,6]$. La fonction f est représentée en bleu. La fonction affine \bar{f} est représentée en rouge. Le point $C = (x_c, y_c)$ est le résultat de l'interpolation.

2.2.2. Méthode dynamique

Après avoir interpolé les données de salinité et température, le calcul des vitesses du courant a pu être effectué à l'aide de la méthode dynamique. Cette méthode permet d'obtenir le profil de vitesse du courant à partir des mesures de température, salinité et pression (et donc masse volumique) à au moins deux stations. Prenons un transect quelconque, sur ce transect on dénombre deux stations : la station A et la station B. Il nous faut, dans un premier temps partir des équations de l'équilibre géostrophique qui pourront s'écrire de la façon suivante en trois dimensions :

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = fv \quad (1)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = -fu \quad (2)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = -g \quad (3)$$

Où ρ est la masse volumique en kg/m^3 , $\frac{\partial p}{\partial z}$ est le gradient de pression sur chacune des composantes, g est l'accélération de la pesanteur en m/s^2 et f , le paramètre de Coriolis en approximation de mouvement quasi-horizontaux (soit $f = 2\omega \sin\Phi$). Les équations de l'équilibre géostrophique sont complétées en trois dimensions par l'équilibre hydrostatique sur la composante z (équation 3). En s'appuyant sur la loi de l'hydrostatique (la pression P en un point d'un fluide correspond à la pression due au poids de la colonne d'eau sur ce même point), l'expression du gradient de pression sur la composante x devient :

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \simeq -g \frac{\Delta z}{\Delta x} \quad (4)$$

Où Δz représente la différence entre la profondeur d'une isobare p sous la station A et la profondeur de cette même isobare sous la station B. Δx représente la distance séparant les stations A et B. En injectant le résultat de l'équation (4) dans l'équation (1) et en isolant v , la vitesse pourra s'écrire de la façon suivante :

$$v \simeq -\frac{g \Delta z}{f \Delta x} \quad (5)$$

Et sur y :

$$u \simeq \frac{g \Delta z}{f \Delta x} \quad (6)$$

Mesurer directement la pente des isobares en mesurant les pressions à chacune des stations n'est pas envisageable. En effet, cette méthode manquerait de précision, pour rappel, la vitesse moyenne d'un courant en Méditerranée ne dépasse pas 0.5m/s , une telle vitesse représente une pente d'environ 0.5mm par km . Il faudra donc calculer la profondeur à laquelle se trouve l'isobare sous les stations A et B. Pour obtenir la profondeur de l'isobare p , il suffit de multiplier l'équation (3) par ρ et d'inverser le résultat :

$$\frac{\partial z}{\partial p} = -\frac{1}{\rho g} \quad (7)$$

En intégrant l'équation (7) et en introduisant le volume massique $\left(\alpha = \frac{1}{\rho}\right)$, la profondeur de l'isobare z_p s'écrit :

$$z_p = \frac{1}{g} \int_p^0 \alpha dp \quad (8)$$

Et en discrétisant :

$$z_p \simeq \frac{1}{g} \sum_p^0 \bar{\alpha} \Delta p \quad (9)$$

Où $\bar{\alpha}$ est le volume massique moyen sur chacun des intervalles Δp . En introduisant le géopotentiel :

$$\Phi_p \equiv gz_p \simeq \sum_p^0 \bar{\alpha} \Delta p \quad (10)$$

Et son anomalie pour plus de précision :

$$D_p = \sum_p^0 \bar{\delta} \Delta p \quad (11)$$

L'expression de la vitesse devient :

$$v_p = -\frac{1}{f} \frac{D_p^A - D_p^B}{\Delta x} \quad (12)$$

En calculant la vitesse avec l'équation (12), les résultats ne sont pas satisfaisants. L'équation (12) est basée sur une situation précise : les isobares sont toutes inclinées, seule la surface n'est pas inclinée et reste à la verticale. Dans ce cas, le profil des vitesses obtenu est erroné, les vitesses sont minimales à la surface et augmentent jusqu'à devenir maximales au fond. Or, au fond les frottements sont omniprésents. En touchant le fond, la vitesse devrait donc tendre vers 0. Pour corriger le profil des vitesses, il est nécessaire d'effectuer un nivellement par rapport à une isobare profonde (No Motion Depth) pour laquelle l'hypothèse de vitesse nulle sera posée. Dans le cas des transect PL06 et PL07 utilisés pendant ce stage, cette isobare se trouve à 267m de profondeur. En considérant une isobare profonde non inclinée, et une pente maximale en surface, l'expression de la vitesse devient pour les transects PL06 et PL07 :

$$v_p = v_{267} - v_p \quad (13)$$

Et le profil des vitesses présente bien des vitesses qui tendent vers 0 en profondeur. Il s'agit d'un des inconvénients de la méthode dynamique. Cette méthode reste relative et demande de

poser l'hypothèse d'une vitesse nulle à partir d'une certaine profondeur choisie par l'utilisateur. De plus, la méthode dynamique ne donne que la composante géostrophique de la vitesse. Cette composante est perpendiculaire à la vitesse du bateau. En effet, la méthode dynamique est appliquée entre deux stations. Ces deux stations correspondent à deux profils de CTD contenant les données de salinité, température et pression nécessaires aux calculs. Entre les deux stations, un gradient de pression est induit par la pente de la surface libre. Comme spécifié précédemment par les équations, ce gradient de pression est équilibré par la force de Coriolis qui s'exprime à droite de la vitesse dans l'hémisphère nord. La vitesse obtenue est donc perpendiculaire au gradient de pression (et donc à la vitesse du bateau) (Figure 5).

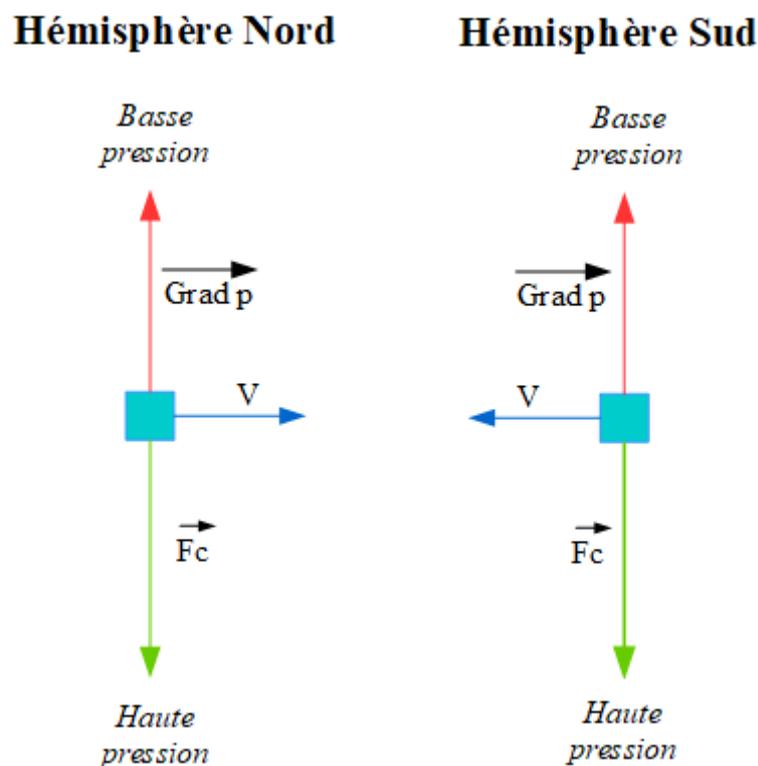


Figure 5 : Représentation de l'équilibre géostrophique avec $\overrightarrow{\text{Grad}p}$ le gradient de pression, $\overrightarrow{F_c}$ force de Coriolis et V , la vitesse du courant (vue du dessus).

Ces calculs ont été réalisés à l'aide du logiciel MATLAB qui comportait les fonctions et packages nécessaires à leur réalisation.

2.3. Logiciel et toolbox

Le logiciel MATLAB (Matrix Laboratory) est un logiciel de programmation. Comme son nom l'indique, il permet de manipuler facilement les matrices et vecteurs en utilisant le

calcul matriciel. Tout au long de ce stage, le traitement des données a été effectué à l'aide de la version r2017b sur un ordinateur personnel. Le logiciel de programmation MATLAB a été utilisé en partie parce qu'il comportait des fonctions indispensables à l'application de certaines méthodes de calcul comme la méthode dynamique citée précédemment. En effet, l'utilisation de ces fonctions, permettait de traiter un grand nombre de données et de gagner un temps considérable sur les calculs effectués.

La première fonction utilisée a été programmée et fournie par M. Doglioli. Les données de MVP des transects étudiés étant des fichiers.mat, ils pouvaient facilement être lu par le logiciel MATLAB mais il fallait en extraire les informations recherchées. Les fichiers.mat des transects comportaient notamment la vitesse verticale, la vitesse du son... en plus des données de salinité, température, pression... qui étaient nécessaires. Ces données étaient présentées sous forme de liste et domaines. La fonction fournie (et épinglée en annexe I) a permis d'isoler les données de : salinité, température, pression, masse volumique, fluorescence, distance entre les stations, longitude et latitude à chacun des points de mesure des transects.

Après avoir extrait les données, il fallait les représenter. Pour ce faire, le package `m_map` a été utilisé en plus des fonctions graphiques classiques proposées par MATLAB. La toolbox `m_map` regroupe un ensemble d'outils graphiques permettant de représenter des données à l'échelle mondiale. La toolbox `m_map` contient notamment une base de données répertoriant les tracés des littoraux, des scripts permettant de projeter les données sur différents types de projections (UMT, Miller ou encore Lambert), et les fonctions graphiques de base adaptées aux projections (`m_plot` ou `m_quiver` par exemple).

Les dernières toolbox utilisées permettent d'effectuer les calculs d'extrapolation et de vitesse. L'interpolation des données de salinité, et température a été réalisée à l'aide de la toolbox `Inpaint_nans` contenant la fonction du même nom. La fonction `inpaint_nans.m` permet d'interpoler de façon linéaire les valeurs NaN d'un échantillon de données. Cette fonction effectue les mêmes calculs que la fonction `interp1.m` (calculs précisés dans la sous-partie méthode de calcul) qui permet d'interpoler des données ou de les extrapoler si le paramètre 'extrap' est spécifié. La fonction `interp1.m` demande cependant la mise en place d'une boucle pour effectuer les calculs d'interpolation à chacune des stations d'où le choix de la fonction `inpaint_nans`, plus rapide qui ne demande que la variable à interpoler comme argument et effectue les calculs sur la totalité des stations en une fois (équation 14).

Les calculs effectués pour obtenir la composante géostrophique de la vitesse du courant en chacun des points de mesure ont pu être simplifiés grâce à l'utilisation d'une dernière toolbox, la toolbox `gsw_matlab` (Gibbs-Sea Water Oceanographic Toolbox). Cette toolbox contient les sous-routines permettant d'évaluer les propriétés thermodynamiques de l'eau pure et de l'eau de mer. Cette toolbox permet donc, en s'appuyant sur l'équation d'état de l'eau de mer, d'obtenir par exemple la masse volumique à partir de la salinité, de la température et de la pression ou encore la profondeur à partir de la pression et de la latitude (équation 15).

Équation 14 :

```
%interpolation des données de salinité à l'aide des fonctions interp1 et
%inpaint_nans.
x=(5:1:350); %Query points
%interp1 3 stations interpolation linéaire:
salinterp=interp1(pres06(1,3:263),sal06(1,3:263),x,'linear');
salinterp1=interp1(pres06(2,3:263),sal06(2,3:263),x,'linear');
salinterp2=interp1(pres06(3,3:263),sal06(3,3:263),x,'linear');
%inpaint_nans toutes les stations interpolation linéaire:
sal_nan06=inpaint_nans(sal06);
```

Équation 15 :

```
%Calcul de la masse volumique et de la profondeur à l'aide du package
%gsw_matlab
rho06=gsw_rho(sal06int,temp06int,pres06);%Calcul de rho en kg/m**3
rho07=gsw_rho(sal07int,temp07int,pres07);%Calcul de rho en kg/m**3
zp06=gsw_z_from_p(pres06,lat06'); %Calcul de la profondeur en m
zp07=gsw_z_from_p(pres07,lat07'); %Calcul de la profondeur en m
```

3. Résultats

Pour plus de clarté, les résultats obtenus ont été détaillés en trois parties permettant de séparer les représentations des caractéristiques des transect (représentation de la température, salinité et masse volumique) des représentations des composantes absolues et perpendiculaires à la vitesse du bateau.

3.1. Paramètres physiques des transects

L'extraction des données de MVP à l'aide de la fonction fournie et spécifiée dans la sous partie logiciel et toolbox a permis de représenter les données de salinité, température et masse volumique des différents transects (figure 6).

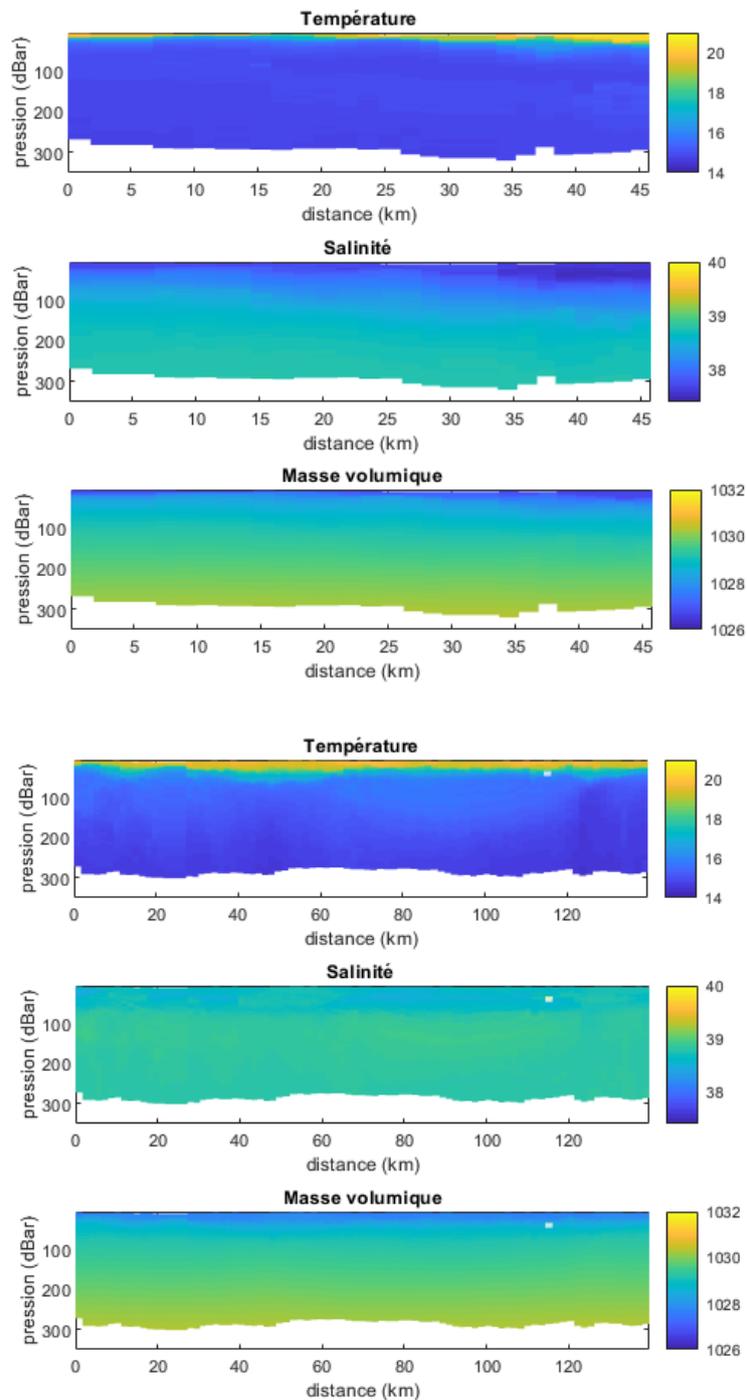


Figure 6 : Représentation des données de température, salinité et masse volumique en fonction de la pression et de la distance entre les stations pour les transects PL06 à gauche et PL07 à droite.

Pour chacun des transects, les températures restent comprises entre 14 et 21°C avec des températures plus froides en profondeur, de même pour la masse volumique comprise entre 1026 et 1031 et plus importante en profondeur. Les données de salinité diffèrent d'un transect à l'autre contrairement à la température et à la masse volumique. Pour le transect PL06, la

salinité varie entre 37,5 et 38,5. Les salinités les plus fortes se retrouvent en profondeur. Pour le transect PL07, la salinité varie peu et est comprise entre 38,5 et 39.

Les données n'étant pas complètes (valeurs NaN qui ne sont pas prises en compte par MATLAB lors des représentations graphiques, comme le montre la figure précédente : chaque valeur NaN est représentée par un blanc), elles furent interpolées de façon linéaire à l'aide des fonctions citées précédemment. Les résultats suivants ont pu être observés, d'abord dans le cas de l'interpolation des données de salinité (figure 7) :

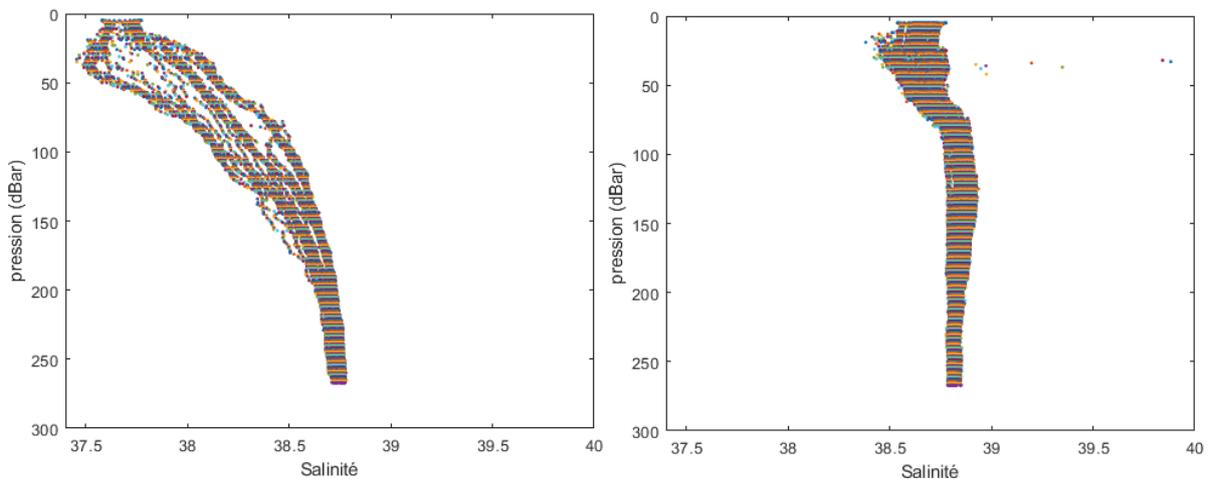


Figure 7 : Evolution de la salinité interpolée en fonction de la pression pour les transects PL06 à gauche et PL07 à droite. Les stations sont représentées sous la forme d'un nuage de points.

Puis pour la température avec la méthode similaire (figure 8) :

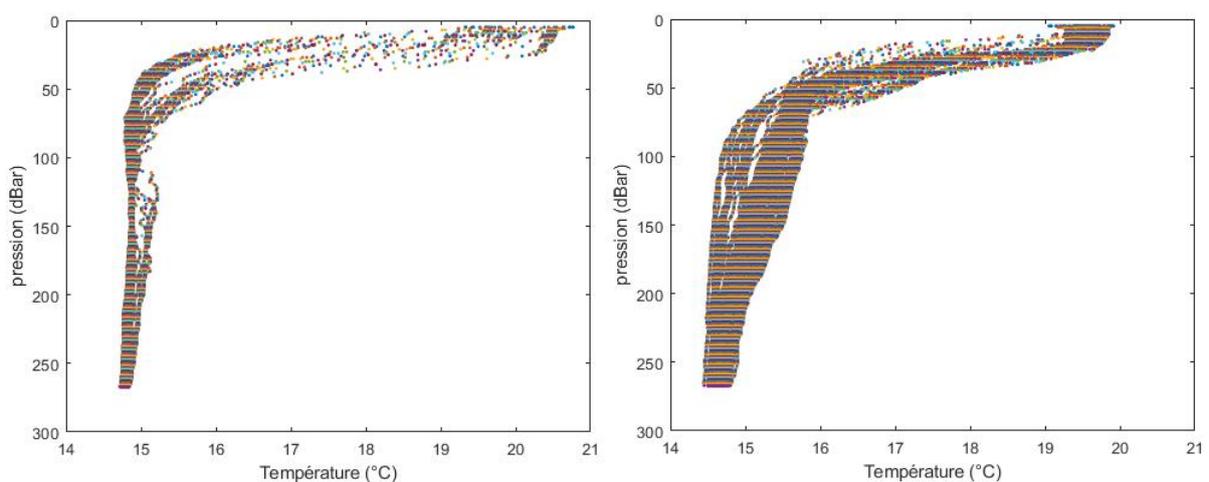


Figure 8 : Evolution de la température interpolée en fonction de la pression pour les transects PL06 à gauche et PL07 à droite. Les stations sont représentées sous la forme d'un nuage de points.

Et la masse volumique (figure 9) :

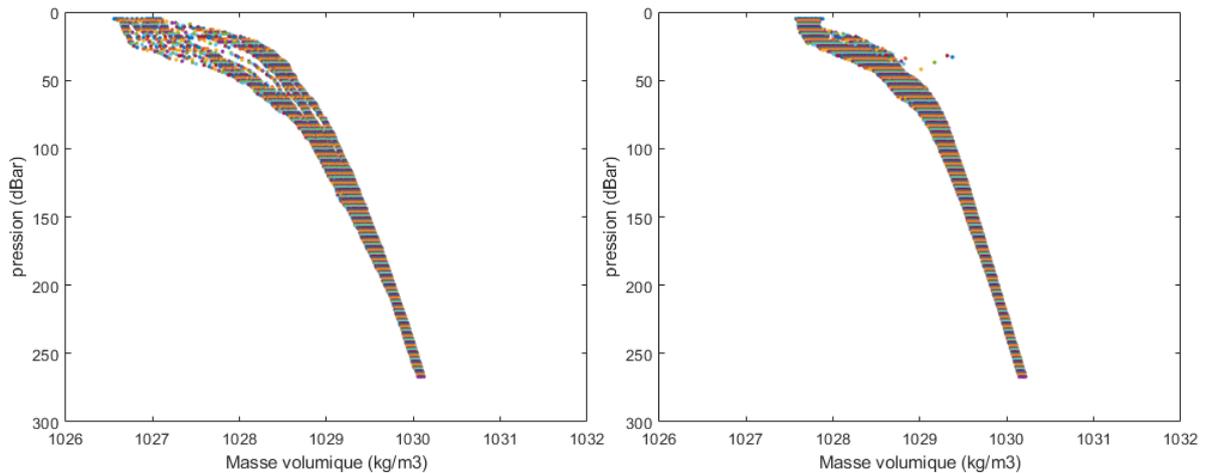


Figure 9 : Evolution de la masse volumique interpolée en fonction de la pression pour les transects PL06 à gauche et PL07 à droite. Les stations sont représentées sous la forme d'un nuage de points.

Les figures 7,8 et 9 confirment la tendance observée dans la figure 6. Les données de salinité varient peu pour le transect PL07 (entre 38.5 et 39) et restent importantes en profondeur. La salinité du transect PL06 varie de façon plus importante que celle du transect PL07, mais celle-ci suit la même logique, elle reste importante en profondeur. Les mesures de température montrent dans les deux cas une variation importante entre 0 et 50m de profondeur (présence d'une thermocline saisonnière). A partir de 50m de profondeur, la température reste assez homogène dans le cas du transect PL06. Elle est cependant modifiée dans le cas du transect PL07. En effet à partir de 50m de profondeur, la température continue de diminuer mais cette diminution est moins brutale que la variation observée au-dessus de 50m de profondeur. Ainsi entre 50 et 300m de profondeur, une diminution d'environ 1°C est observée. Les graphiques de masse volumique sont assez similaires pour les deux transects. Ils montrent une augmentation de la masse volumique en profondeur. Cette augmentation est à mettre en relation avec la diminution de la température et l'augmentation de salinité en profondeur observée sur les graphiques précédents, la masse volumique étant fonction de la température et de la salinité. En effet, plus la salinité augmente et plus la température diminue, plus la masse volumique augmente.

Les graphiques de salinité, température et masse volumique en fonction de la pression permettent d'obtenir une tendance générale de la salinité, de la température et de la masse volumique pour les deux transects mais ils ne permettent pas de déterminer avec précision les

masses d'eau présentes. Un diagramme θ -S a donc été réalisé (figure 10). Pour ce faire, les moyennes des salinités et des températures entre les stations ont été effectuées pour chacun des transects.

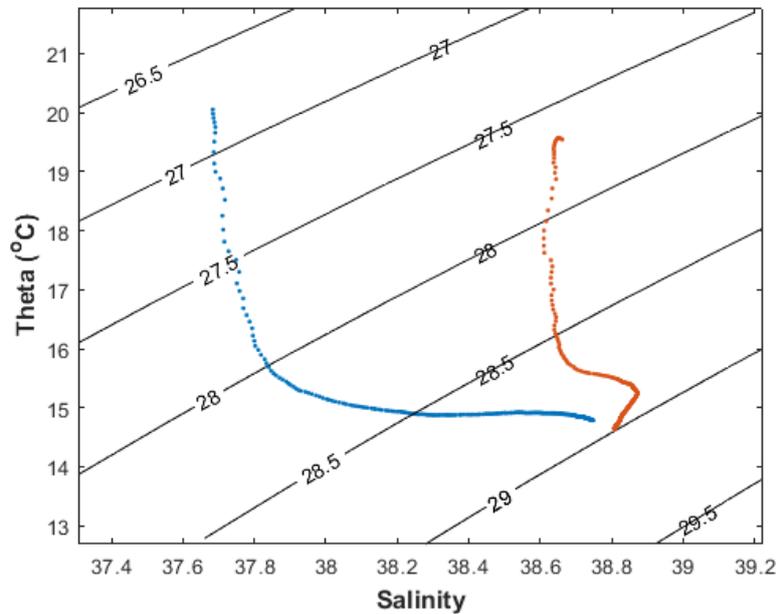
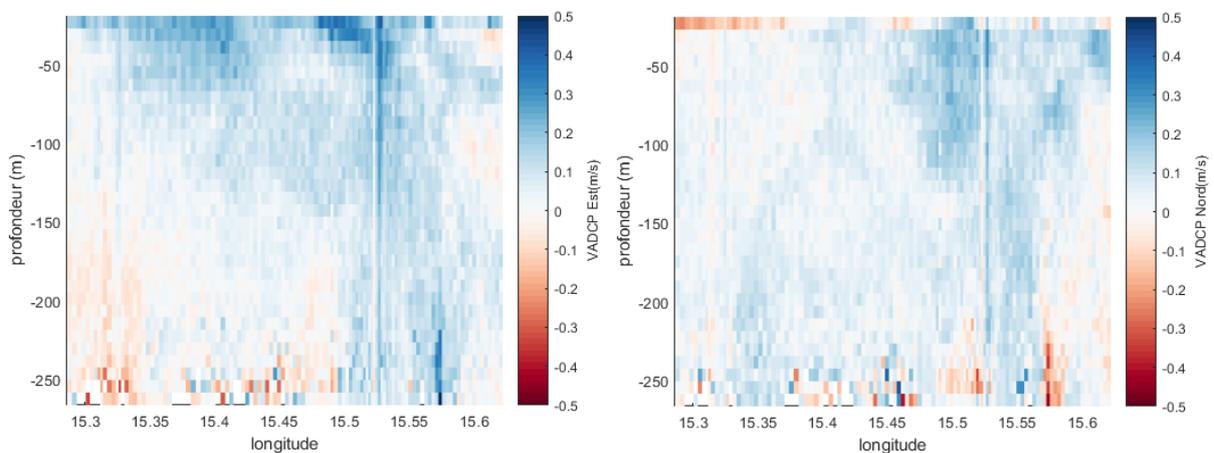


Figure 10 : Diagramme θ -S. Le transect PL06 est représenté en bleu et le transect PL07 en rouge.

Le diagramme θ -S permet de mettre en évidence différentes masses d'eau pour chacun des transects. Dans les deux cas, une masse d'eau fortement dessalée est observée en surface tandis qu'une masse d'eau très salée est observée en profondeur.

3.2. Composantes absolues (ADCP)

Les composantes absolues nord et est de la vitesse donnée par l'ADCP ont été représentées sous forme de profil de vitesse (figure 11).



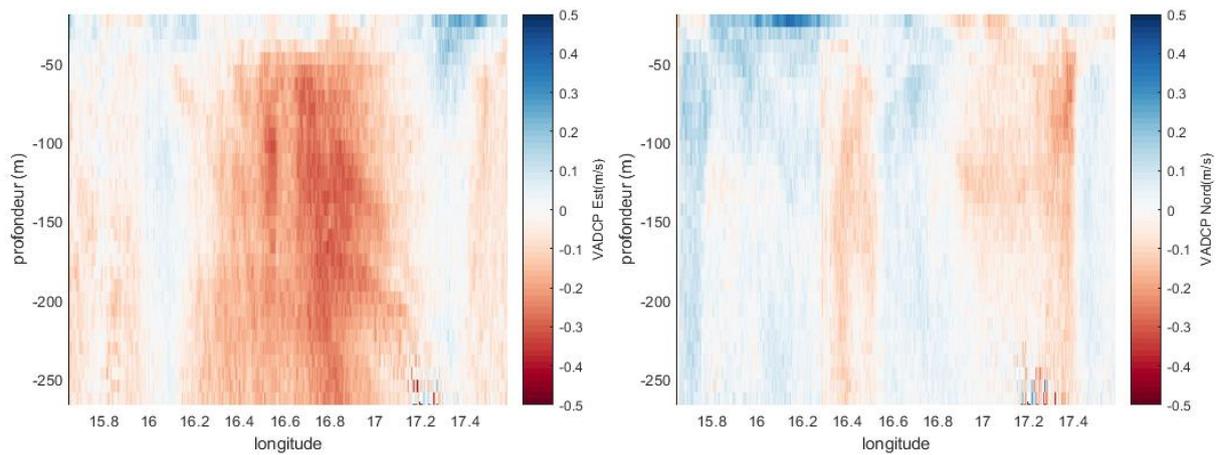


Figure 11 : Représentation des composantes est (à gauche) et nord (à droite) de la vitesse absolue donnée par l'ADCP pour le transect PL06 (en haut) et le transect PL07 (en bas). Les valeurs négatives indiquent une direction sud (profil nord/sud) et ouest (profil est/ouest). Les valeurs positives indiquent une direction nord (profil nord/sud) et est (profil est/ouest).

Les composantes absolues des vitesses de l'ADCP ont également été représentées pour chacun des transects à l'aide de la fonction `m_quiver` évoquée précédemment. Sur les 48 profondeurs échantillonnées, seules les 32 premières ont été étudiées (32^{ème} profondeur = profondeur max du MVP). Une moyenne verticale a été effectuée sur les données et une tendance générale a pu être représentée. Dans les figures à suivre, pour plus de clarté les vitesses d'ADCP correspondant aux latitudes et longitudes des transects de MVP étudiés ont été isolées et seule une valeur sur 10 est représentée. Le transect PL06 est représenté par la figure 12 :

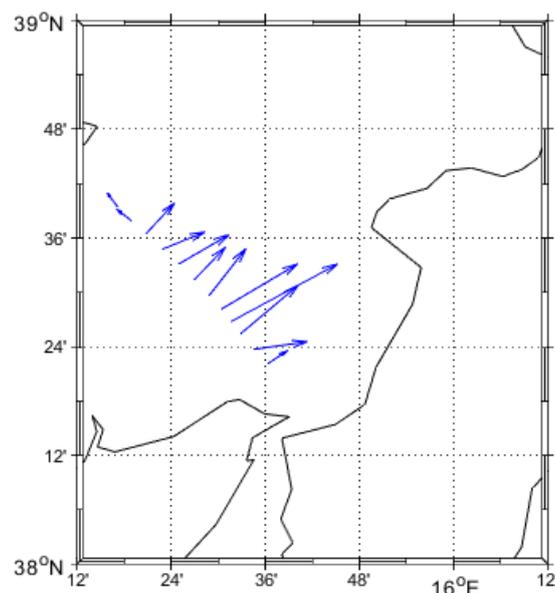


Figure 12 : Représentation des vitesses absolues moyennes mesurées par l'ADCP en fonction de la longitude et de la latitude pour le transect PL06.

Et le transect PL07 par la figure 13.

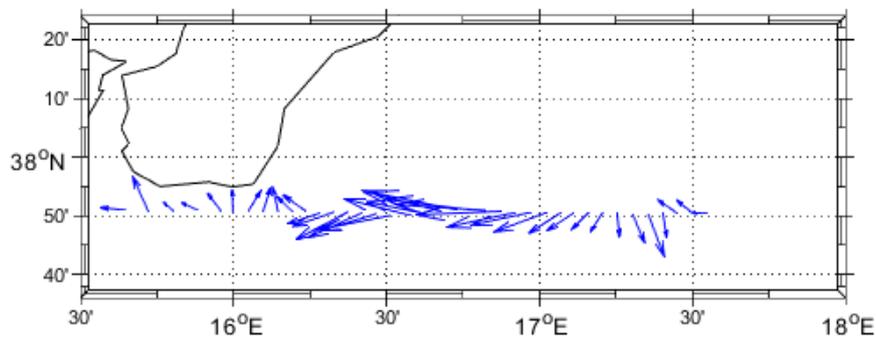
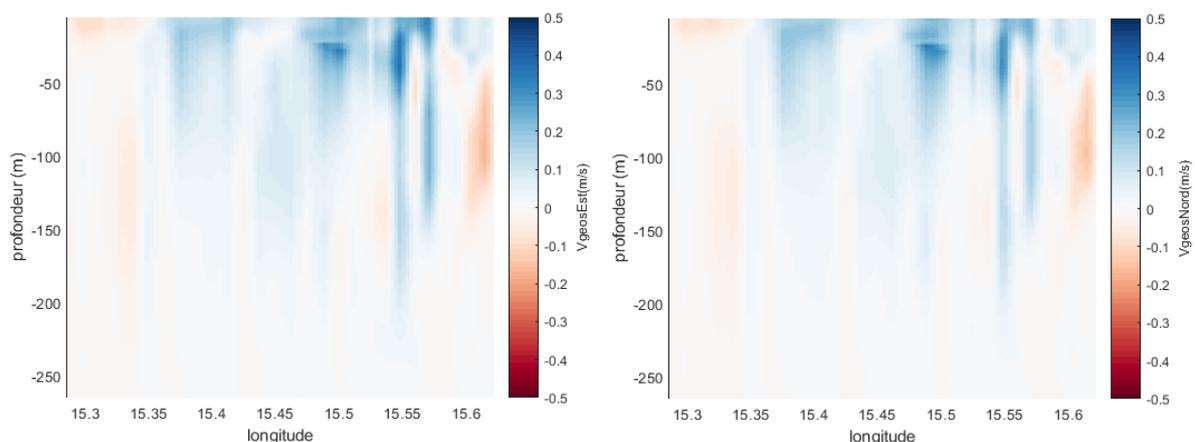


Figure 13 : Représentation des vitesses absolues moyennes mesurées par l'ADCP en fonction de la longitude et de la latitude pour le transect PL07.

Les figures 12 et 13 confirment la tendance montrée par la figure 11. Le courant observé sur le transect PL06 est globalement orienté nord-est voir vers l'est pour certaines composantes. En revanche, le courant mis en évidence par le transect PL07 subit de nombreuses variations. Il pourra être divisé en cinq branches, la première au large orientée vers le nord-ouest, la deuxième vers le sud, la troisième vers l'ouest, la quatrième vers le sud-ouest et la dernière baignant la côte vers le nord-est.

3.3. Composantes perpendiculaires à la vitesse du bateau (ADCP et MVP)

La méthode dynamique a été appliquée sur les données interpolées de salinité et température, les vitesses obtenues ont été corrigées (les vitesses se trouvant en dehors de l'intervalle $[-0.5, 0.5]$ ont été retirées : la majeure partie des courants en Méditerranée ne dépasse pas ces valeurs) et représentées (figure 14). Les vitesses obtenues suite à l'application de la méthode dynamique correspondent aux composantes perpendiculaires de la vitesse du courant.



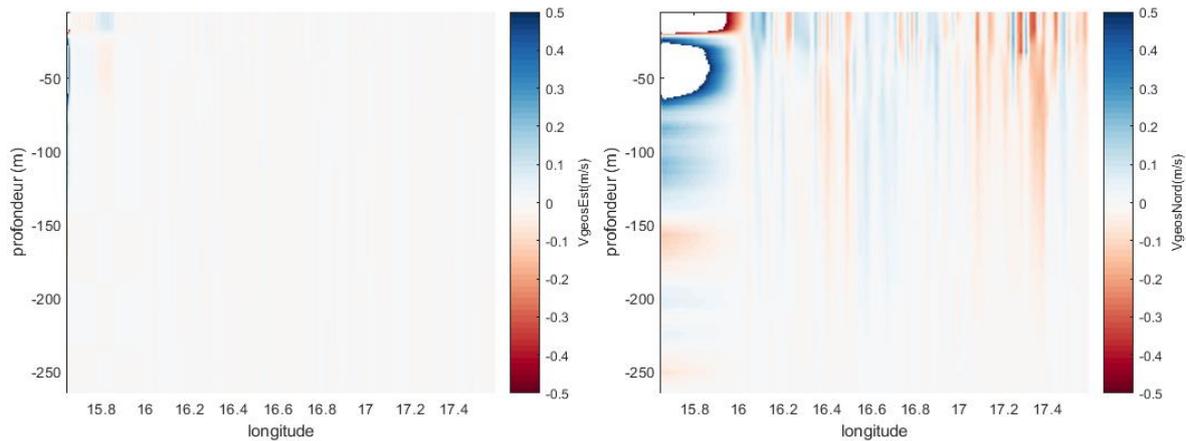


Figure 14 : Représentation des composantes perpendiculaires à la vitesse du bateau est (à gauche) et nord (à droite) de la vitesse calculée à partir des données du MVP pour le transect PL06 (en haut) et le transect PL07 (en bas). Les valeurs négatives indiquent une direction sud (profil nord/sud) et ouest (profil est/ouest). Les valeurs positives indiquent une direction nord (profil nord/sud) et est (profil est/ouest).

Les vitesses géostrophiques (vitesses calculées à partir des données du MVP à l'aide de la méthode dynamique), dans le cas du transect PL06, diminue de façon significative à partir de 150m de profondeur jusqu'à atteindre 0 à partir de 200m de profondeur. De la même façon, les vitesses géostrophiques obtenues dans le cas du transect PL07 atteignent 0 à partir de 200m de profondeur. On rappelle que cette condition a été fixée précédemment lors de l'application de la méthode dynamique. En effet, une profondeur de vitesse nulle a été fixée à 267m de profondeur d'où l'atténuation des vitesses à l'approche de cette profondeur.

De nombreuses variations (passage d'une valeur négative à une valeur positive) peuvent être observées dans le cas des deux transects mais plus particulièrement dans le cas du transect PL07. La composante est est minoritaire voire nulle pour le transect PL07. Celui-ci étant horizontal, la composante perpendiculaire à la vitesse du bateau correspond à la composante nord de la vitesse.

Par soucis de comparaison, les composantes perpendiculaires à la vitesse du bateau des vitesses obtenues grâce aux mesures d'ADCP effectuées durant la campagne (calculées à l'aide des formules de trigonométrie, détail en Annexe II) ont également été corrigées (toutes les vitesses se trouvant en dehors de l'intervalle $[-0.5, 0.5]$ ont été retirées : la majeure partie des courants en Méditerranée ne dépasse pas ces valeurs), recoupées de manière à ne prendre en compte que les valeurs des transects étudiés et représentées (figure 15) :

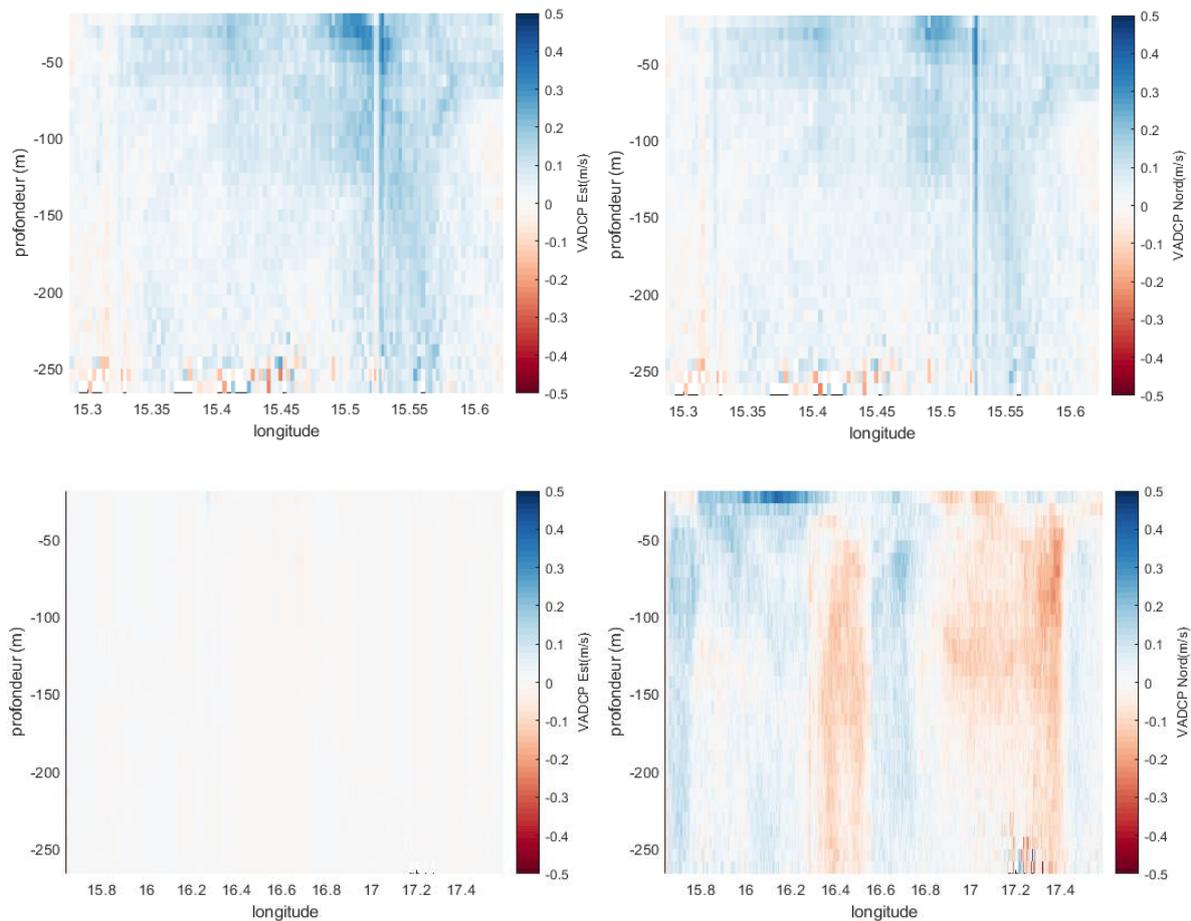


Figure 15 : Représentation des composantes perpendiculaires à la vitesse du bateau est (à gauche) et nord (à droite) de la vitesse donnée par l’ADCP pour le transect PL06 (en haut) et le transect PL07 (en bas). Les valeurs négatives indiquent une direction sud (profil nord/sud) et ouest (profil est/ouest). Les valeurs positives indiquent une direction nord (profil nord/sud) et est (profil est/ouest).

Pour chacun des transects les vitesses obtenues semblent être conservées en profondeur. Des variations de vitesses (passage de valeurs positives à négatives ou négatives à positives selon le transect) peuvent être observées. Dans le cas du transect PL07, comme pour les profils donnés par le MVP, la composante est est inexistante. Celui-ci étant horizontal, la composante perpendiculaire à la vitesse du bateau correspond à la composante nord.

Enfin, les composantes perpendiculaires à la vitesse du bateau des vitesses moyennées du courant obtenues suite à l’utilisation de la méthode dynamique sur les données du MVP ont été comparées aux composantes perpendiculaires à la vitesse du bateau des vitesses moyennées du courant mesurées par l’ADCP puis représentées pour le transect PL06 et PL07 (figure 16).

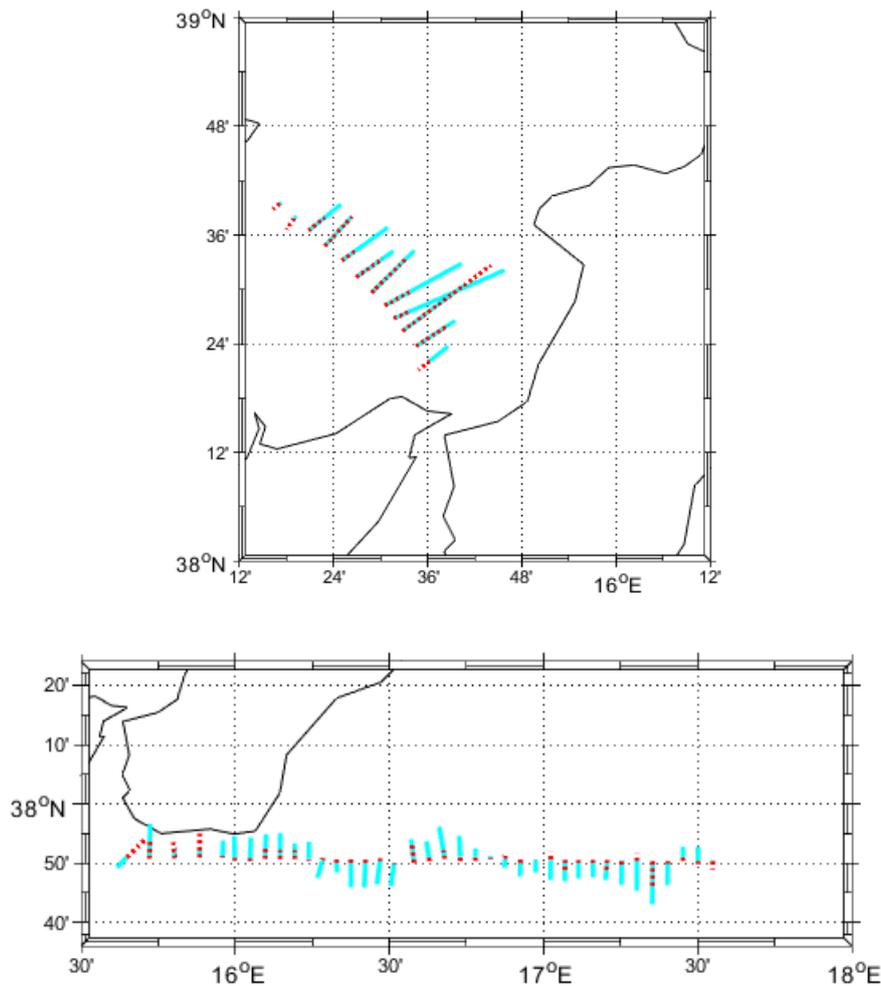


Figure 16 : Représentation et comparaison de la composante perpendiculaire à la vitesse du bateau (en cyan) des vitesses moyennées mesurées par l'ADCP et de la composante perpendiculaire à la vitesse du bateau des vitesses moyennées mesurées par le MVP (en rouge) pour le transect PL06 (en haut) et le transect PL07 (en bas). Chacune des composantes fut calculées à partir de la trajectoire du bateau au point considéré.

Les composantes perpendiculaires de l'ADCP sont donc en accord avec les composantes absolues représentées précédemment. Les calculs sont corrects dans ce cas. En revanche, les composantes perpendiculaires calculées à partir des données du MVP semblent ne pas toujours être en accord avec les composantes données par l'ADCP.

4. Discussion

La circulation générale en Méditerranée est cyclonique. Les courants recensés par l'ADCP et le MVP devraient donc suivre cette circulation. Ainsi, en surface et en profondeur,

les eaux baignant la Calabre (en mer Ionienne) se déplacent vers le sud/sud-ouest. Du côté de la mer Tyrrhénienne, en surface et en profondeur, les eaux baignant la Calabre se déplacent vers le nord/nord-est. L'analyse des résultats présentés précédemment devrait donc confirmer cette tendance.

4.1. Paramètres physiques des transects

Dans un premier temps, les paramètres physiques des transects ont été étudiés. Les graphiques donnant la température, la salinité et la masse volumique en fonction de la pression et le diagramme θ -S obtenus et décrits dans la partie précédente permettent d'obtenir des informations sur les masses d'eau recoupées par le transect.

4.1.1. Interpolation des données

Les données obtenues par le MVP n'étaient pas complètes. En effet, à partir de 267m de profondeur, les échantillons de données ne présentent que des valeurs NaN. Les valeurs NaN peuvent être expliquées par la présence de mesures invalides. Lors de la campagne, plusieurs types de mesure ont été réalisés. Les données étudiées tout au long de ce stage furent obtenues après utilisation d'un ADCP et d'un MVP. Lors du déploiement du MVP, des mesures biogéochimiques ont également été réalisées. Les mesures biogéochimiques sont plus contraignantes que les mesures d'hydrologie ou d'hydrodynamique, notamment dans le cas de cette campagne pendant laquelle les stations devaient être reliées en un temps donné. La vitesse du bateau fut adaptée pour relier les différentes stations dans les temps, or cette vitesse était trop grande pour assurer des mesures à cette profondeur avec le MVP, d'où la présence de valeur NaN.

Les valeurs de salinité, température et masse volumique ont été interpolées en utilisant la méthode présentée précédemment. Il suffit d'étudier les graphiques de température, salinité et masse volumique en fonction de la pression pour s'assurer qu'elles ne s'éloignent pas des valeurs réelles. Pour le transect PL06, qu'il s'agisse de la température, de la salinité ou de la masse volumique, les nuages de points restent uniformes et ne présentent pas de valeurs aberrantes qui auraient pu être le résultat d'une mauvaise interpolation. Dans le cas du transect PL07, le graphique de la température en fonction de la pression est également homogène. En revanche, les graphiques représentant la salinité et la masse volumique du transect PL07 présentent respectivement 8 et 7 points dont les valeurs s'éloignent du profil général. Ces valeurs sont comprises entre 20 et 30m de profondeur et concernent différentes stations. Après vérification des tableaux de données, il ne s'agit pas de valeurs interpolées mais bien de valeurs

résultant des mesures effectuées par le MVP. L'interpolation effectuée par la fonction utilisée est donc correcte.

4.1.2. Masses d'eau

De manière générale, les courbes de température, salinité et masse volumique donnent des informations sur la composition de la colonne d'eau en termes de masse d'eau. En effet, des changements brutaux de salinité, de température ou de masse volumique dans une colonne d'eau peuvent être expliqués par le passage d'une masse d'eau à une autre. En Méditerranée, les valeurs de température sont comprises entre 11°C (eau formée en mer Adriatique en hiver sous l'effet de la Bora) et 24°C (en été, eau de surface du bassin levantin). Les valeurs de salinité sont comprises entre 18.2 (eau de la mer Noire entrant dans la Méditerranée au niveau du Bosphore) et 39.1 (eau Levantine intermédiaire) et les valeurs de masse volumique sont comprises entre 1014kg/m³ (masse d'eau de surface apportée par la mer Noire) et 1029,5kg/m³ (masses d'eau profondes formées en Adriatique) (Fieux, 2010).

Les graphiques de salinité, température et masse volumique en fonction de la pression ne sont pas suffisants pour analyser les masses d'eau, ils nous permettent néanmoins de mettre en évidence pour chacun des transects une thermocline saisonnière (zone où la température diminue brutalement) entre 0 et 50m de profondeur. Les masses d'eau sont donc mises en évidence par un diagramme θ -S. Il existe différents types de masses d'eau en Méditerranée. De façon simplifiée, on dénombre deux masses d'eau de surface :

- AW (Atlantic Water)
- BSW (Black Sea Water)

Une masse d'eau intermédiaire :

- LIW (Levantine Intermediate Water)

Et 4 masses d'eau profondes :

- WMDW (Western Mediterranean Deep Water)
- AdDW (Adriatic Deep Water)
- AeDW (Aegan Deep Water)
- TDW (Tyrrhenian Dense Water)

(Millot and Taupier-Letage, 2005). Les transects étudiés étant peu profonds, les masses d'eau profondes ne pourront pas être observées (elles ne sont présentes qu'à partir de 1000m de profondeur environ).

Les deux transects présentent en surface des masses d'eau fortement dessalées par rapport à celle retrouvées un peu plus en profondeur. La campagne a été réalisée au mois de mai, la dessalure peut donc être expliquée par les précipitations. De plus, dans le cas du transect PL07, il faut prendre en compte l'influence de la mer Adriatique. En effet, la mer Adriatique apporte une eau légèrement dessalée par les apports d'eau douce des fleuves environnants (le Pô par exemple). Plus en profondeur, le diagramme θ -S montre pour les deux transects la présence d'une eau chaude ($\theta > 14.5^{\circ}\text{C}$) très salée ($S > 38.6$) et dense ($\sigma > 28.5$). Ces caractéristiques sont représentatives de la LIW qui circule dans la totalité du bassin entre 200 et 500m de profondeur.

Les transects présentent donc des masses d'eau similaires en profondeur mais leurs valeurs de salinité, température et masse volumique restent néanmoins très différentes en surface. Ces différences sont principalement dues à la zone étudiée pour chacun des transects. En effet, même si les transects semblent proches (seulement séparés par le détroit de Messine), ils ne se trouvent pas dans le même bassin (le transect PL06 a été effectué en Mer Tyrrhénienne soit dans le bassin occidental, le deuxième a été réalisé en mer Ionienne soit dans le bassin oriental). Les deux bassins, séparés par le seuil de Sicile, ont des caractéristiques différentes. Par exemple, le bassin oriental présente des eaux plus salées que le bassin occidental. La mise en place de ce gradient Ouest-Est de salinité peut être expliqué par la différence d'évaporation dans les deux bassins.

Après avoir étudié les masses d'eau et les caractéristiques des transects PL06 et PL07, les vitesses du courant ont été étudiées à partir des profils et des représentations des vecteurs vitesses. Les profils et les représentations sous forme de vecteur permettent de mettre en évidence la circulation des masses d'eau dans la zone étudiée.

4.2. Composantes absolues (ADCP)

Les profils des composantes est et nord permettent de visualiser les vitesses absolues mesurées par l'ADCP sur la totalité de la colonne d'eau (figure 11). Des vitesses négatives décrivent un déplacement vers le sud (profils nord-sud) ou vers l'ouest (profils est-ouest), des vitesses positives décrivent un déplacement vers le nord (profils nord-sud) ou vers l'est (profils est-ouest). La représentation de ces mêmes vitesses, moyennées verticalement, sous forme de vecteurs permet d'observer une tendance sans tenir compte d'une profondeur en particulier et

de visualiser clairement la direction suivie par les courants dans la zone étudiée (figures 12 et 13).

La circulation générale sera donc mise en évidence par la représentation vectorielle. Sa description sera complétée, en profondeur, par l'étude des profils des composantes nord et est des vitesses absolues mesurées par l'ADCP.

Dans le cas du transect PL06, les vecteurs des vitesses absolues suivent une direction nord-est. Ce transect est particulièrement homogène sauf dans le cas des deux premières valeurs (entre 15.3 et 15.35° degrés de longitude) qui donnent une direction ouest. Ces valeurs pourront être négligées, elles ne semblent pas correspondre à la circulation étudiée et ne sont représentées sur les profils de vitesse donnée par l'ADCP qu'en profondeur.

En effet, en profondeur, peu de variations sont observées. Les profils de vitesse sur les composantes nord et est sont en grande partie positifs. Ils montrent donc un courant orienté nord-est sur la totalité de la colonne d'eau. Seule la variation soulignée précédemment est observée entre 15.3 et 15.35° degrés de longitude. Cette variation correspond à une inversion est/ouest de la circulation à partir de 125m de profondeur. La composante ouest étant majoritaire sur la colonne d'eau dans cette zone, elle influence la valeur moyenne qui est également orientée ouest dans cette zone. De telles valeurs pourraient par exemple représenter une deuxième circulation influencée par la présence de l'île du Stromboli. Néanmoins, elles correspondent à l'une des extrémités du transect, il est donc difficile de déterminer s'il s'agit réellement d'un autre courant. Des mesures supplémentaires pourraient être nécessaires pour confirmer ou infirmer cette hypothèse, d'où l'idée de les négliger.

Mise à part ces valeurs extrêmes qui seront négligées, la circulation mise en évidence par l'ADCP est en accord avec les résultats attendus. La circulation des masses d'eau dans le bassin occidental étant cyclonique (sens inverse des aiguilles d'une montre), le courant observé sur le transect PL06 était supposé remonter la côte ouest de la Calabre (direction nord-est). Cette tendance est donc confirmée.

Le transect PL07 présente plus de variations. On rappelle que, pour ce transect, une tendance sud-ouest devrait être observée. La représentation des vecteurs de vitesse absolue permet de dénombrer 5 zones.

- Une première influencée par le détroit de Messine entre 15.5 et 16° de longitude.
- Une seconde orientée nord-est entre 16 et 16.25° de longitude.

- Une troisième orientée principalement sud-ouest entre 16.25 et 16.5° de longitude.
- Une quatrième, orientée vers le sud mais présentant de nombreuses variations entre 16.5 et 17.4° de longitude.
- Une dernière orientée nord-ouest entre 17.4 et 17.6 degrés de longitude.

La zone influencée par le détroit de Messine est facilement visible, les vecteurs de vitesse y sont désordonnés et ne permettent pas d'obtenir une direction évidente. Le détroit de Messine permet comme le canal de Sicile, de relier le bassin méditerranéen occidental au bassin méditerranéen oriental. Il a néanmoins peu d'importance par rapport au canal de Sicile, d'une part parce qu'il est très étroit (3.3km de sa plus petite largeur) et d'autre part parce qu'il est très peu profond (seuil à 20m environ). Le détroit de Messine est également sujet à de violents courants de marée (2 à 3m/s) qui engendrent de forts tourbillons. De telles structures pourraient avoir un effet sur les premières valeurs du transect PL07 et expliquer la présence de courants particulièrement désordonnés dans la zone comprise entre 15.5 et 16° de longitude.

La circulation observée entre 16 et 16.25° de longitude doit être étudiée séparément de la première zone. Elle est assez éloignée de la sortie du détroit de Messine pour ne plus en subir les effets et pourrait représenter un contre-courant remontant la côte est de la Calabre (direction nord-est).

Plus au large (entre 16.25 et 16.5° de longitude), une circulation majoritairement sud-ouest est observée.

Une zone plus étendue est ensuite observée, elle pourra être comparée à la circulation mise en évidence entre 16.25 et 16.5° de longitude, elle est majoritairement orientée sud-ouest mais présente de nombreuses variations. En étudiant plus en détails ces variations, on obtiendra, du large vers la côte :

- Une première inversion est-ouest entre 16.75 et 17.4° de longitude.
- Une seconde inversion sud-ouest/nord-ouest entre 16.5 et 16.75° de longitude.

Les 3 dernières valeurs (dernière zone) correspondant à l'extrémité du transect pourront être négligées, car facilement influencées par une circulation se trouvant plus au large, ou représentant une autre circulation.

En profondeur, la circulation suit le schéma énoncé précédemment, peu de variations sont observées. Les zones décrites auparavant sont donc observables sur la totalité de la colonne d'eau. Seul changement notable, la présence de zones, en profondeur où la vitesse sur les deux

composantes est largement atténuée et atteint 0, notamment lorsque les valeurs, en surface, sont positives. La présence de valeur nulle pourra être expliquée par l'atteinte d'une longitude pour laquelle le courant s'inverse (par exemple à 17,2° de longitude sur le profil de vitesse absolue de la composante est). Si ces valeurs sont présentes pour de grandes profondeurs, elles pourraient être le résultat du forçage exercé par le fond et donc signifier que le fond est proche.

D'une manière générale, peu importe le transect, il faut relever que les profils de vitesses absolues présentent des discontinuités en surface (1^{ère} mesure) et au fond (dernières mesures). Ces discontinuités pourront être expliquées de différentes façons. Pour rappel, l'ADCP utilise l'effet Doppler pour obtenir la vitesse du courant. Dans le cas de la première mesure, il faudra considérer :

- Les remous du bateau.
- La vitesse de l'onde. L'onde mettra peu de temps à revenir au récepteur, la mesure pourra donc être bruitée de façon plus importante qu'une mesure plus profonde.

Dans le cas de la dernière mesure, il faudra, en plus de considérer les deux paramètres explicités précédemment, prendre en compte le fait que l'onde pourrait ne pas être retournée (profondeur supérieure à 300m) ou subir des changements de bathymétrie si elle n'est pas renvoyée par une particule suivant le courant. Dans le cas de la dernière mesure, il faudra, en plus de considérer les deux paramètres explicités précédemment, prendre en compte le fait que l'onde pourrait ne pas être retournée (profondeur supérieure à 300m) ou subir des effets de bathymétrie si elle ne croise pas de particule.

Dans les deux cas, il faudra tenir compte de la charge en particule. Pour des eaux très peu chargées en particules, les résultats ne sont pas garantis (les mesures d'ADCP se basent sur les particules suivant passivement le courant pour déterminer une vitesse).

L'étude des composantes de vitesse absolues mesurées par l'ADCP nous ont donc permis d'obtenir une idée précise de la circulation sur les deux transects. Or ces composantes ne peuvent être directement comparées à celles obtenues après application de la méthode dynamique sur les mesures de MVP qui sont des composantes perpendiculaires à la vitesse du bateau. C'est pourquoi, des composantes perpendiculaires à la vitesse du bateau furent également calculées à partir des données de l'ADCP et de l'utilisation de formules trigonométriques.

4.3. Composantes perpendiculaires à la vitesse du bateau (ADCP et MVP)

Les représentations des composantes perpendiculaires à la vitesse du bateau des vitesses données par l'ADCP et par le MVP (figure 16) par la fonction `m_quiver` permettent de comparer les résultats des deux appareils de mesure. On rappelle que les composantes perpendiculaires de vitesse du MVP ont été obtenues par le calcul à la suite de l'utilisation de la méthode dynamique. La comparaison nous permettra donc de mettre en évidence les inconvénients de la méthode de calcul si les résultats sont différents. On rappelle également que ces représentations ne prennent en compte que la moyenne verticale effectuée sur les valeurs de vitesse. Représenter des valeurs moyennées permet d'effectuer une comparaison globale sans tenir compte d'une profondeur en particulier.

De même que précédemment, les profils de vitesse (figures 14 et 15) réalisés dans le cas des composantes perpendiculaires à la vitesse du bateau pour l'ADCP et le MVP permettront de compléter l'observation en profondeur. Des vitesses négatives décrivent un déplacement vers le sud (profils nord-sud) ou vers l'ouest (profils est-ouest), des vitesses positives décrivent un déplacement vers le nord (profils nord-sud) ou vers l'est (profils est-ouest).

Comme dans le cas des vecteurs de vitesse absolue, les valeurs se trouvant aux extrémités du transect ne seront pas prises en compte. Pour le transect PL06, on prendra donc seulement en compte les composantes 3 à 11 incluses. La dernière sera sûrement influencée par le détroit de Messine (d'où les composantes inversées). De même pour les deux premières valeurs qui pourront être influencée ou appartenir à un autre circulation. Pour le transect PL07, on étudiera les valeurs 5 à 36, les 4 premières valeurs étant influencées par le détroit de Messine et les 3 dernières valeurs n'appartenant pas à la circulation étudiée.

On s'attendra donc à obtenir des composantes MVP plus faibles que les composantes ADCP, le calcul des composantes MVP ne permettant d'obtenir que la composante géostrophique de la vitesse et non la composante absolue. De plus, les composantes ADCP et MVP devront être dans la même direction. Leurs représentations seront donc confondues et ne varieront que par leur valeur.

Le transect PL06 suit bien la logique énoncée, les composantes perpendiculaires obtenues dans le cas du MVP sont plus faibles ou égales aux composantes perpendiculaires obtenues pour l'ADCP et dans la même direction. Seule une valeur ne remplit pas la première

condition, il s'agit de la dixième valeur. En effet, dans ce cas, la composante MVP est plus grande que la composante ADCP.

En profondeur pour ce transect, qu'il s'agisse du profil de vitesse donné par l'ADCP ou le MVP, peu de changements sont observés. Les composantes est et nord ont la même importance. Les profils de vitesse MVP mettent néanmoins en évidence une inversion du courant entre 15.55 et 15.65° de longitude à partir de 50m de profondeur. La circulation passe d'une direction nord-est à une direction sud-ouest. Cette direction est la plus marquée sur la colonne d'eau dans cette zone. Elle affecte donc la moyenne verticale réalisée sur les valeurs de MVP et donne sur la dernière valeur de la représentation m_quiver une valeur inversée par rapport à la valeur donnée par l'ADCP dont le profil de vitesse est parfaitement homogène sur la totalité de la colonne d'eau. Néanmoins, cette valeur appartient aux extrémités du transect qui, comme souligné précédemment, seront négligées.

Le transect PL07 remplit la première condition pour chacune des composantes prises en compte, les composantes MVP sont toutes plus faibles que les composantes ADCP. En revanche, certaines composantes MVP n'ont pas le même signe que la composante ADCP qui leur est associée. Ces incohérences sont notamment visibles dans le cas de changement de direction brutaux du courant pour lesquels les caractéristiques (température, salinité et masse volumique) deviennent plus complexes (passage d'une direction sud à une direction nord).

En profondeur pour ce transect, un unique changement est mis en évidence par le profil de vitesse MVP. Il est localisé entre 15.6 et 16° de longitude. Les valeurs sont d'abord en surface fortement négatives (direction sud) et à partir 25m de profondeur deviennent fortement positives (direction nord) avant de s'atténuer et de redevenir négatives à partir de 150m. Ces valeurs de vitesse, très intenses influencent la moyenne verticale et mène donc à la représentation de composantes perpendiculaires MVP plus grandes que les composantes perpendiculaires ADCP dans cette zone. De plus, cette zone correspond à la zone influencée par le détroit de Messine et n'est pas représentée sur les profils de vitesse ADCP. Il s'agit donc d'une des zones qui sera négligée pour les raisons citées ultérieurement.

Les différences de signe ou la représentation de valeurs trop importantes par rapport aux composantes d'ADCP peuvent être expliquées de différentes manières.

Tout d'abord, il faut noter que le calcul des composantes MVP ne permet d'obtenir que des vitesses géostrophiques. En effet, en utilisant la méthode dynamique, on pose l'hypothèse de la géostrophie. Pour utiliser cette hypothèse il nous faut considérer les courants étudiés

comme permanents et négliger tous types de frottement. La géostrophie traduit l'équilibre entre forces de pression à la verticale et Coriolis à l'horizontal, son expression est explicitée par les équations 1,2 et 3 (Matériel et méthode, Méthode dynamique). L'équilibre géostrophique s'exprimera donc sur les composantes horizontales et sera complétée par l'hydrostatique à la verticale. Lorsqu'on considère l'approximation hydrostatique, le gradient de pression est créé par une différence de hauteur dans la colonne d'eau. Il est orienté des hautes vers les basses pressions et met en mouvement les particules d'eau dans la même direction. Dès leur mise en mouvement, les particules d'eau sont déviées par Coriolis. L'équilibre est atteint lorsque l'écoulement est perpendiculaire au gradient de pression (parallèle aux isobares) (figure 5, Matériel et méthode, Méthode dynamique).

On peut utiliser cette approximation dans le cas des grands courants de type Gulf Stream, mais elle est plus contraignante dans le cas d'une petite circulation. En effet, dans le cas de circulation à petite échelle, lorsque les contrastes sont forts (fortes variations de salinité, température et masse volumique) comme ici, des effets de baroclinicité apparaissent. Pour rappel on parlera de fluide barocline pour un fluide dont les propriétés varient avec l'épaisseur. Dans ce type de fluide les isobares inclinées croisent les isopycnes (figure 17).

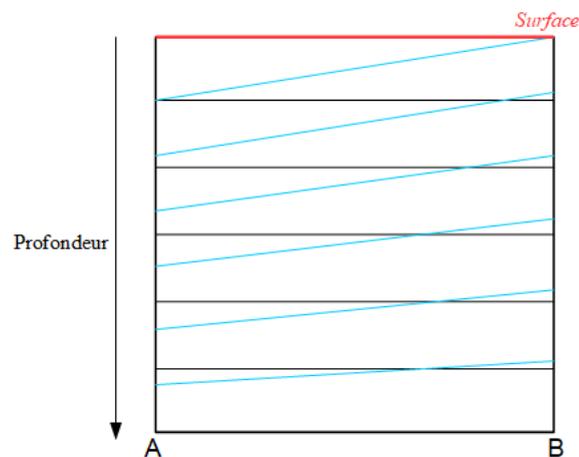


Figure 17 : Représentation des isobares (en bleu) et des isopycnes (en noir) dans un fluide barocline. Les points A et B représentent des stations quelconques.

En présence de forts contrastes, l'utilisation de la géostrophie s'éloigne de la réalité. L'équilibre entre pression et Coriolis n'est pas atteint. La méthode dynamique ne prendra donc pas en compte ces effets, d'où l'inversion de certaines des composantes notamment au niveau de changements brutaux de direction du courant.

De plus, la méthode dynamique est une méthode relative. Elle demande la détermination d'une profondeur de référence pour laquelle la vitesse est nulle. Cette profondeur a été fixée à 267m pour éviter les valeurs NaN données par le MVP à des profondeurs plus importantes. Le choix de ce niveau de référence apporte une incertitude sur les calculs. En effet, on ne peut pas réellement exclure l'hypothèse que des courants non négligeables pourrait se trouver en profondeur. Pour obtenir des résultats plus précis, il faudrait optimiser la profondeur de no motion en étudiant plus en détail la répartition des caractéristiques des masses d'eau afin de localiser une profondeur pour laquelle le courant s'annule. On pourrait également utiliser une valeur pour laquelle le courant est connu mais il est difficile d'obtenir des valeurs de courant en profondeur par mesures directes.

Finalement, l'utilisation de la méthode dynamique permet d'obtenir des valeurs de vitesses qui semblent en partie correctes pour le transect PL06 mais cette méthode s'éloigne de la réalité dans le cas du transect PL07 où les variations sont plus nombreuses.

5. Conclusion

Les mesures des différents appareils ont mis en évidence les caractéristiques des deux zones étudiées. L'utilisation du MVP a permis de rendre compte des masses d'eau composant les colonnes d'eau des deux transects grâce à des mesures de température, salinité et masse volumique. Ainsi les masses d'eau présentes assez semblables en profondeur (circulation de la LIW) diffèrent en surface faisant apparaître les caractéristiques des deux bassins méditerranéens.

L'ADCP, par ses mesures de courants a permis d'obtenir des valeurs de vitesses absolues qui, moyennées puis représentées ont donné une tendance de la direction suivie par les courants dans les zones étudiées. Elles ont également mis en évidence l'influence du détroit de Messine, zone où les mesures n'ont pas été effectuées, sur les deux transects.

La tendance obtenue montrant une direction nord-est dans le cas du transect PL06 et une direction plus contrastée mais globalement sud-ouest dans le cas du transect PL07 a confirmé le suivi d'une circulation de type cyclonique par les courants étudiés.

Enfin, les mesures du MVP ont permis, en appliquant la méthode dynamique, d'obtenir des valeurs de vitesses géostrophiques qui ont pu, par le biais de la représentation des composantes perpendiculaires à la vitesse du bateau des deux appareils, être comparées aux

valeurs données par l'ADCP. La comparaison de ces composantes a fait apparaître les inconvénients liés à l'utilisation de ce genre de méthode.

La méthode dynamique, utilisée dans les années 1930, permettait de compenser le manque d'appareil de mesure en donnant une valeur de vitesse pour un courant supposé géostrophique. Or l'utilisation de cette méthode se révèle très éloignée de la réalité dans le cas de petites échelles. Aujourd'hui encore, le passage d'une vitesse donnée par le calcul dynamique à une vitesse absolue pose problème principalement parce qu'il existe des courants de fond qui ne peuvent être négligés.

La circulation océanique pourra donc être étudiée, pour éviter les incertitudes de calcul, avec des appareils de mesure de courant type ADCP ou dans le cas de la circulation plus profonde, à l'aide de traceurs anthropogéniques. Par exemple, des traceurs injectés par l'Homme dans l'atmosphère (tritium, ou encore fréons), ont été utilisés pour suivre des masses d'eau Atlantique et Antarctique dans le cadre de la mission CITHER réalisée entre 1997 et 2013.

Bibliographie

- Béthoux, J., De Madron, X. D., Nyffeler, F., and Tailliez, D. (2002). Deep water in the western mediterranean : peculiar 1999 and 2000 characteristics, shelf formation hypothesis, variability since 1970 and geochemical inferences. *Journal of Marine Systems*, 33 :117–131.
- Dercourt, J., Zonenshain, L., Ricou, L.-E., Kazmin, V., Le Pichon, X., Knipper, A., Grandjacquet, C., Sbertshikov, I., Geysant, J., Lepvrier, C., et al. (1986). Geological evolution of the tethys belt from the atlantic to the pamirs since the lias. *Tectonophysics*,123(1-4) :241–315.
- Doglioli, A.M. (2014), Notes sur la Circulation Générale en Méditerranée pour le cours d'Océanographie Générale, Université d'Aix-Marseille.
- Doglioli, A. M., Petrenko, A. A. (2015), Notes de Cours et Travaux Dirigés de Dynamique Océanique, Université d'Aix-Marseille.
- Fieux, M. (2010). L'océan planétaire. Les Presses de l'ENSTA.
- Houpert, L. (2010), Etude du renouvellement des eaux profondes en Méditerranée nord occidentale pendant la période 2007/2010, Université Pierre et Marie Curie.
- Lascaratos, A., Williams, R. G., and Tragou, E. (1993). A mixed-layer study of the formation of levantine intermediate water. *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 98(C8) :14739–14749.
- Le Floch, J. and Romanovsky, V. (1954). Circulation superficielle des eaux dans la partie orientale du bassin occidental de la méditerranée.
- Millot, C. (1999). Circulation in the western Mediterranean Sea. *Journal of Marine Systems*, 20(1-4) :423–442.
- Millot, C. and Taupier-Letage, I. (2005). Circulation in the mediterranean sea. In *The Mediterranean Sea*, pages 29–66. Springer.
- Millot, C. (2013). L'océanographie physique de la Méditerranée, Institut Océanographique, www.institut-ocean.org.

Annexes

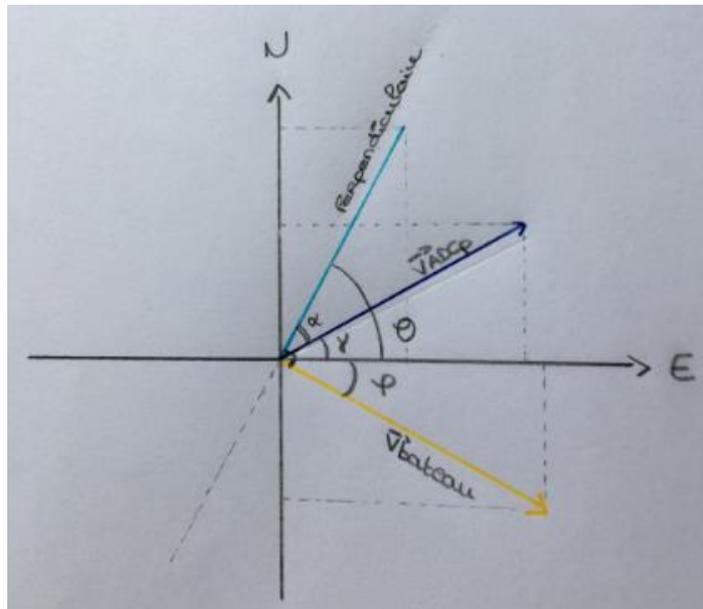
Annexe 1: Fonction permettant d'extraire les données de salinité, température, masse volumique, fluorescence, pression, distance entre les stations, latitude et longitude des MVP.

```
%Extraction des données MVP
function [lon,lat,dist,pres,temp,sal,dens,fluo]=load_MVPtransect(transectName)
load(transectName);
numprofs=length(data);
numbins=length(data(1).pres.value);
dist=zeros(numprofs,numbins);
lon=zeros(1,numprofs);
lat=zeros(1,numprofs);
pres=NaN(numprofs,numbins);
temp=NaN(numprofs,numbins);
sal=NaN(numprofs,numbins);
dens=NaN(numprofs,numbins);
fluo=NaN(numprofs,numbins);
%Data
for iProf=1:numprofs;
    lon(iProf)=metadata(iProf).lon.value;
    lat(iProf)=metadata(iProf).lat.value;
    pres(iProf,:)=data(iProf).pres.value;
    temp(iProf,:)=data(iProf).temp.value;
    sal(iProf,:)=data(iProf).psal.value;
    dens(iProf,:)=data(iProf).dens.value;
    if exist('data(iProf).analog')
        %Pour fluo
        fluo(iProf,:)=data(iProf).analog.value;
    end
end
%Distance en km
dist_vec=zeros(1,numprofs);
dist_vec(2:end)=m_idist(lon(1:end-1),lat(1:end-1),lon(2:end),lat(2:end))./1000;
dist_vec=cumsum(dist_vec);
for idum=1:numprofs
    dist(idum,:)=dist_vec(idum);
end
```

Annexe II : Composantes perpendiculaires

Les composantes perpendiculaires obtenues dans les figures 11 et 12 du rapport furent calculées à l'aide des formules trigonométriques classiques. Pour cela, plusieurs angles ont été définis :

- L'angle θ , représentant l'angle formé par l'axe Est du repère de base et la perpendiculaire au vecteur de la vitesse du bateau (perpendiculaire).
- L'angle ϕ , représentant l'angle formé par l'axe Est du repère de base et le vecteur de la vitesse du bateau (V_{bateau}).
- L'angle γ , représentant l'angle formé par l'axe Est du repère de base et le vecteur de la vitesse du courant mesuré par l'ADCP (V_{ADCP}).
- L'angle α , représentant l'angle formé par le vecteur de la vitesse du courant mesuré par l'ADCP (V_{ADCP}) et la perpendiculaire au vecteur de la vitesse du bateau (perpendiculaire).



Les angles ϕ et γ ont ensuite été calculés à l'aide de la fonction `atan2` sous MATLAB. L'angle θ a été calculé à l'aide de l'angle ϕ . Deux cas furent considérés en prenant en compte les positions possibles des différents vecteurs de vitesse dans le repère.

```
for i=1:length(Phi)
if abs(Phi(i))>=pi/2
    ThetaMVP(i)=Phi(i)+(pi/2)-2*pi;
    disp('Phi(i)>=pi/2')
end

if abs(Phi(i))<pi/2
    ThetaMVP(i)=Phi(i)+(pi/2);
    disp('(Phi(i))<pi/2')
end
end
```

De la même façon l'angle α a été calculé à partir des angles θ et γ . Trois cas ont été considérés en prenant en compte les positions possibles des différents vecteurs de vitesse dans le repère.

```
for i=1:length(Gamma)
if -pi<(ThetaMVP(i)-Gamma(i))<pi
Alpha(i)=(ThetaMVP(i)-Gamma(i));
disp('-pi<(ThetaMVP(i)-Gamma(i))<pi')
end
if (ThetaMVP(i)-Gamma(i))>=pi
Alpha(i)=ThetaMVP(i)-Gamma(i)-2*pi;
disp('Theta-Gamma>=pi')
end
if (ThetaMVP(i)-Gamma(i))<=-pi
Alpha(i)=(2*pi)+ThetaMVP(i)-Gamma(i);
disp('Theta-Gamma<=-pi')
end
end
```

Après calcul des différents angles les formules du cosinus, sinus et de la tangente ont été appliquées pour calculer les composantes nord et est de la vitesse du courant perpendiculaire à la vitesse du bateau calculé à partir des données de l'ADCP.

Résumé

La mer Méditerranée est une mer intercontinentale semi-fermée. Elle peut être séparée en deux bassins principaux, le bassin occidental et le bassin oriental qui sont reliés par le canal de Sicile et séparés de nouveau en plusieurs sous-bassins. Reliée à l'Atlantique par le détroit de Gibraltar, la Méditerranée est caractérisée par la présence de masses d'eau de surface Atlantique mais également par la présence de masses d'eau intermédiaires formées dans le bassin Levantin et de masses d'eau profondes formées dans les différents sous-bassins. La campagne PEACETIME visant à mettre en évidence les processus intervenant à l'interface air-atmosphère lors d'épisodes de dépôt de poussière a permis la réalisation de mesures de courantologie. Ces données ont été analysées notamment à l'aide de la méthode dynamique dans le but d'étudier le caractère cyclonique de la circulation des deux bassins principaux en particulier à proximité de la Calabre où deux circulations confirmant ce caractère ont été mises en évidence.

Mots Clés : Méditerranée, PEACETIME, Méthode dynamique, MVP, ADCP.

Abstract

Mediterranean Sea is a demi-closed intercontinental sea. It can be separated in two main basins, the western basin and the oriental basin which are connected by the channel of Sicily and divided again in several sub-basins. Connected to the Atlantic Ocean by the strait of Gibraltar, the Mediterranean Sea is characterized by the presence of Atlantic water on the surface but also by intermediate water masses formed in the Levantine basin and deep-water masses formed in the different basins. PEACETIME campaign which aim for highlight processes occurring at the atmosphere-ocean interface after dust deposition in the Mediterranean Sea allowed to make current measurements. These data have been analysed especially thanks to the dynamic method to study the cyclonic character of the circulation of the two principal basins and particularly nearby Calabria where two currents confirming this character were highlighted.

Keywords: Mediterranean Sea, PEACETIME, Dynamic method, MVP, ADCP.