

Mémoire de Stage en Laboratoire de recherche

Mise en place d'un modèle de vol pour le VVP
(Velocity Vertical Profiler)

Yohan Esteves

Responsable du stage: Stéphanie Barrillon

2021-2022



Licence Sciences de la Vie et de la Terre
Parcours Mer Spécialité Océanographie physique

Table des matières

1	Introduction	1
2	Matériels et Méthodes	2
2.1	Le Vertical Velocity Profiler (VVP)	2
2.1.1	Description de l'appareil	2
2.1.2	Fonctionnement de l'appareil	5
2.2	Sortie en Mer	8
2.2.1	Manipulation	8
2.3	Traitement des données	10
3	Résultats	12
3.1	Sortie en Mer	12
3.1.1	Rade	12
3.1.2	JULIO (Judicious Location for Intrusion Observation)	13
3.1.3	Cassidaigne	15
3.2	Coefficient de Traînée	16
3.3	Variation de Volume	17
4	Discussion	19
4.1	Impact de la structure du VVP sur le volume	19
4.2	Mise en place d'un modèle de Vol	20
5	Conclusion et Perspective	21

Remerciements

Je voudrais remercier tout d'abord ma maîtresse de stage qui m'a soutenu et aidé tout au long de ce stage en m'aiguillant sur la marche à suivre pour arriver au bout. Également elle a corrigé ce rapport et cela demandait beaucoup de courage et de temps alors je lui en suis très reconnaissant.

J'aimerais aussi remercier tout l'équipage avec qui nous avons pu partir en mer pour faire des profils avec le VVP durant ce stage c'était une expérience très enrichissante.

1 Introduction

Ce stage s'inscrit dans la thématique de la mesure de composante verticale de la vitesse des courants océaniques, et en particulier pour les fines échelles océaniques. En effet, la connaissance de ces vitesses verticales permettrait une meilleure compréhension de la dynamique océanique à fines échelles, et connaît un regain majeur d'intérêt en océanographie physique.

Ce que l'on considère comme "fines échelles" regroupe les processus dits de méso-échelle (c'est-à-dire ayant une étendue spatiale comprise entre 50 et 100 km et pouvant durer de quelques semaines à plusieurs mois), et de sous-méso-échelle (allant de 0,1 à 50 km à l'horizontale et de 0,1 à 1 km sur la verticale et ayant une durée potentielle de quelques jours à quelques semaines) (Ferrari and Wunsch, 2009). En particulier pour la sous-méso-échelle, les structures étudiées possèdent une dynamique tridimensionnelle (Capet et al., 2008, McWilliams, 2016) impliquant alors des vitesses verticales océaniques. La connaissance de la composante verticale de la vitesse est alors un atout majeur si l'on veut une compréhension complète de ces phénomènes, ainsi que leur lien avec les échanges biologiques.

Les vitesses verticales ont longtemps été négligées, car d'intensité bien moindre que les vitesses horizontales, et leurs mesures considérées comme trop complexes, en dépit de leur intérêt. Cependant, des études de modélisation ont montré l'importance de la composante verticale dans la compréhension de l'équilibre océanique mais aussi de son impact sur le changement climatique, car les échanges de carbone entre l'atmosphère et l'océan, permettant un grand stockage de carbone, proviennent en partie de ces courants verticaux. Également, la biologie est aussi impactée par la composante verticale qui permet les échanges nutritifs dans la colonne d'eau. Ainsi, la modélisation des vitesses verticales des courants océaniques donnent une connaissance non négligeable sur la production biologique et les budgets biogéochimiques (Martin et al., 2001, Lévy et al., 2012, Mahadevan, 2016, McGillicuddy, 2016, Rousselet et al., 2019).

La mise au point d'instruments dédiés à la mesure in situ de la composante verticale des vitesses de courants océaniques permettrait une mesure directe sans passer par des estimations indirectes à l'aide de la version Q-vector de l'équation *omega* (Fiekas et al. 1994, Strass 1994, Tzortzis et al., 2021), méthode valable seulement dans le cadre de l'hypothèse quasi-géostrophique. Actuellement, les mesures sont effectuées à l'aide d'ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), principalement en présence de vitesses verticales importantes (Dickey 2003, Thurnherr 2011). Les gliders permettent également d'estimer la vitesse verticale en comparant les vitesses verticales de l'appareil avec les données d'un modèle de vol (Margirier et al. 2017, Fuda et al. 2013, Frajka-Williams et al. 2011, Merkelbach et al. 2010). Ce modèle de vol doit retranscrire au mieux le mouvement de l'appareil sans perturbation afin d'avoir un modèle neutre permettant de comparer ensuite son mouvement vertical en conditions réelles.

La campagne FUMSECK (Facilities for Updating the Mediterranean Submesoscale-Ecosystem Coupling Knowledge, Barrillon 2019), qui s'est déroulée en mer Ligure au printemps 2019, a permis de tester différents instruments pour la détermination des vitesses verticales, tels que différents ADCP (ADCP de coque, FF-ADCP (Free Fall-ADCP), L-ADCP et Sentinel V (5 faisceaux) à profondeur fixe et en profil), d'un glider mais aussi du premier prototype de profileur de vitesses verticales VVP, inspiré des méthodes de mesure des gliders.

Ce premier prototype comprenait plusieurs défauts qui ont pu être mis en évidence grâce à cette campagne et la structure fut modifiée dans une version plus récente de l'appareil. Ce nouveau prototype a été utilisé lors de tests en mer durant lesquels les données étudiées lors de ce stage ont été collectées. Afin d'obtenir des mesures de vitesses verticales, il faut pouvoir déterminer un modèle de vol précis. La problématique de ce stage est alors de savoir s'il est possible de mettre au point un modèle de vol avec les quelques plongées qu'a pu effectuer l'appareil, et de l'établir le cas échéant. L'objectif du stage est alors d'analyser les données des diverses plongées que le VVP a pu faire en conditions réelles à différents endroits afin de comprendre comment l'appareil a réagi, de constater si des changements doivent être mis au point pour la mise en place du modèle de vol de l'appareil, et de commencer à établir ce modèle de vol.

2 Matériels et Méthodes

2.1 Le Vertical Velocity Profiler (VVP)

2.1.1 Description de l'appareil

Le VVP est un instrument développé au M.I.O. (Institut Méditerranéen d'Océanographie) pour la mesure des vitesses verticales, dont la méthode est issue des gliders (Margirier et al., 2017, Fuda et al., 2013, FrajkaWilliams et al., 2011, Merckelbach et al., 2010). Le principe est simple, la vitesse de l'instrument est mesurée lors de sa remontée libre, puis comparée avec son modèle de vol. Une déviation au modèle est interprétée comme une vitesse verticale océanique. La première utilisation du VVP fut durant la campagne FUMSECK avec son premier prototype. Cependant la forme du prototype n'était pas idéale et sa structure fut changée pour les prototypes suivants. Le dernier prototype de VVP se présente comme sur la *Figure 1*.

Pour sa structure, le VVP possède 3 disques. Le premier de 52 cm de diamètre se situe au dessus de 8 flotteurs, chacun de dimension 150x120 mm avec un trou central de 14 mm, pouvant atteindre une profondeur de 500 m (voir *Figure 2*). Ces flotteurs permettent au VVP d'avoir une capacité de flottaison légère. En dessous de ces flotteurs il y a le second disque, d'un diamètre inférieur au premier, qui sert de soutien aux flotteurs. Ensuite le troisième disque

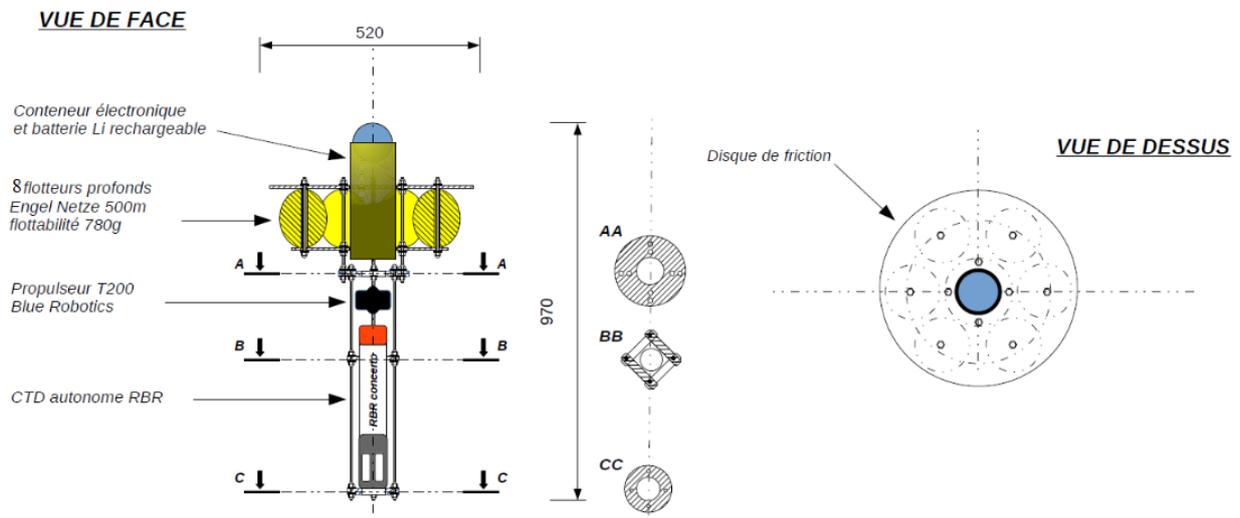


FIGURE 1 – Schéma du VVP. Source : Jean-Luc Fuda

lui va servir de structure pour les quatre tiges filetées en acier inoxydable sur lesquelles sont montées une hélice avec moteur et une sonde CTD (Conductivity, Temperature, Depth, mesure la conductivité, la température et la profondeur). De plus, le VVP possède un largueur à glace avec un lest. Ce type de largage est un nouveau système issu du développement du VVP dont le brevet fut déposé par Jean-Luc Fuda. Ainsi deux méthodes sont possibles pour que le VVP atteigne une profondeur de consigne : l'hélice (plusieurs profils successifs possibles) ou le largueur à glace. Au-dessus du premier disque on retrouve un traqueur SPOT GPS isolé dans un dôme hermétique. Ce traqueur va pouvoir retransmettre la position exacte de l'appareil en actualisant sa position toutes les 10 min. Ces données peuvent être récupérées par internet via le site findmespot.com ou sur l'application mobile. Dans un cylindre étanche (voir *Figure 3*) situé sous le dôme on retrouve une carte Arduino permettant de contrôler l'hélice, mais aussi un capteur de pression, et un accéléromètre donnant des indications sur les valeurs de "pitch, roll et heading", correspondant aux rotations autour des axes x, y et z dans un repère tel que représenté sur la *Figure 4*. Ces données sont utiles pour savoir si le VVP garde une orientation stable durant sa remontée.



FIGURE 2 – Image d'un flotteur présent sur le VVP.



FIGURE 3 – Image du cylindre central du VVP.

En globalité, le VVP pèse 17,5 kg (+/- 0,5 kg) dans l'air, a une flottaison de 0,119 kg dans l'eau douce et possède une volume estimé d'environ à 17,4 litres (Dufosse, 2021). La surface du plus grand disque est de 0,2124 m².

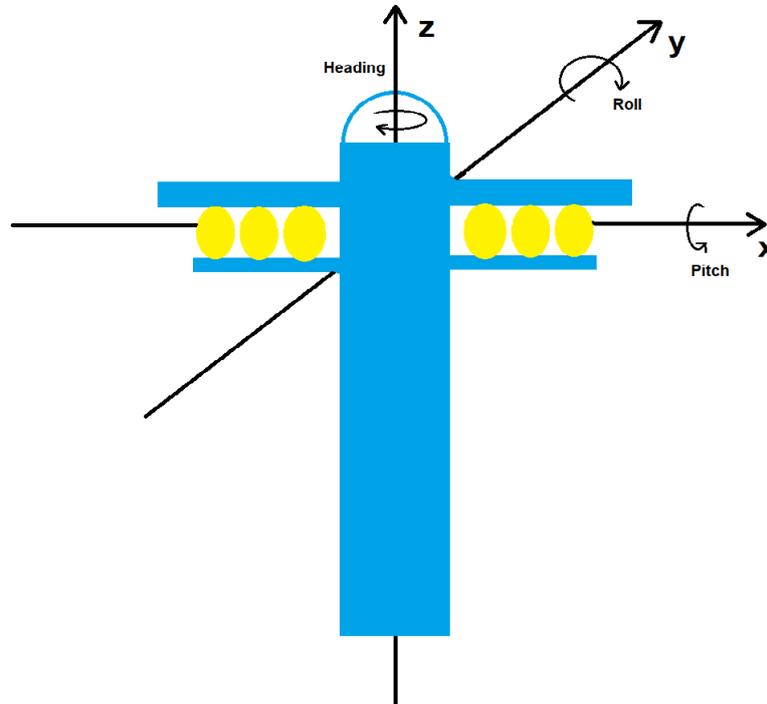


FIGURE 4 – Schématisation des mouvements de "Heading, Pitch et Roll" du VVP

J'ai eu également besoin d'utiliser les formules de volume d'un ellipsoïde et d'un cylindre pour calculer le volume d'un flotteur, dont je me sers dans les résultats :

$$\text{Volume d'un ellipsoïde : } V_{\text{ellipsoïde}} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \frac{h_{\text{ellipsoïde}}}{2} \cdot r_{\text{ellipsoïde}}^2$$

$$\text{Volume d'un cylindre : } V_{\text{cylindre}} = \pi \cdot r_{\text{cylindre}}^2 \cdot h_{\text{cylindre}}$$

avec h = la hauteur ; r = le rayon

On a alors le volume d'un flotteur par :

$$\text{Volume flotteur : } V_{\text{flotteur}} = V_{\text{ellipsoïde}} - V_{\text{cylindre}}$$

Alors, si l'on suppose qu'il y a une variation de la taille des flotteurs sous l'effet de la pression, et connaissant le nouveau volume du flotteur il est possible de calculer le nouveau rayon de l'ellipsoïde, en considérant que le cylindre central est constant car rempli d'une tige en acier, par l'équation suivante :

$$r_{\text{ellipsoïde}} = \sqrt{\frac{V_{\text{flotteur}} + V_{\text{cylindre}}}{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \frac{h_{\text{ellipsoïde}}}{2}}} \quad (1)$$

2.1.2 Fonctionnement de l'appareil

Les mesures faites avec le VVP se déroulent en station, c'est à dire avec le bateau à l'arrêt. Le VVP va pouvoir réaliser ses profils de 2 manières différentes, soit via un lest qui sera largué au bout d'un certain temps pour laisser le VVP remonter par lui-même, ou par utilisation de l'hélice jusqu'à une profondeur de consigne. L'utilisation du lest nécessite une remontée du VVP sur le bateau après chaque profil alors que l'utilisation de l'hélice permet une certaine autonomie de l'appareil avec plusieurs profils successifs, et qui donnera sa position à chaque remontée via le SPOT GPS. La mesure de la vitesse verticale des courants se fait à l'ascension du VVP dans la colonne d'eau, car la remontée est libre et est seulement altérée par les courants océaniques, tel que décrit dans la *Figure 5*.

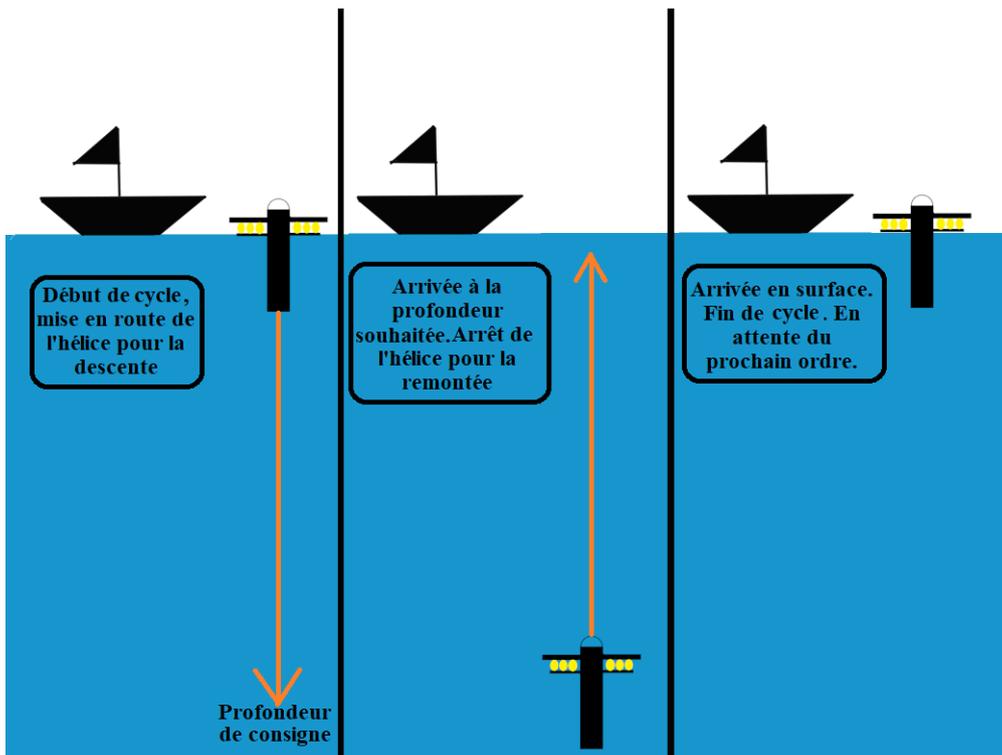


FIGURE 5 – Infographie simplifiée du fonctionnement du VVP.

La mesure verticale de la vitesse des courants océaniques s'effectue sur le même principe que pour les gliders, c'est-à-dire sur une remontée dont la vitesse théorique dépend seulement des caractéristiques physiques propres à l'appareil (volume, poids, coefficient de traînée) et de la densité de l'eau. Alors, la mesure de la vitesse verticale océanique s'effectue via l'écart entre la vitesse du VVP mesurée et la vitesse prédite par un modèle de vol basé sur le poids, la traînée

hydrodynamique et la poussée d'Archimède qui s'applique sur l'appareil, voir *Figure 6*.

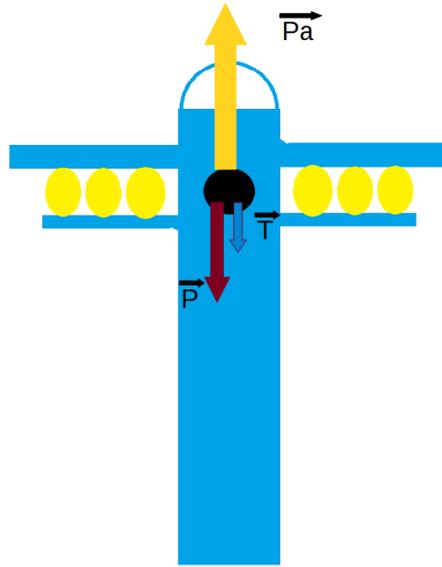


FIGURE 6 – Schéma de l'application des forces sur le VVP

-La poussée d'Archimède (\vec{Pa}) :

$$\vec{Pa} = \rho_{eau} \cdot V \cdot (-\vec{g}) \quad (2)$$

ρ_{eau} : Masse volumique de l'eau ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), mesurée via la CTD.

V : Volume du VVP.

\vec{g} : constante de pesanteur = 9,81 (négatif, car c'est une force opposée au sens de l'accélération de la gravité).

-La force de traînée (\vec{T}) :

$$\vec{T} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{eau} \cdot S \cdot Cd \cdot w_{th}^2 \cdot (-\vec{k}) \quad (3)$$

S : Surface parallèle à la remontée (1^{er} disque) = ΠR^2 (m^2)

Cd : Coefficient de traînée.

w_{th} : Vitesse verticale théorique ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

\vec{k} : Vecteur unitaire vertical orienté vers le haut

-Le poids (\vec{P}) :

$$\vec{P} = m_{VVP} \cdot \vec{g} \quad (4)$$

m_{VVP} : masse du VVP (kg)

Le bilan des forces est donnée par le principe fondamental de la dynamique :

$$\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

Dans le cas du VVP, on considère en première approximation une vitesse de remontée constante soit un bilan des forces nul ($\sum \vec{F} = 0$). Ainsi il est possible de calculer la vitesse théorique de l'appareil (modèle de vol) par :

$$\Leftrightarrow |\vec{P}a| = |\vec{P}| + |\vec{T}|$$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{2}\rho_{eau} \cdot S \cdot Cd \cdot w_{th}^2 = |\vec{P}a| - |\vec{P}|$$

$$w_{th} = \sqrt{\frac{2(|\vec{P}a| - |\vec{P}|)}{\rho_{eau} \cdot Cd \cdot S}} \quad (5)$$

La vitesse verticale du VVP est calculée avec la pression mesurée par la CTD. En effet, dans l'approximation hydrostatique, l'équilibre hydrostatique est défini par :

$$\frac{dp}{dz} = \rho \cdot g$$

avec :

p = la pression ; z = la profondeur ; ρ = la masse volumique du système ; g = la pesanteur

On peut alors en tirer, en faisant l'hypothèse de l'absence de pression dynamique :

$$p_{CTD} = \rho \cdot g \cdot z \text{ et } w_{VVP} = \frac{\Delta z}{\Delta t}$$

Il sera alors possible d'interpréter l'écart entre w_{th} et w_{VVP} comme une vitesse verticale océanique qui se manifestera par un changement dans la vitesse verticale de remontée du VVP, négatif ou positif suivant une accélération ou un ralentissement.

Pour ce qui est de la sonde CTD, celle installée sur le VVP est une sonde Concerto RBR. Elle mesure 50 cm de long pour un poids d'environ 200g dans l'eau. Elle fonctionne sur piles alcalines ou au lithium, résiste à une profondeur de 750 m, et a une fréquence d'échantillonnage de 2 Hz c'est à dire 2 mesures par seconde.

2.2 Sortie en Mer

Les données du VVP traitées durant ce stage ont été collectées lors de la campagne VVPTest en Septembre 2021, sur l'Antédon. Ces manipulations avaient pour but de voir le comportement du VVP en conditions réelles en mer peu profonde. Également, il m'a été permis de participer à une sortie en Mer sur l'Astroïdes qui s'est déroulée de la même manière.

2.2.1 Manipulation

Les différentes sorties en mer du VVP se sont faites sur l'Antédon, qui est un navire d'Océanologie côtier aux missions multiples, et sur l'Astroïdes (voir *Figure 7*), bateau du CNRS faisant 9 mètres de longueur. L'astroïdes est utilisé par le M.I.O. pour diverses missions comprenant des missions de plongée et pour la mise à l'eau d'équipement scientifique.



FIGURE 7 – Photographie de l'Astroïdes lors de la sortie du 4 avril 2022. Source Léa Criado



FIGURE 8 – Photographie d'un exemple de ballast (poids qui peut être installé sur le VVP). Ici un disque de 450g dans l'eau et des plombs de 32g dans l'eau chacun.

Avant toute chose, il est important de vérifier la flottabilité de l'appareil. En effet, la flottabilité doit être très légère, pour permettre une remontée lente et ainsi une résolution de mesure suffisante pour la mesure des vitesses verticales océaniques. La vitesse idéale de remontée du VVP est de 10cm/s. Si la flottabilité est trop élevée alors du lest supplémentaire est ajouté à l'appareil, tel que des disques ou des poids de plombs, voir *Figure 8*, au contraire si le VVP ne remonte pas, les poids mis préalablement sont retirés.

Avant la mise à l'eau de l'instrument, il est important d'allumer la CTD, pour l'acquisition des données, et le SPOT GPS, pour pouvoir retrouver le VVP en cas de problème, et éventuellement si la méthode du largueur à glace/lest est utilisée vérifier que le lest soit bien présent. Puis seulement après ces vérifications le VVP peut être mis à l'eau (voir *Figure 9*).

Également, il est indispensable de prendre note des caractéristiques des divers changements apportés au VVP pour les différentes séries de plongées, c'est-à-dire les poids ajoutés ou tout type de modification qui peut être faite, telle que des ailettes ou autre. Une fois la mise à l'eau effectuée, il est important de prendre en note les coordonnées exactes, l'heure précise, l'état de la mer, les conditions météorologiques (vent, pluie, etc) et le numéro de plongée. Puis à chaque remontée, noter l'heure de remontée et tout autre paramètre pouvant être utile. Le logbook se doit d'être bien tenu pour que toute l'équipe du projet possède les mêmes informations précises sur toutes les conditions de la sortie. Il m'a été donné la responsabilité de tenir en note le logbook durant la sortie du 4 avril 2022.



FIGURE 9 – Photographie de mise à l'eau du VVP lors de la sortie du 4 avril 2022. Source : Léa Criado

Lorsque toutes les plongées programmées pour la sortie sont réalisées, le VVP est remis sur le bateau. Au retour de la sortie tout l'équipement utilisé est rincé à l'eau douce et les données de la CTD seront récupérées au laboratoire.

Les données utilisées lors de ce stage proviennent de 3 stations différentes et à des profondeurs différentes également. En effet, des données ont été prélevées dans la Rade de Marseille à 20 mètres de profondeur, puis vers le canyon de Cassidaigne à une profondeur de 80 mètres et enfin à la station dite JULIO (Judicious Location for Intrusion Observation), station qui depuis 2020 se situe aux coordonnées $5,235^{\circ}$ E - $43,142^{\circ}$ N (<https://people.mio.osupytheas.fr/petrenko/julio.htm>) et où les relevés ont pu être faits jusqu'à une profondeur de 80 mètres.

2.3 Traitement des données

Afin de traiter les différentes données CTD à disposition pour essayer de mettre en place un modèle de vol pour le VVP, la méthode utilisée fut une méthode algorithmique sous python. Un code python pré-existant, ayant servi au traitement des données d'autres tests VVP, a été choisi comme base algorithmique dans ce stage. Dans un premier temps il eut fallu découper les données CTD brutes (voir Annexe I) pour séparer chaque plongée distinctement afin de les traiter séparément.

Une fois chaque plongée séparée correctement, j'ai alors calculé le coefficient de traînée, dans les hypothèses choisies, pour chaque remontée. Ceci va permettre d'obtenir un coefficient moyen pour chaque site et d'évaluer si le VVP a subi différentes perturbations ou non grâce aux différentes données et graphiques obtenus suite au traitement informatique.

En effet, le coefficient de traînée du VVP étant inconnu au départ il faut le déterminer. Pour cela nous avons fait l'hypothèse que la vitesse théorique du modèle correspond en première approximation à w_{VVP}^{moyen} et que le volume de l'appareil reste constant au cours de ses profils. Ainsi :

$$w_{VVP}^{moyen} = \sqrt{\frac{2(|\vec{P}_a| - |\vec{P}|)}{\rho_{eau} \cdot Cd \cdot S}}$$

et

$$Cd = \frac{2(|\vec{P}_a| - |\vec{P}|)}{w_{VVP}^{moyen^2} \cdot \rho_{eau} \cdot S} \quad (6)$$

Une fois un Cd moyen de l'appareil obtenu avec l'hypothèse d'un volume constant estimé à 17,4 L (Dufosse, 2021), il nous est alors possible dans un second temps d'affiner le calcul en estimant une potentielle différence de volume entre la profondeur d'étude choisie et la surface, en repartant de la seconde loi de Newton, mais cette fois sans l'approximer comme nulle :

$$\vec{P} + \vec{P}_a + \vec{T} = m \cdot \vec{a}$$

$$\Leftrightarrow m_{VVP} \cdot g - \rho_{eau} \cdot V_{VVP} \cdot g + \frac{1}{2} \cdot \rho_{eau} \cdot S \cdot Cd \cdot w_{th}^2 = m_{VVP} \cdot a$$

avec $a = \frac{dw_{VVP}}{dt}$ (positif vers le bas)

$$V_{VVP} = \frac{m_{VVP} \cdot \frac{dw_{VVP}}{dt} - m_{VVP} \cdot g - \frac{1}{2} \cdot \rho_{eau} \cdot S \cdot Cd \cdot w_{th}^2}{-\rho_{eau} \cdot g} \quad (7)$$

Cela nous permettra d'estimer si l'appareil subit une différence de volume durant son profil. En effet, nous avons observé lors des précédentes études une accélération du VVP dans sa remontée, qui pourrait être expliquée par la présence de bulles d'air coincées dans la structure ou une compressibilité de l'instrument. La pente (dw_{VVP}/dt) est estimée par une régression linéaire des données, grâce à la fonction "linalg.lstsq" du module numpy de python, des vitesses en fonction du temps (voir *Figure 10*). J'ai également effectué une régression linéaire des vitesses en fonction de la profondeur. Ces régressions permettent d'évaluer les variations moyennes de vitesses en fonction de ces paramètres. Une fois les équations de droites déterminées, il est ainsi possible de déterminer une profondeur théorique dite de "non retour" : dans l'hypothèse où des bulles d'air sont coincées dans la structure ou en cas de compressibilité de l'instrument, si le VVP atteignait cette profondeur il ne pourrait plus remonter car il n'aurait plus de flottabilité. Pour cela on reprend l'équation de la droite pour le pire des cas (pente la plus importante) et on cherche où elle serait égale à zéro :

Équation de droite : $w_{VVP} = az + b$ avec z la profondeur

Profondeur théorique de non-retour : $az + b = 0$

$$z = \frac{-b}{a} \quad (8)$$

De plus, cela permet de calculer le volume de l'appareil à différentes profondeurs, et de constater d'éventuelles différences de volume de l'instrument, pouvant provenir de bulles d'air coincées ou d'une compression du matériel.

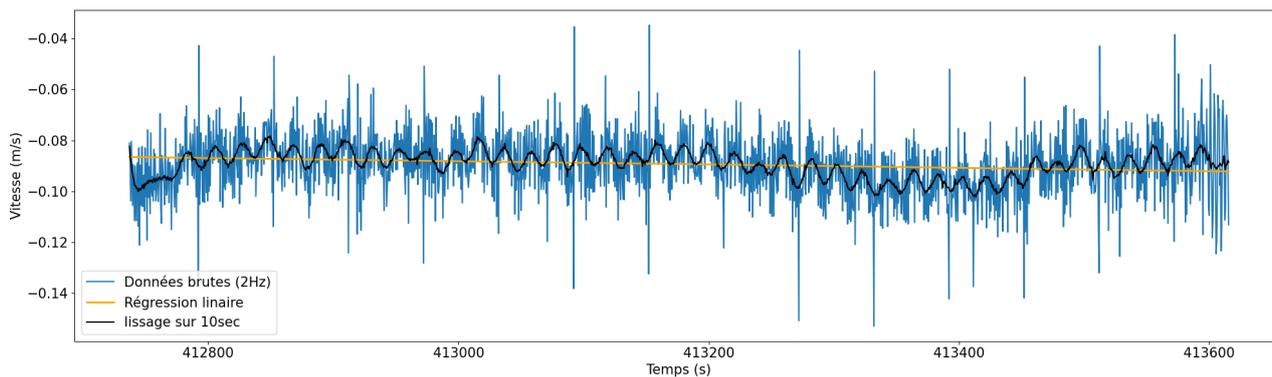


FIGURE 10 – Vitesse en fonction du temps avec un lissage sur 10 secondes du profil 2 de la station JULIO.

3 Résultats

3.1 Sortie en Mer

Les résultats sont issus des différents profils, que le VVP a effectués durant les plongées de septembre 2021, suite à leur traitement informatique fait durant ce stage.

3.1.1 Rade

La *Figure 11* représente la profondeur du VVP en fonction de sa vitesse lissée sur 10 secondes sur les profils qui ont été réalisés dans la rade de Marseille, tandis que la *Figure 12* montre la régression linéaire de ces mêmes courbes. Les remontées 9 et 14 ont volontairement été omises, car trop peu profondes. La vitesse est négative en remontée, l'axe des profondeurs est positif vers le bas.

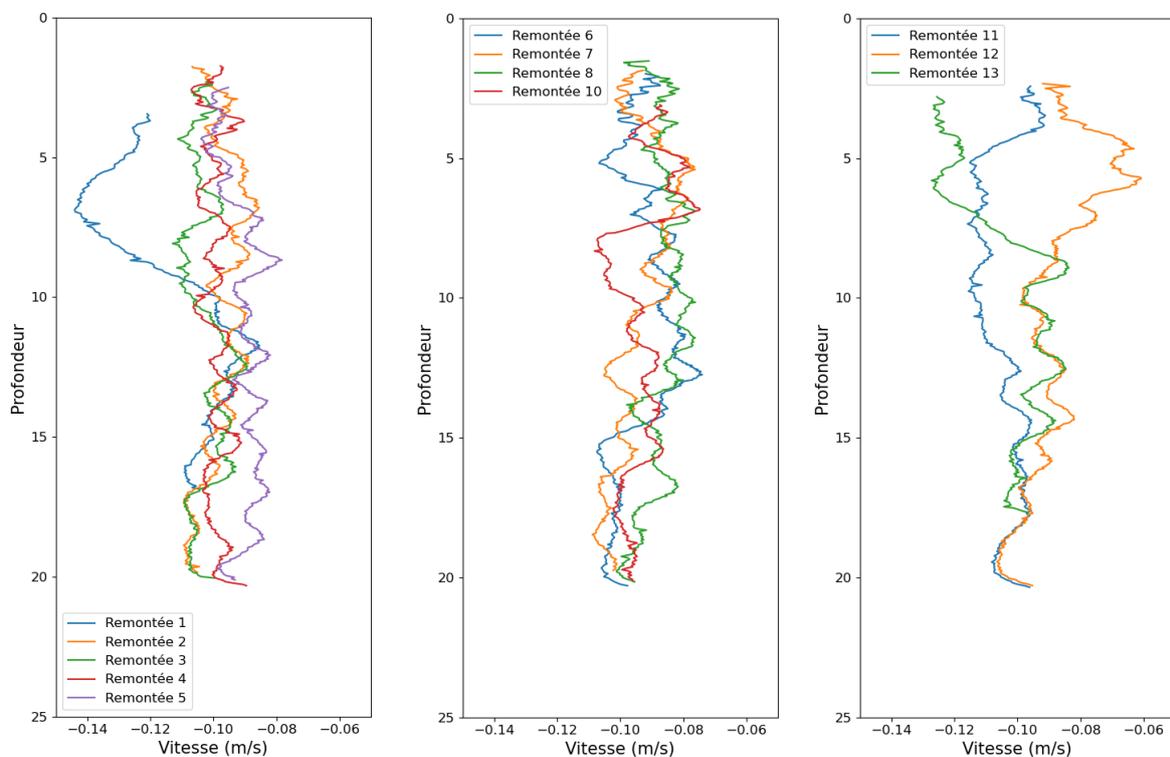


FIGURE 11 – Courbe de lissage sur 10 secondes des vitesses de remontée de la Rade de Marseille. À gauche les remontées de 1 à 5, au centre 6,7,8 et 10 et à droite les remontées 11, 12 et 13.

On peut constater qu'en majorité les différents profils montrent une vitesse de remontée d'environ $-0,1$ m/s (10 cm/s), entre 20 et 10 mètres de profondeur. À partir de ces 10 mètres de profondeur une forte variabilité est visible, amenant les vitesses à s'étendre de $-0,14$ et $-0,06$ m/s dans la globalité. En effet les conditions météorologiques et de mer étaient très agitées pendant ces mesures (vent fort et houle), et leur influence est nettement visible dans les 10 premiers mètres. Les oscillations régulières observées sur tous les profils correspondent à un

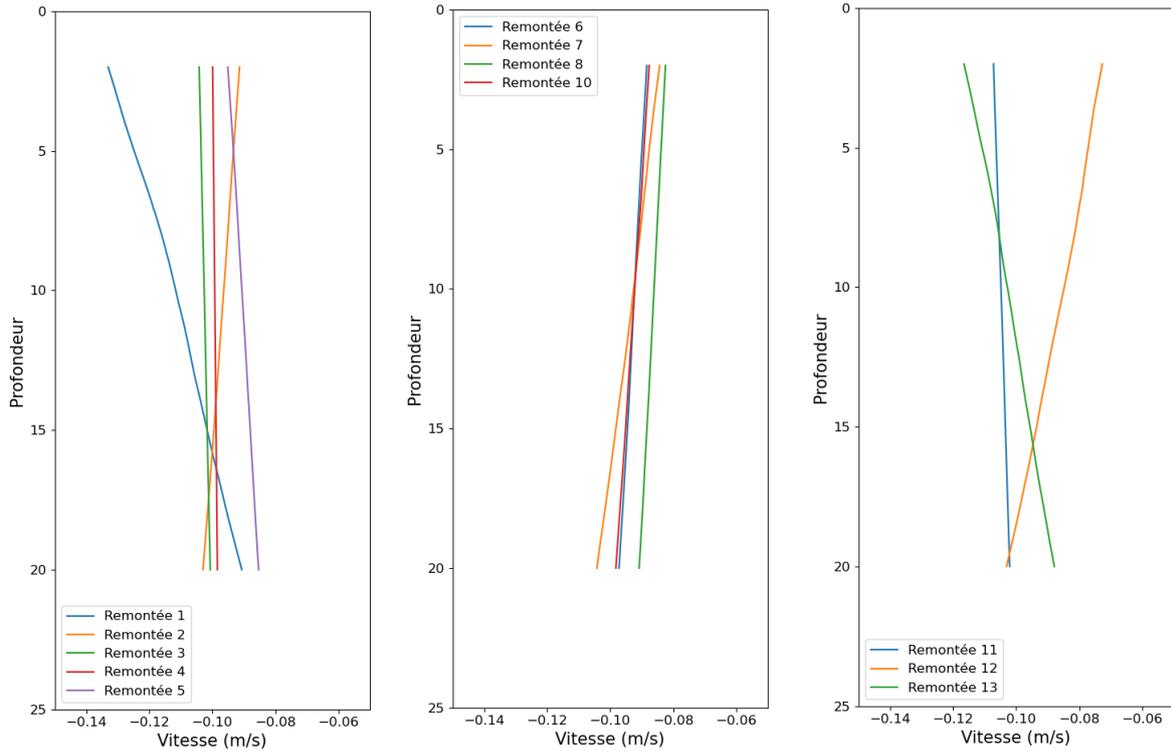


FIGURE 12 – Courbe de régression des remontées de la Rade de Marseille. À gauche les remontées de 1 à 5, au centre 6,7,8 et 10 et à droite les remontées 11, 12 et 13.

effet de sillage dû au disque du VVP, actuellement à l'étude (Dufosse, 2021 et par Léa Criado dans son stage). La variabilité des profils se constate aussi sur le *Figure 12* où il est facile de voir de grandes différences entre les droites de régressions, avec des pentes négatives et positives dont l'inclinaison varie fortement.

3.1.2 JULIO (Judicious Location for Intrusion Observation)

La *Figure 13* représente la profondeur du VVP en fonction de sa vitesse pour les 5 profils qui ont été réalisés au site JULIO, et la *Figure 14* représente les régressions linéaires des vitesses pour chaque remontée. On observe sur ces données une variabilité bien moins importante entre les différents profils, en comparaison avec les profils de la Rade.

La tendance qui se démarque majoritairement des remontées est une vitesse du VVP légèrement plus faible que les 10 cm/s voulu. En effet, si l'on regarde la *Table 1*, où l'on retrouve les vitesses moyennes et les pentes de vitesses des profils de la station JULIO, on constate que la majorité des profils sont en dessous de 10 cm/s.

La vitesse moyenne calculée sur les 5 profils atteint 8,9 cm/s. On constate que les remontées n°3 et 5 prennent une forme particulière, avec de larges déviations par rapport à une vitesse constante, qui peut être due à la captation d'une onde interne lors de la plongée du VVP.

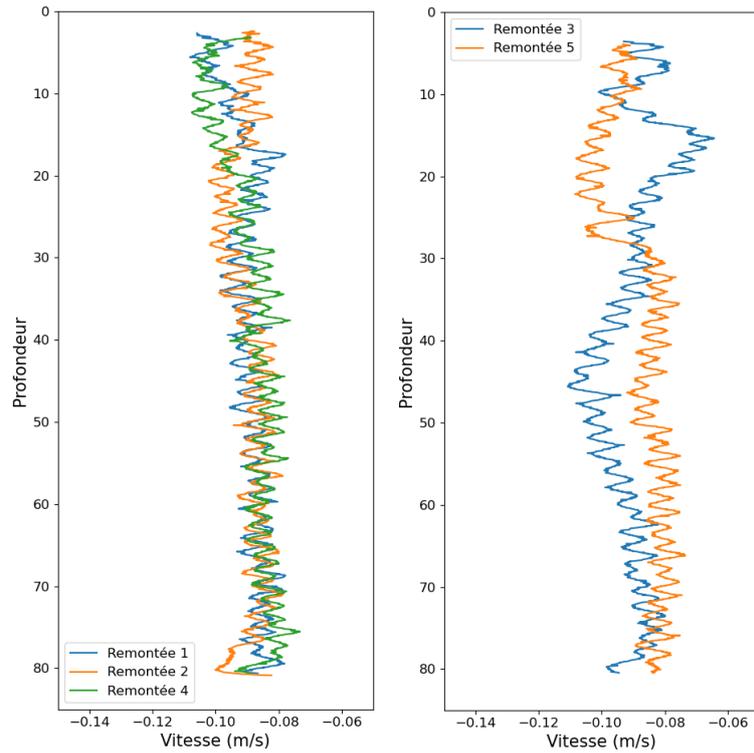


FIGURE 13 – Courbe de lissage sur 10 secondes des remontées de la station JULIO. À gauche les remontées de 1,2 et 4 sans signal et droite les remontées 3 et 5 avec signal probable.

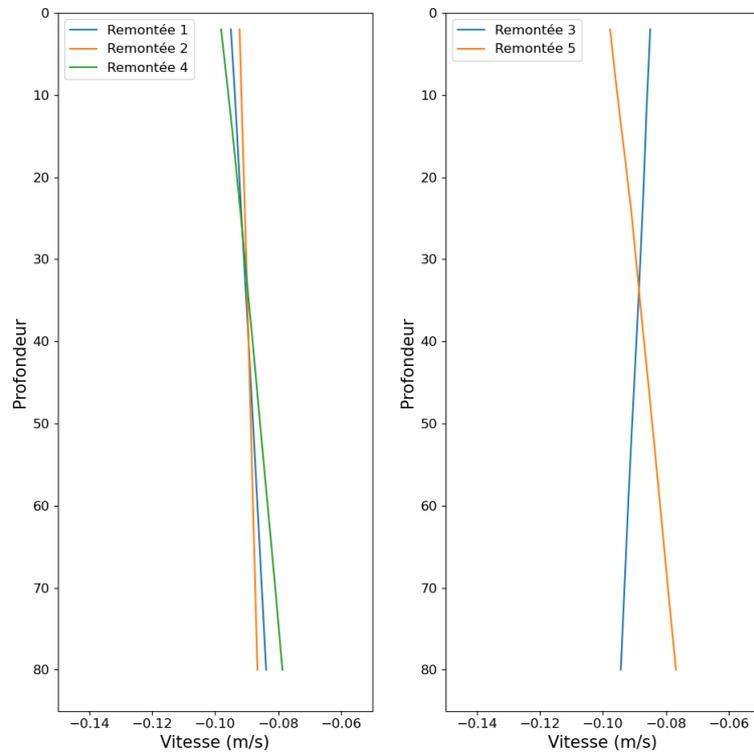


FIGURE 14 – Courbe de régression des remontées de la station JULIO. À gauche les remontées de 1,2 et 4 sans signal et droite les remontées 3 et 5 avec signal probable.

N°remontée	Vitesse moyenne (cm/s)	Pente
N°1	-8,9	1,46E-4
N°2	-8,9	7,22E-5
N°3	-8,9	-1,2E-4
N°4	-8,8	2,5E-4
N°5	-8,9	2,7E-4

TABLE 1 – Tableau des vitesses moyennes de remontée, et des pentes des droites de lissage des vitesses en fonction de la profondeur au site JULIO.

Pour la profondeur théorique de non-retour à JULIO, le choix est porté sur la remontée n°5, car elle a la pente la plus élevée, alors via l'équation 8 :

$$x = \frac{0,0989}{0,00027} = 366,3m$$

Heureusement, le VVP actuel a pour profondeur de fonctionnement un maximum de 200 mètres, ce qui est alors bien inférieur à cette profondeur de non-retour.

3.1.3 Cassidaigne

Les figures suivantes correspondent au site du canyon de Cassidaigne où il a été possible de réaliser 3 profils de 80 mètres avec le VVP. Il est possible d'observer sur les *Figures 15* que les 3 profils sont très similaires pour la vitesse du VVP en fonction de la profondeur.

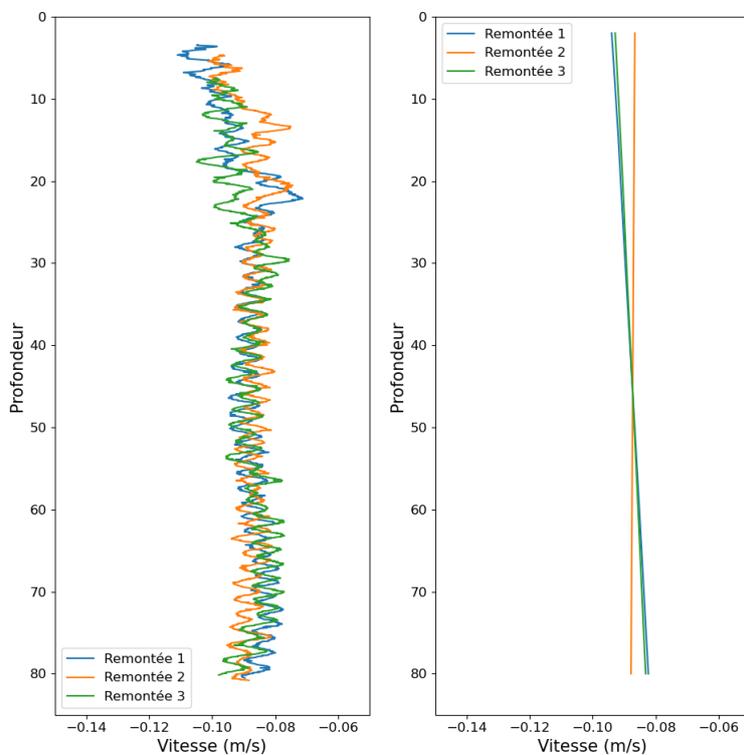


FIGURE 15 – Courbe de lissage et de régressions des remontées de la station Cassidaigne. À gauche les courbes de lissage sur 10 secondes et à droite les courbes de régressions.

N°remontée	Vitesse moyenne (cm/s)	Pente
N°1	-8,8	1,51E-4
N°2	-8,7	-1,6E-5
N°3	-8,8	1,3E-4

TABLE 2 – Tableau des vitesses moyennes de remontée, et des pentes des droites de régression des vitesses en fonction de la profondeur au canyon de Cassidaigne.

Si l'on se réfère à la *Table 2*, la moyenne des vitesses du VVP de 80 mètres à la surface, sur les 3 profils, très ressemblants entre eux, est d'environ 8.8 cm/s.

Pour la profondeur théorique de non-retour au canyon de Cassidaigne, la remontée critique est la n°1, alors via l'équation 8 :

$$x = \frac{0,0945}{0,000151} = 654,97m$$

Cette profondeur étant plus élevée que celle de JULIO on considère celle de la station JULIO (pire cas).

3.2 Coefficient de Traînée

Les coefficients de traînée ont été calculés grâce à l'équation 6 pour toutes les plongées et ainsi résumés dans la *Table 3*. Lorsque l'on regarde ces coefficients de traînée on constate que les coefficients moyens du site JULIO et de Cassidaigne sont relativement proches avec peu de variabilité, avec une différence maximale de 0,088. Les coefficients de traînée sont encore plus stables si l'on se concentre sur Cassidaigne avec une différence maximale de 0,026. Cependant les coefficients de traînée obtenus pour la Rade montrent une forte variabilité, à l'instar des vitesses. Ainsi, la différence maximale est de 1,812 ou de 0,567 si l'on exclut la plongée N°9 qui était très courte et semble être une exception, ce qui reste environ 6,5 fois l'amplitude des coefficients de traînée de JULIO.

La *Figure 16* montre l'histogramme des coefficients de traînée pour les 8 profils des stations JULIO et Cassidaigne, la moyenne est de 1,411 avec un écart-type assez faible de 0,031, 2 des profils à 1,42.

En conclusion, nous allons prendre comme coefficient de traînée pour le VVP le coefficient trouvé à Cassidaigne, car certaines plongées de JULIO possèdent un signal qui peut possiblement modifier ce coefficient pour les plongées correspondantes et donc modifier la moyenne. Le coefficient de traînée utilisé alors par la suite sera de 1,429.

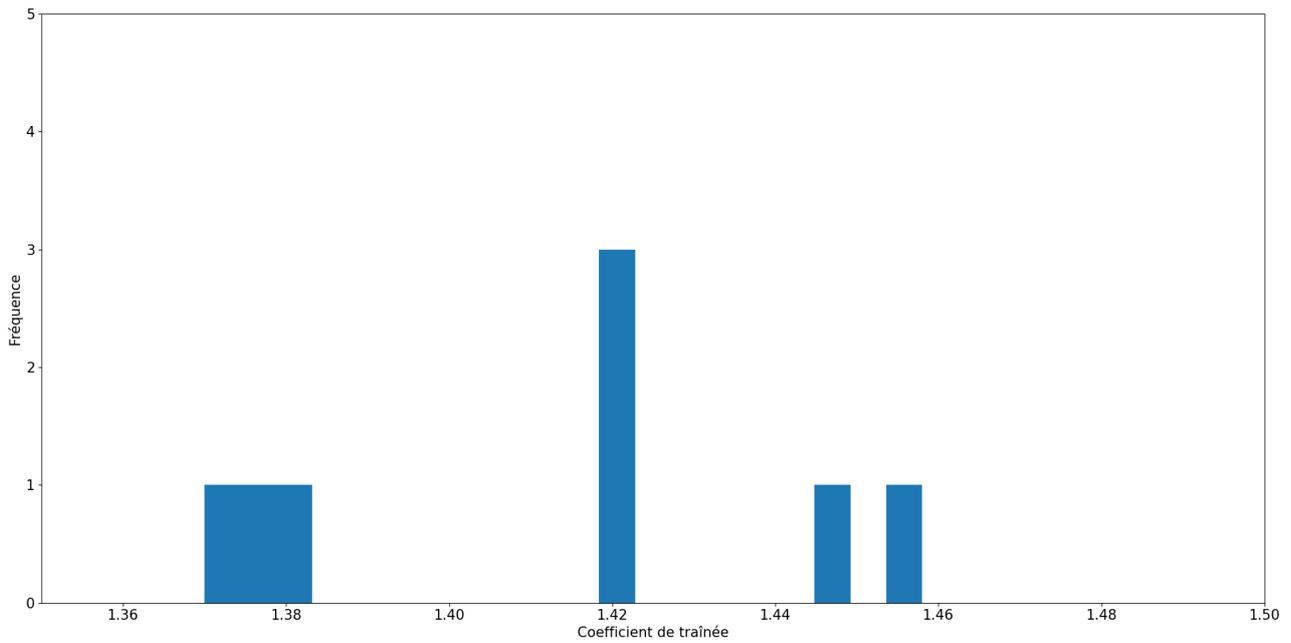


FIGURE 16 – Histogramme des Coefficients de Traînée des stations JULIO et Cassidaigne. Moyenne de 1,41125 et écart-type = 0,0306

N°Remontée	Station		
	Rade	JULIO	Cassidaigne
N°1	0,9	1,379	1,419
N°2	1,167	1,377	1,445
N°3	1,04	1,37	1,422
N°4	1,118	1,42	
N°5	1,354	1,458	
N°6	1,279		
N°7	1,247		
N°8	1,467		
N°9	2,712		
N°10	1,277		
N°11	1,006		
N°12	1,454		
N°13	1,066		
N°14	1,435		
Moyenne	1,323	1,401	1,429

TABLE 3 – Tableau des différents coefficients de traînée, calculés grâce à l'équation 6, de chaque profil sur les 3 stations, Rade, JULIO et Cassidaigne.

3.3 Variation de Volume

Dans cette partie, on omettra volontairement les données venant de la Rade de Marseille, car trop instables pour en extraire des mesures significatives.

Grâce à l'équation 7, il est possible de mesurer le volume du VVP à différentes profondeurs en reprenant les pentes dw/dt calculées grâce aux vitesses, et les caractéristiques globales du

VVP, tout en prenant en compte le coefficient de traînée moyen obtenu précédemment, et en remplaçant w_{th} par la vitesse mesurée à la profondeur considérée. On peut ainsi obtenir les différences de volume de la *Table 4*, entre 80 et 5 mètres de profondeur.

N°Remontée	Station	
	JULIO	Cassidaigne
N°1	2,96	3,05
N°2	1,5	-3,17
N°3	-2,63	2,58
N°4	5,01	
N°5	5,39	
Moyenne	2,45	1,77

TABLE 4 – Tableau des différences de volume (en cl) entre 80 et 5 mètres, volume calculé grâce à l'équation 7, aux stations JULIO et Cassidaigne.

Dans la *Table 4* il y a des volumes négatifs. Cela est dû à l'orientation de la pente qui est elle-même négative ce qui inverse alors le signe de la variation de volume. Malgré cela, nous prenons quand même la moyenne générale en première estimation. Alors, en prenant cette moyenne générale pour connaître le volume différentiel moyen entre 80 et 5 mètres de fond sur le VVP, on trouve 1,836 centilitres.

Deux hypothèses sont établies pour comprendre la différence de volume : la première est que cette différence est due à la compressibilité des flotteurs uniquement, la deuxième qu'elle est due uniquement à la présence de bulles d'air coincées dans l'instrument.

Dans le cadre de la première hypothèse, on calcule tout d'abord le volume d'un flotteur par les équations de volumes de la partie 2.1.1 en reprenant les dimensions d'un flotteur :

$$V_{ellipsoïde} = 1,131 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$V_{cylindre} = 2,31 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

alors :

$$V_{flotteur} = 1,11 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

Ainsi d'après l'équation 1 après une diminution de 1,836 cl au total, soit 0,2295 cl par flotteur, on obtient un rayon d'ellipsoïde de :

$$r_{ellipsoïde} = 0,059995 \text{ m} = 59,995 \text{ mm}$$

Ce qui équivaut à une différence, entre 5 mètres et 80 mètres, de 0,005 millimètres de rayon sur chaque flotteur avec en surface un rayon de 60 mm et donc à 80 m un rayon de 59,995 mm

(en supposant que la différence entre la surface et 5 m est négligeable), ce qui est tout-à-fait probable.

Dans le cadre de la deuxième hypothèse, d'après la loi de Boyle-Mariotte, on peut en déduire, avec les données CTD de la pression en dbar, que :

$$V_{80m} = \frac{P_{5m} \cdot \Delta V}{P_{80m} - P_{5m}}$$

$$V_{80m} = \frac{15,066 \cdot 1,836}{90,66 - 15,066} = 0,366cl$$

On peut alors en déduire le volume coincé en surface où la pression est d'environ 10 dbar :

$$V_0 = \frac{90,66 \cdot 0,366}{10} = 3,318cl$$

Il y aurait donc environ 3,318 cl d'air coincé sur le VVP en surface.

4 Discussion

4.1 Impact de la structure du VVP sur le volume

Le VVP, actuellement, ne possède qu'une estimation imprécise de son volume. La mesure précise sera effectuée très prochainement grâce à une cuve permettant d'immerger complètement le VVP et la mesure de son poids dans l'eau à l'aide de pesons précis. Comme il a pu être montré, il existe possiblement une différence de volume entre le VVP en surface et le VVP en profondeur, qui expliquerait les accélérations lors de la remontée du VVP, observées par les analyses antérieures. Nous avons exploré cette piste, et la petite différence de volume que nous avons estimée peut s'expliquer par une compressibilité des flotteurs et probablement quelques bulles d'air coincées dans le système. Cependant, un problème se pose, car si l'on regarde la *Table 4* on constate d'une part une variabilité de ces différences de volume, d'autre part qu'il peut y avoir des changements négatifs dans le volume, ce qui est étrange car il est difficile d'imaginer une prise de volume lors de la descente et une perte durant la montée. Cette anomalie dans les résultats apparaît dans le cas d'une décélération lors de la remontée. Celle-ci peut être liée à une influence des derniers mètres avant la surface, qui montrent en général une plus grande variabilité et dépendance à l'état de mer, et qui peuvent avoir une incidence sur le résultat de la régression linéaire.

Lors des plongées, la compression des flotteurs a été testée à l'aide d'un anneau de serrage, fixé autour du diamètre d'un flotteur. Les tests ont montré que l'anneau de serrage ne bougeait pas, mais pour une diminution de seulement 0,010 mm de diamètre, ce n'est pas impossible que l'anneau ne puisse simplement pas se défaire pour une compression si minime. Il faudrait

tester cette compressibilité des flotteurs avec un outil de plus grande précision pour voir si il y a en définitive une compression des flotteurs, impactant ainsi le volume globale du VVP.

Également une autre piste est à étudier. En effet, la structure du VVP peut dans une certaine mesure faire de la rétention d'air. À l'origine, le VVP captait beaucoup d'air sous le disque principal, ce problème fut majoritairement réglé par l'ajout de trous d'évacuation dans le disque pour évacuer l'air vers la surface et l'empêcher de rester emprisonné. Cependant, des bulles peuvent éventuellement rester encore sous les disques mais d'autres endroits de la structure sont à observer car susceptibles de garder de l'air. En effet, par exemple les tiges en métal inoxydable qui servent de fixations entre les différents modules du VVP sont filetées et peuvent, par conséquent, retenir de l'air par capillarité. Aussi, les bouchons non-étanches peuvent contenir une petite quantité d'air difficile à détecter.

Pour palier à ces potentiels problèmes de changements de volumes, il faudrait d'abord mesurer le volume du VVP avec précision dans une cuve, puis faire différents tests, comme pour les flotteurs, afin de voir si des changements sont opérés, positivement ou négativement et ainsi faire évoluer la structure du VVP pour réduire ces variations au maximum.

4.2 Mise en place d'un modèle de Vol

La mise en place d'un modèle théorique de vol précis pour le VVP est actuellement complexe. En effet, le nombre de plongées stables permettant d'obtenir des données cohérentes entre elles est assez faible et ne permet pas de faire une analyse statistique assez poussée pour prévoir avec exactitude comment le VVP va remonter une fois arrivé à la profondeur voulue, et ainsi pouvoir déterminer les vitesses verticales océaniques. Il est important que ce modèle soit le plus précis possible car les vitesses des courants verticaux océaniques sont d'un faible ordre de grandeur, allant du mm/s jusqu'au cm/s. Alors, si ce modèle n'est pas assez précis, les variations entre le modèle et les mesures seront difficilement distinguables. C'est pour cela qu'il faut plus de données pour pouvoir mettre en place un modèle de vol performant pour le VVP. En revanche, j'ai pu déterminer des paramètres qui seront important à sa mise en place, tel que le coefficient de traînée spécifique au VVP, une estimation d'une différence de volume du VVP entre le fond et la surface, ce qui peut éventuellement amener une différence dans les vitesses de l'appareil et donc changer les pentes de vitesses. Tous ces paramètres permettront de calibrer le modèle de vol au mieux pour retranscrire une remontée sans perturbation du VVP.

5 Conclusion et Perspective

Les résultats obtenus durant ce stage ont permis une première évaluation des paramètres spécifiques du VVP, tel que le coefficient de traînée et une différence de volume de l'appareil au cours de sa remontée. Ces paramètres vont permettre l'élaboration du modèle de vol du VVP qui devra retranscrire avec la plus grande précision le comportement de l'appareil. Ce stage a également permis de mettre en avant des problèmes affectant la prédictibilité de l'appareil, comme les différences de volumes pouvant être de sources multiples tels que la compression des flotteurs ou encore des bulles d'air coincées et difficiles à extraire.

Les données qui ont été utilisées dans le cadre de ce stage sont parmi les premières plongées du VVP, dans sa version la plus récente, en pleine mer. Les plongées en mer sont sujettes à de nombreux phénomènes océaniques et à la non-prédictibilité des aléas potentiels, tels que des ondes internes comme retrouvées possiblement sur l'un des profils réalisés à la station JULIO. Ce genre de phénomène induisant des vitesses verticales océaniques est l'objet de la mesure avec le VVP, mais pas dans le cas où l'on cherche à établir un modèle de vol. Dans l'idéal, le modèle de vol doit retranscrire des vitesses océaniques nulles ou un environnement contrôlé.

Le VVP est un outil ayant pour vocation d'aider les études océanographiques par la mesure des vitesses verticales, assez peu considérée à l'heure actuelle, mais qui prend une importance de plus en plus grande dans la quête de précision et de finesse d'étude. Les futures expériences en mer du M.I.O., comme la campagne PROTEVS-Gibraltar prévue en 2022, puis pour la campagne BioSWOT-Med prévue en 2023, vont permettre le déploiement du VVP et d'obtenir plus de données qui pourront permettre la mise en place d'un modèle de vol de précision. Sur le long terme l'objectif serait de mettre en place plusieurs appareils type VVP qui travailleront de concert pour permettre une analyse plus élargie et plus précise sur une zone plus étendue.

De manière personnelle, ce stage m'a apporté une vision plus précise du monde de la recherche et du travail concret qu'il y a derrière les découvertes scientifiques. Je n'ai que des bases en informatique mais pourtant ma responsable de stage Stéphanie Barrillon m'a encouragé à la réflexion sur la manière d'atteindre mes objectifs avec les outils informatiques utilisés et ce fut très enrichissant pour moi.

Mon choix d'orientation de ma licence fut l'océanographie physique et avoir un stage permettant de mettre en pratique directement mon enseignement et mes réflexions me conforte dans l'idée que c'était le meilleur choix à faire dans cette licence pour moi.

Références

Capet, X., McWilliams, J. C., Molemaker, M. J. and A.F. Shchepetkin. 2008. Mesoscale to Submesoscale Transition in the California Current System. *Journal of Physical Oceanography*, 38. Part 1 : 29–43, Part 2 : 44–64, Part 3 : 2256–2269.

Dickey, T. D. 2003. Emerging ocean observations for interdisciplinary data assimilation systems. *Journal of Marine Systems*, 40, 5–48.

Ferrari, R. and C. Wunsch. 2009. Ocean circulation kinetic energy : Reservoirs, sources, and sinks. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 41, 253–282.

Fiekas, V., Leach, H., Mirbach, K. and J. Woods. 1994. Mesoscale instability and upwelling. Part 1 : Observations at the North Atlantic intergyre front. *Journal of Physical Oceanography*, 24, 1750–1758.

FrajkaWilliams E., Eriksen C.C., Rhines P.B, and. Harcourt R.R. Determining vertical water velocities from seaglider. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, (28) :1641-1656, 2011. doi :10.1175/2011JTE-CHO830.1.

Fuda J.L, Marin F., Durand F., and Terre T.. Diagnosing ocean vertical velocities off new caledonia from a spray glider. *Geophysical Research Abstracts*, (Vol. 15), 2013.

Lévy, M., Iovino, D., Resplandy, L., Klein, P., Madec, G., Tréguier, A.-M., Masson, S. and K. Takahashi. 2012. Large-scale impacts of submesoscale dynamics on phytoplankton : Local and remote effects. *Ocean Modelling*, 43, 77–93.

Mahadevan, A. 2016. The impact of submesoscale physics on primary productivity of plankton. *Annual review of marine science*, 8, 161–184.

Margirier F., Bosse A., Testor P., L'Hévéder B., Mortier L., and. Smeed D. Characterization of convective plumes associated with oceanic deep convection in the northwestern mediterranean from high-resolution in situ data collected by gliders. *Journal of Geophysical Research : Oceans*, (122) :9814-9826, 2017. doi : 10.1002/2016JC012633.

Martin, A.P., Richards, K.J. and M.J. Fasham. 2001. Phytoplankton production and community structure in an unstable frontal region. *Journal of Marine Systems*, 28, 65–89..

McGillicuddy, D.J. 2016. Mechanisms of Physical-Biological-Biogeochemical Interaction at

the Oceanic Mesoscale. *Annual Review of Marine Science*, 8, 125–159.

McWilliams, J.C. 2016. Submesoscale currents in the ocean. *Proceedings of the Royal Society A*, 472.

Merckelbach L., Smeed David, and Gwyn Griths. Vertical water velocities from underwater gliders. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, (27(3)) :547-563, 2010.

Rousselet, L., Doglioli, A.M., de Verneil, A., Pietri, A., Della Penna, A., Berline, L., Marrec, P., Gregori, G., Thyssen, M., Carlotti, F., Barrillon, S., Simon-Bot, F., Bonal, M., d'Ovidio, F. and A. Petrenko. 2019. Vertical motions and their effects on a biogeochemical tracer in a cyclonic structure finely observed in the Ligurian Sea. *Journal of Geophysical Research*, 124, 3561–3574.

Roxane Tzortzis, Andrea M. Doglioli, Stéphanie Barrillon, A. Petrenko, Francesco d'Ovidio, et al. Impact of moderately energetic fine-scale dynamics on the phytoplankton community structure in the western Mediterranean Sea. *Biogeosciences*, European Geosciences Union, 2021, 18 (24), pp.6455-6477. 10.5194/bg-18-6455-2021. hal-03485758

Rapports :

Développement et caractérisation du profileur de vitesse verticale VVP (Vertical Velocity Profiler), Dufosse, M. 2021.

Annexe I : exemple de donnée CTD

```
Time,Conductivity,Temperature,Pressure,Sea pressure,Depth,Salinity,Speed of sound,Specific conductivity,Density anomaly
2021-09-01 12:39:07.000,0.0003385,23.1199490,10.1202616,-0.0122384,-0.0121386,0.0112193,1491.5549120,0.3510307,NaN
2021-09-01 12:39:07.500,-0.0004257,23.1233374,10.1170923,-0.0154077,-0.0152820,0.0115915,1491.5648371,-0.4414385,NaN
2021-09-01 12:39:08.000,0.0005687,23.1292953,10.1182120,-0.0142880,-0.0141715,0.0111776,1491.5811719,0.5896999,NaN
2021-09-01 12:39:08.500,0.0003530,23.1391429,10.1228579,-0.0096421,-0.0095635,0.0112224,1491.6090481,0.3659736,NaN
2021-09-01 12:39:09.000,0.0009672,23.1450010,10.1240211,-0.0084789,-0.0084097,0.0111691,1491.6255090,1.0025846,NaN
2021-09-01 12:39:09.500,-0.0018075,23.1529935,10.1161158,-0.0163842,-0.0162506,0.0116031,1491.6483863,-1.8734201,NaN
2021-09-01 12:39:10.000,0.0017641,23.1610720,10.1170392,-0.0154608,-0.0153347,0.0112520,1491.6707469,1.8281479,NaN
2021-09-01 12:39:10.500,-0.0000016,23.1518388,10.1147351,-0.0177649,-0.0176200,0.0116026,1491.6451107,-0.0016767,NaN
2021-09-01 12:39:11.000,0.0004188,23.1378873,10.1192770,-0.0132230,-0.0131151,0.0112055,1491.6054315,0.4341959,NaN
2021-09-01 12:39:11.500,-0.0003196,23.1363284,10.1119499,-0.0205501,-0.0203826,0.0115966,1491.6013662,-0.3313413,NaN
2021-09-01 12:39:12.000,0.0007881,23.1442667,10.1215737,-0.0109263,-0.0108372,0.0111685,1491.6233991,0.8169610,NaN
2021-09-01 12:39:12.500,-0.0007034,23.1517643,10.1124052,-0.0200948,-0.0199309,0.0116026,1491.6448620,-0.7291022,NaN
2021-09-01 12:39:13.000,-0.0002208,23.1580172,10.1116774,-0.0208226,-0.0206528,0.0116050,1491.6624613,-0.2288590,NaN
2021-09-02 07:32:00.000,-0.0006230,23.8320134,10.1200059,-0.0124941,-0.0123922,0.0118654,1493.5429786,-0.6371688,NaN
2021-09-02 07:32:00.500,0.0001705,23.8353121,10.1135410,-0.0189590,-0.0188044,0.0115648,1493.5516417,0.1743603,NaN
2021-09-02 07:32:01.000,0.0003861,23.8397392,10.1136838,-0.0188162,-0.0186627,0.0114774,1493.5637755,0.3947714,NaN
2021-09-02 07:32:01.500,0.0010772,23.8424634,10.1119609,-0.0205391,-0.0203716,0.0114283,1493.5712160,1.1014432,NaN
2021-09-02 07:32:02.000,0.0002691,23.8455530,10.1096193,-0.0228807,-0.0226941,0.0115181,1493.5798138,0.2751770,NaN
2021-09-02 07:32:02.500,0.0007847,23.8474391,10.1115775,-0.0209225,-0.0207518,0.0114287,1493.5849539,0.8023235,NaN
2021-09-02 07:32:03.000,-0.0002865,23.8485084,10.1095430,-0.0229570,-0.0227698,0.0118718,1493.5883796,-0.2928823,NaN
2021-09-02 07:32:03.500,0.0003023,23.8494703,10.1125758,-0.0199242,-0.0197617,0.0115068,1493.5906700,0.3090272,NaN
2021-09-02 07:32:04.000,0.0007155,23.8499701,10.1086098,-0.0238902,-0.0236954,0.0114330,1493.5918996,0.7314542,NaN
2021-09-02 07:32:04.500,0.0000936,23.8507869,10.1132846,-0.0192154,-0.0190587,0.0116328,1493.5944618,0.0956928,NaN
2021-09-02 07:32:05.000,0.0000719,23.8524743,10.1058634,-0.0266366,-0.0264193,0.0116582,1493.5990269,0.0734729,NaN
2021-09-02 07:32:05.500,-0.0009845,23.8550162,10.1102213,-0.0222787,-0.0220970,0.0118742,1493.6063660,-1.0063706,NaN
2021-09-02 07:32:06.000,0.0008503,23.8559620,10.1105520,-0.0219480,-0.0217690,0.0114301,1493.6084759,0.8691995,NaN
2021-09-02 07:32:06.500,-0.0000412,23.8571067,10.1044812,-0.0280188,-0.0277904,0.0118750,1493.6120438,-0.0420915,NaN
2021-09-02 07:32:07.000,0.0007703,23.8575098,10.1043040,-0.0281960,-0.0279661,0.0114329,1493.6126487,0.7874003,NaN
2021-09-02 07:32:07.500,0.0010190,23.8576281,10.1165313,-0.0159687,-0.0158385,0.0114318,1493.6131781,1.0416131,NaN
2021-09-02 07:32:08.000,0.0008983,23.8573002,10.1102352,-0.0222648,-0.0220833,0.0114301,1493.6121658,0.9181963,NaN
2021-09-02 07:32:08.500,0.0007703,23.8592242,10.1073804,-0.0251196,-0.0249148,0.0114336,1493.6174346,0.7873740,NaN
2021-09-02 07:32:09.000,0.0002837,23.8626855,10.1063661,-0.0261339,-0.0259207,0.0115187,1493.6270712,0.2899200,NaN
2021-09-02 07:32:09.500,0.0003605,23.8660878,10.1107003,-0.0217997,-0.0216219,0.0114943,1493.6365083,0.3684742,NaN
2021-09-02 07:32:10.000,-0.0002023,23.8667919,10.1115168,-0.0209832,-0.0208121,0.0118787,1493.6389049,-0.2067660,NaN
2021-09-02 07:32:10.500,0.0008396,23.8671305,10.1105530,-0.0219470,-0.0217680,0.0114343,1493.6393159,0.8580584,NaN
2021-09-02 07:32:11.000,0.0007448,23.8672165,10.1047532,-0.0277468,-0.0275205,0.0114377,1493.6394603,0.7612022,NaN
2021-09-02 07:32:11.500,0.0007592,23.8681356,10.1143602,-0.0181398,-0.0179919,0.0114373,1493.6421575,0.7759329,NaN
2021-09-02 07:32:12.000,0.0003388,23.8695386,10.1083252,-0.0241748,-0.0239776,0.0115021,1493.6460033,0.3462666,NaN
```


Résumé

Le VVP est un outil mis en place pour la mesure de la composante verticale de la vitesse de courants océaniques. Cette composante a été peu mise en avant, en raison de son faible ordre de grandeur, et était souvent admise comme non mesurable ou négligeable. Or, les vitesses verticales océaniques sont au centre de phénomènes physiques et biologiques et leur connaissance peut permettre une compréhension approfondie de leurs interactions. C'est pour cela que l'équipe d'Océanographie Physique Littorale et Côtière du M.I.O. a décidé de développer le « Vertical Velocity Profiler » ou VVP. Ce rapport traite de la mise en place du modèle de vol du VVP, en y apportant les premières mesures des paramètres clés nécessaires à son élaboration. Ce modèle de vol permettra d'estimer directement les vitesses verticales avec précision.

Mots-clés : Vitesses verticales, VVP (Vertical Velocity Profiler), modèle de vol, océanographie physique

Abstract

The VVP is a tool designed to measure the vertical component of the ocean currents velocity. These vertical velocities have been poorly explored due to their low order of magnitude and were often considered as not measurable or negligible. However, vertical oceanic velocities are at the centre of several physical and biological phenomena and their knowledge can allow a deeper understanding of their connection. For this reason, the M.I.O.'s Coastal and Physical Oceanography team decided to develop the Vertical Velocity Profiler (VVP). This report deals with the implementation of the VVP flight model, by performing the first measurements of key parameters for its elaboration. This flight model will allow to estimate directly the vertical velocities with precision.

Keywords : Vertical velocities, VVP (Vertical Velocity Profiler), flight model, physical oceanography