

MÉMOIRE DE STAGE EN LABORATOIRE DE RECHERCHE

Profileur de vitesses verticales VVP : analyse de données des tests en fosse et développement du prochain prototype

Léa Criado

Sous la direction de Stéphanie Barrillon

Année Universitaire 2021-2022



Licence 3 Sciences de la Vie et de la Terre

Parcours Mer - Spécialité Physique Océanographique

Remerciements

Je souhaite tout d'abord remercier chaleureusement ma maîtresse de stage Stéphanie Barrillon qui a pris le temps de m'accompagner tout au long de ce stage. Grâce à elle, j'ai pu découvrir le domaine de la recherche en océanographie physique, et me conforter dans mon idée de continuer dans cette discipline. Sa gentillesse et son soutien m'ont permis de mener à bien mon stage et d'être fier de ce que j'avais entrepris.

Je tiens également à remercier Jean-Luc Fuda pour son accueil et ses encouragements, et pour m'avoir permis de travailler en atelier pour participer à la finalisation du VVP, avec l'aide de Michel Lafont.

J'aimerais aussi remercier mon enseignante Anne Petrenko, qui a répondu à mes questions et m'a aidée pour le traitement des données ainsi que pour la rédaction de ce mémoire.

Enfin, je remercie Yohan Esteves et Tino Bellayer, qui ont effectué leur stage en même temps que moi, et avec qui j'ai pu échanger sur nos sujets respectifs et sur le mémoire de stage.

Table des matières

1	Introduction	1
2	Matériels et méthodes	2
2.1	Présentation du VVP	2
2.2	Principe détaillé de fonctionnement	5
2.3	Effet de sillage	8
2.4	Fosse de la Comex	9
2.5	Analyse des données	10
3	Résultats	12
3.1	Détermination des oscillations de vitesse	12
3.2	Analyses des oscillations	15
3.3	Angles d'inclinaison et accélérations	17
4	Discussion	19
4.1	Caractérisation de l'effet de sillage	19
4.2	Impacts sur le comportement du VVP	21
4.3	Solutions mises en oeuvre	22
5	Conclusion et perspectives	22

1 Introduction

La composante verticale de la vitesse des courants océaniques a pendant longtemps été négligée du fait de son ordre de grandeur inférieur par rapport aux composantes horizontales. Cependant depuis une dizaine d'années, cette thématique est remise au goût du jour dans le domaine de l'océanographie physique, notamment dans le cadre de l'étude des structures et dynamiques à fine échelle. Ces phénomènes, regroupant les processus de méso-échelle ou subméso-échelle, concernent les structures dynamiques telles que des fronts ou des tourbillons. D'une dimension spatiale horizontale entre 1 et 50 km et verticale entre 0.1 et 1 km, avec une durée de vie de quelques jours pour la subméso-échelle, elles s'étendent sur 50 à 100 km avec une durée de vie de quelques semaines à quelques mois pour la méso-échelle [4]. Les structures de subméso-échelle, en particulier, peuvent impliquer une dynamique agéostrophique, c'est-à-dire présente dans un plan tridimensionnel, avec une composante verticale [2, 8].

Les vitesses verticales jouent un rôle crucial dans l'équilibre global des océans, notamment sur les processus de transferts verticaux biochimiques comme la pompe biologique des carbonates vers le fond ou encore les flux de nutriments fertilisant les eaux de surface. La plupart des études sur le sujet semblent mettre en avant l'importance d'étudier et d'analyser ces composantes verticales qui régissent en partie les transferts de matière et d'énergie dans les océans. De plus, dans un contexte de dérèglement climatique où l'activité anthropique tend vers une déstabilisation des cycles biogéochimiques, l'impact de ces vitesses verticales sur les transferts chimiques et biologiques ne doit pas être négligé [5, 6, 7, 11].

La mesure *in situ* des vitesses verticales reste donc un sujet récent et encore peu exploré, car ces vitesses sont considérées jusqu'ici comme étant trop difficiles à mesurer sur le terrain, du fait de leur caractère éphémère et de leur faible ordre de grandeur [9], ou tout simplement non nécessaires à la compréhension globale des dynamiques océaniques. Toutefois, ces mesures sont aujourd'hui au coeur d'un grand nombre de projets et campagnes océanographiques, et constituent donc l'un des enjeux principaux actuels. Plusieurs méthodes de mesure sont aujourd'hui en plein développement. Différents appareils sont notamment utilisés, tels que des ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) en

mouillage ou en profils dans les zones de grandes vitesses verticales, mais aussi des gliders (planneurs sous-marins), des bouées lagrangiennes (ou flotteurs dérivants de subsurface) ou des balises Argos. Une autre méthode, cette fois-ci plus théorique, consiste à estimer indirectement la composante verticale de la vitesse en utilisant l'équation ω (version Q -vector), uniquement valable dans le cadre d'une approximation quasi-géostrophique [13, 14].

La campagne océanographique FUMSECK (Facilities for Updating the Mediterranean Submesoscale-Ecosystem Coupling Knowledge) de 2019 a permis de réaliser un ensemble de tests à l'aide de divers nouveaux appareils de mesure en mer de Ligure [1, 10]. Un premier prototype du Vertical Velocity Profiler (VVP), développé dans l'équipe au MIO, a pu être testé. Les tests suivants ont montré une instabilité des mesures de vitesse verticale de type sinusoïdale, qui s'est révélée être due à un effet de sillage causé par la morphologie du dispositif. En effet, cette dernière induit le détachement périodique de tourbillons de sillage à l'arrière du VVP qui modifie son comportement général.

Différentes configurations du VVP ont été testées en mer, en soufflerie et en fosse afin d'étudier et de contrer cet effet de sillage. Les deux précédents jours de tests en fosse avec une bulle et une carène n'ont pas permis de trouver de solution. L'objectif de ce mémoire est d'analyser les données de la troisième et dernière journée de tests en fosse, et de conclure de la validité ou non de la configuration avec empennage. Les données récoltées lors des tests sans empennage serviront de comparaison, et permettront d'étudier le comportement hydrodynamique du VVP en présence de l'effet de sillage.

2 Matériels et méthodes

2.1 Présentation du VVP

Le VVP est un instrument océanographique autonome permettant de mesurer les vitesses verticales, développé sur le principe du modèle de vol des gliders [3]. Ces dernières sont déterminées par la déviation des vitesses mesurées de l'instrument par rapport à celles prédites par son modèle de vol, qui ne dépendent que de la densité du milieu et des propriétés physiques de l'appareil telles que son poids ou son volume. Toute déviation

observée peut être alors interprétée comme une vitesse verticale océanique.

Sa mise à l'eau s'effectue en station : il est au préalable programmé pour réaliser un certain nombre de plongées à une certaine profondeur *via* une carte Arduino, puis descendu grâce à une hélice. Les mesures de vitesses verticales se font à la remontée, permise par une flottabilité légèrement positive du VVP.

Le premier prototype a pu être utilisé en 2019 lors de la campagne océanographique FUMSECK ([Lien vers le test en mer du premier prototype](#)), et avait pour but de collecter des données sur les dynamiques des structures à méso-échelle et subméso-échelle. Depuis, le VVP a évolué avec différentes configurations afin d'atteindre une forme définitive ayant un coefficient de traînée constant [12] permettant de réaliser des mesures des vitesses verticales. Le VVP est ainsi constitué d'un premier disque en PVC de 52 centimètres de diamètre, aussi appelé disque de friction (Figure 1). Dans le cas de ce prototype, le coefficient de traînée théorique est environ égal à 1. Huit flotteurs profonds de la marque Engel Netze pouvant aller jusqu'à 500 mètres de profondeur se situent en dessous. Deux autres disques plus petits sont installés, l'un directement sous ces flotteurs, l'autre à la base du VVP. Ces trois disques sont reliés entre eux par quatre tiges filetées en acier inoxydable, auxquelles sont fixés une hélice de la marque Blue Robotics, ainsi qu'une sonde CTD dont le fonctionnement est détaillé ci-après (Partie 2.2).

Sur le dessus du VVP, au niveau du centre du premier disque, se trouve un dôme protégeant un traqueur SPOT GPS alimenté par piles. Grâce à ce dispositif, il est possible d'obtenir une position du VVP précise à l'ordre du centimètre toutes les 10 minutes, et de la visualiser sur leur site internet (findmespot.com). Un conteneur électronique cylindrique, situé juste en dessous, abrite la carte Arduino permettant le fonctionnement d'un capteur de pression, d'un accéléromètre et de l'hélice. L'accéléromètre permet la mesure des trois composantes du vecteur accélération, ainsi que l'estimation des angles d'inclinaison de l'appareil (Pitch, Roll et Heading) dans un plan orthogonal (Figure 2).

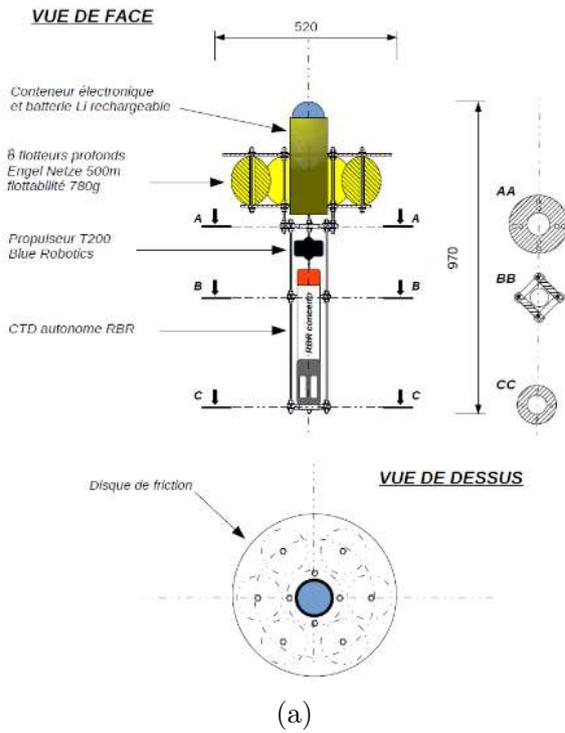


FIGURE 1 – (a) Schéma des différents composants du VVP sans empennage (J-L Fuda) et (b) photographie avec empennage.

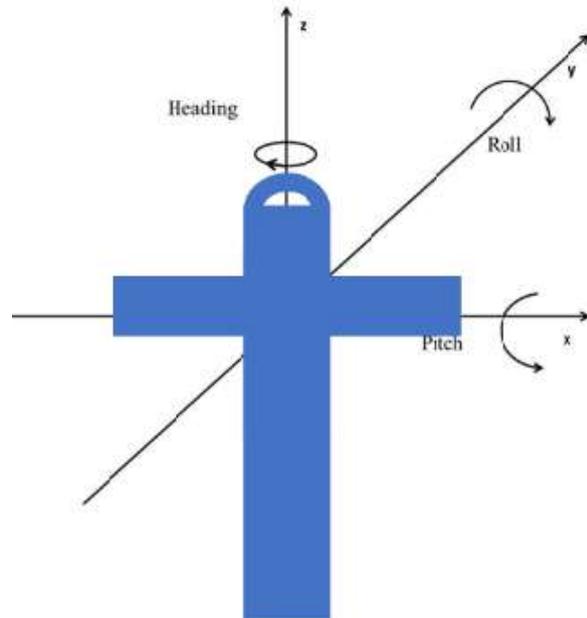
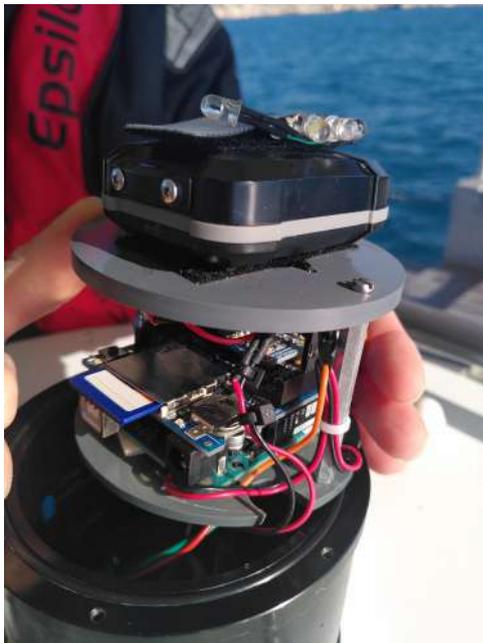


FIGURE 2 – (a) Photographie du traqueur GPS (boîtier noir) et de la carte Arduino et (b) schématisation des angles mesurés par le VVP [3].

2.2 Principe détaillé de fonctionnement

La mesure des vitesses verticales océaniques est réalisée à l'aide de la sonde CTD (Conductivity, Temperature, Depth) Concerto RBR (Figure 3). Très performante et mesurant 50 centimètres pour un poids de 200 grammes dans l'eau, elle est alimentée par des piles au lithium et échantillonne à 2 Hertz (Hz), soit 2 mesures par seconde. Les données sont récupérées en enlevant le bouchon isolant et en branchant la sonde à un ordinateur à l'aide d'un câble USB-C.

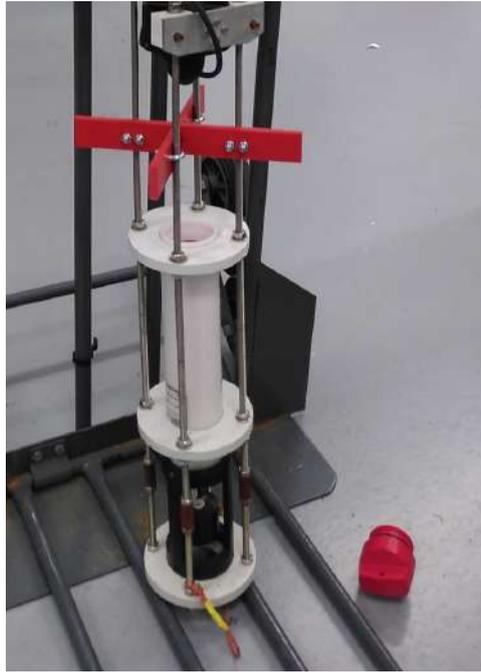


FIGURE 3 – Photographie de la sonde CTD.

La profondeur, importante pour les mesures de vitesses verticales, est calculée grâce au capteur de pression à jauge de contrainte, par conversion d'une déformation due à la pression en signal électrique. La vitesse verticale mesurée *in situ* est ensuite déterminée grâce à l'approximation hydrostatique :

$$\frac{\Delta p}{\Delta z} = \rho \times g$$

Avec :

p : pression

z : profondeur

ρ : masse volumique du milieu (ici de l'eau de mer)

g : accélération de la pesanteur

Ainsi :

$$p_{CTD} = \rho \times g \times z$$

$$w_{CTD} = \frac{\Delta z}{\Delta t}$$

L'équilibre mécanique des forces permet de calculer la vitesse verticale théorique du VVP. Pour cela, il faut prendre en compte l'ensemble des forces s'appliquant sur l'appareil lorsqu'il est en mer :

- Le poids :

$$\vec{P} = m_{VVP} \times \vec{g}$$

Avec :

m_{VVP} : masse du VVP

\vec{g} : constante d'attraction gravitationnelle ($\vec{g} = 9.81 \text{ m.s}^{-2}$)

- La poussée d'Archimède :

$$\vec{P}_a = \rho_{EDM} \times V \times (-\vec{g})$$

Avec :

ρ_{EDM} : masse volumique de l'eau de mer (mesurée par la CTD)

V : volume du VVP dans l'eau de mer

$-\vec{g}$: constante d'attraction gravitationnelle négative, car la poussée d'Archimède est de sens opposé aux autres forces

- La force de traînée :

$$\vec{T} = \frac{1}{2} \rho_{EDM} \times S \times Cd \times (w_{th})^2 \times (-\vec{k})$$

Avec :

S : surface, ici du disque de friction ($S = \Pi R^2$ (m^2))

Cd : coefficient de traînée du VVP (calculé lors des tests en fosse)

w_{th} : vitesse verticale théorique du VVP ($m.s^{-1}$)

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

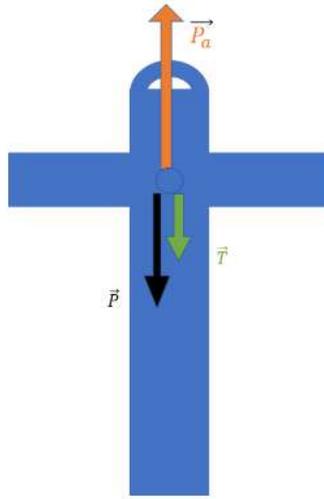


FIGURE 4 – Schématisation des forces s'exerçant sur le VVP [3].

Une valeur théorique de la vitesse verticale (modèle de vol) de l'instrument peut alors être déterminée grâce à la seconde loi de Newton, et en supposant que la vitesse de chute de remontée reste constante.

$$\begin{aligned} \sum \vec{F} &= m \times \vec{a} = \vec{0} \\ \Leftrightarrow \vec{P} + \vec{P}_a + \vec{T} &= \vec{0} \\ \Leftrightarrow \frac{1}{2} \rho_{EDM} \times S \times Cd \times (w_{th})^2 \times (-\vec{k}) &= |\vec{P}_a| - |\vec{P}| \\ \Leftrightarrow w_{th} &= \sqrt{\frac{2(|\vec{P}_a| - |\vec{P}|)}{\rho_{EDM} \times S \times Cd}} \end{aligned}$$

La différence entre w_{th} et w_{CTD} permet de mesurer une accélération ou un ralentissement du VVP par rapport au modèle de vol, et peut alors être interprétée comme étant une vitesse verticale océanique.

2.3 Effet de sillage

À la suite des premiers tests réalisés en mer (Lien vers le test VVP en rade de Marseille), des oscillations de vitesse lors des remontées effectuées par le VVP ont été observées. Cependant, les différentes zones de test montraient toutes ces mêmes oscillations, même lorsque la zone de mesure n'était pas propice à la présence de vitesses verticales. Des recherches plus poussées ont permis de déterminer l'origine de ce phénomène, aussi appelé effet de sillage. En effet, la morphologie du VVP, et en particulier son disque frottant, induisait la formation de tourbillons de sillage provoquant les oscillations de vitesse verticale du VVP. Afin de limiter voire supprimer ce phénomène, différentes configurations ont été testées : en plus de réaliser des tests sur des VVPs de différentes longueurs ("court" ou "long"), plusieurs composants ont pu être ajoutés ou modifiés afin de trouver la forme la plus hydrodynamiquement stable (mise en place d'une bulle, d'une carène ou d'un empennage). Un ensemble de tests de terrain a été réalisé afin d'avoir une idée plus précise du fonctionnement du VVP. Outre les tests en mer, des mesures ont été réalisées en soufflerie (Figure 5) dans le but de quantifier l'effet de sillage de l'appareil, ainsi qu'à la fosse de la Comex afin d'observer les réactions du VVP en l'absence des perturbations océaniques (courants, houle, ondes internes) et de calculer son coefficient de traînée associé.

Le but de ce stage est de déterminer la configuration la plus stable à l'aide des données récoltées en bassin (fosse de la Comex). La configuration courte du VVP, ainsi que la bulle et la carène, ne seront pas retenues ici, n'ayant pas montré les changements escomptés sur l'effet de sillage [3] lors des premiers tests en fosse. L'étude se focalisera donc sur la présence ou non d'un empennage en bois (ailettes) sur le VVP en configuration longue lors du dernier jour des tests en fosse.



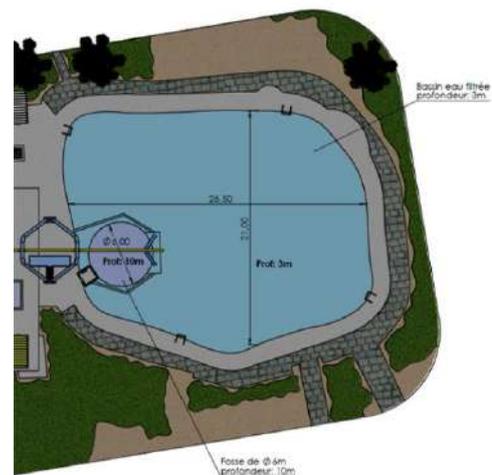
FIGURE 5 – Photo du VVP en soufflerie, avec la carène (partie bleue) et la bulle (dôme transparent) [3].

2.4 Fosse de la Comex

La Comex, ou Compagnie Maritime d'Expertises, est fondée en 1961 à Marseille, et se spécialise dans le développement de technologies permettant l'intervention humaine ou robotique dans des milieux extrêmes, notamment en zone hyperbare. Elle possède ainsi un bassin utilisé pour réaliser des tests en eau douce, dans un milieu au repos, c'est-à-dire sans perturbation externe, et une composante verticale de la vitesse du courant théoriquement nulle. Au sein de ce bassin se trouve une fosse de 10 mètres de profondeur et de 6 mètres de diamètre (Figure 6), où ont été effectuées les plongées de test le 21 septembre 2021.



(a)



(b)

FIGURE 6 – (a) Photographie et (b) schéma de la fosse de la Comex.

Plusieurs appareils ont été déployés afin de s'assurer que les mesures sont réalisées dans un environnement pas ou peu perturbé : une sonde CTD est placée au fond de la fosse pour enregistrer d'éventuels changements de pression dus aux variations du niveau de l'eau dans le bassin causées par le forçage du vent. De plus, un anémomètre et des caméras GoPro sont utilisés respectivement pour mesurer l'intensité du vent et visualiser en continu le VVP sous différents angles.

Pour éviter toute perturbation de l'eau durant les essais, des largueurs à glace sont utilisés à la place de l'hélice pour faire descendre le VVP au fond de la fosse. Le largueur à glace est un nouvel instrument de largage sous-marin simple, résistant et économique, qui a été développé en même temps que le VVP. Il se base sur la libération contrôlée dans le temps d'une pièce métallique piégée dans la glace, elle-même accrochée à un lest.

Un total de 25 plongées ont été réalisées, dont 12 avec empennage et 13 sans empennage. Pour étudier les réactions du VVP à différentes vitesses, il a été lesté à l'aide de mousquetons (entre 0 et 4 mousquetons utilisés pesant chacun 57 g dans l'eau) afin de modifier sa flottabilité et de moduler sa vitesse de remontée. Les plongées effectuées le matin correspondent à la configuration avec empennage, celles de l'après-midi, à la configuration sans empennage. Les données mesurées par la sonde CTD et l'accéléromètre du VVP ont ensuite été récupérées afin d'être analysées.

2.5 Analyse des données

Le traitement des données se fait à l'aide du logiciel Spyder, un environnement de développement utilisant le langage Python. Tout d'abord, les données de la CTD et du VVP sont prédécoupées par plongée, où seules les mesures prises lors de la remontée sont conservées. Plusieurs analyses successives sont par la suite établies.

Premièrement, la vitesse du VVP est déterminée grâce aux données "Time" et "Depth" à l'aide de la formule $\frac{\Delta z}{\Delta t}$, puis lissée avec une moyenne glissante sur une fenêtre de 10 secondes. Une transformée de Fourier est ensuite effectuée sur les données brutes et sur le lissage avec la fonction *fft* de la librairie *scipy.io*. Cela permet de représenter le spectre de Fourier en fonction de la fréquence (Hz) et de la période (seconde). Les pics significatifs

sur ce dernier graphique correspondent aux périodes caractéristiques (T) de l'oscillation de vitesse due au sillage. Les valeurs de ces pics sont ainsi relevées pour chaque plongée.

Dans un second temps, l'amplitude dominante de ces oscillations est calculée pour chaque plongée. Les données utilisées sont celles de la vitesse moyenne lissée, auxquelles sont retirées les premier et dernier quarts de la série temporelle afin d'exclure les phases instables d'accélération et décélération en début et fin de plongée. L'amplitude a été calculée de la manière suivante :

$$A = \frac{w_{max} - w_{min}}{2}$$

Avec :

w_{max} : valeur maximale de w

w_{min} : valeur minimale de w

L'amplitude est ensuite représentée en fonction de la vitesse moyenne de remontée. Si la période est observable (pic) sur le graphique de la transformée de Fourier, elle peut être elle aussi tracée en fonction de la vitesse moyenne de remontée. Dans ce cas, le nombre de Reynolds (Re) caractérisant l'écoulement d'un fluide, et le nombre de Strouhal (St) décrivant les mécanismes de circulation oscillante, peuvent être déterminés et représentés l'un par rapport à l'autre.

$$Re = \frac{w \times D}{\nu}$$
$$St = \frac{f \times D}{w}$$

Avec :

D : diamètre du VVP (0.52 m)

ν : viscosité cinématique de l'eau douce à 23°C, correspondant à la température du bassin relevée lors des tests ($\nu = 0.941 \times 10^{-6}$)

f : fréquence obtenue grâce au spectre de Fourier ($f = 1/T$)

Cela permet de caractériser les différentes oscillations observées, à savoir si elles sont dues à l'effet de sillage ou à des phénomènes extérieurs.

Enfin, les angles d'inclinaison (Pitch, Roll et Heading), ainsi que les trois composantes du vecteur accélération qui ont été mesurées par le VVP sont représentés en fonction du temps et comparés aux variations de la vitesse pour chaque plongée.

3 Résultats

3.1 Détermination des oscillations de vitesse

Afin de simplifier la comparaison entre les deux configurations testées à la fosse de la Comex (avec ou sans empennage), 2 plongées "types", variant toutes deux entre des valeurs de vitesse d'environ 10 à 15 cm/s, seront utilisées pour illustrer le schéma global suivi en fonction de la présence ou non d'empennage. Cependant, les données issues de l'ensemble des plongées apparaîtront dans un tableau comparatif ci-après (Tableau 1). Les figures ci-dessous représentent respectivement la huitième (avec empennage, Figure 7a) et la dix-huitième plongée (sans empennage, Figure 7b).

La principale différence entre les deux spectres est l'absence de pic significatif pour la période dans le cas du VVP avec empennage. En effet, la plongée type sans empennage montre un pic, donc une période dominante d'environ 14.1 secondes correspondant à l'oscillation de vitesse verticale de l'instrument due au sillage. Quant à la valeur de la vitesse sur la moyenne glissante, qui est négative car il s'agit là de la remontée (axe vertical dirigé vers le bas), elle semble osciller (courbe sinusoïdale) dans le cas de la plongée 18, tandis qu'elle augmente de manière constante (droite affine) pour la plongée 8. La valeur μ donne la valeur moyenne de la vitesse lissée pour l'ensemble de la remontée du VVP.

Pour certaines plongées sans empennage, une autre oscillation est apparue sur quelques graphiques des spectres de Fourier en fonction de la période (exemple de la plongée 22 : Figure 8). En effet, un autre pic moins important mais récurrent peut être observé, avec une période caractéristique d'environ 9 secondes.

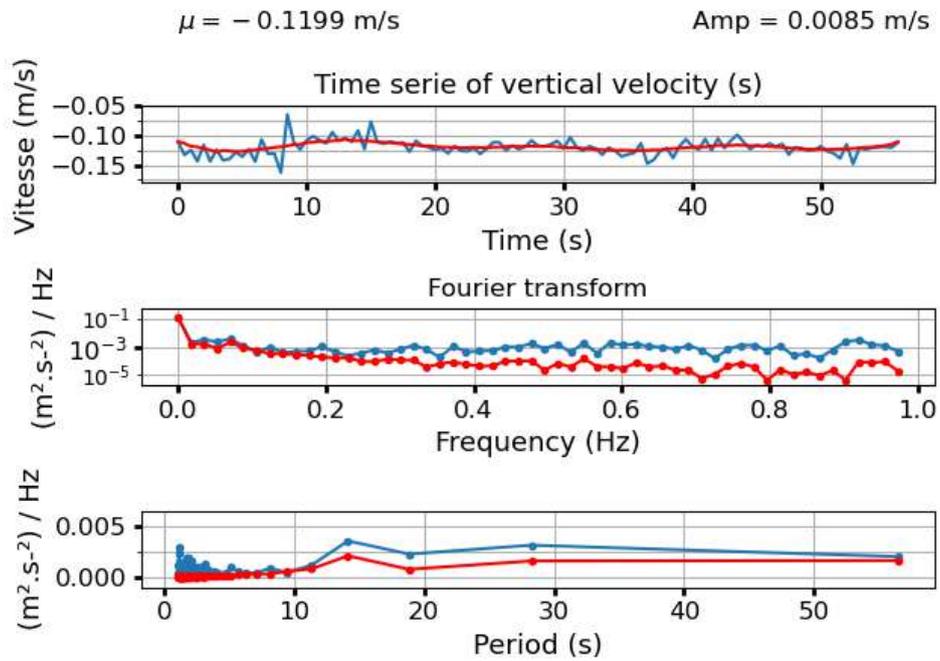
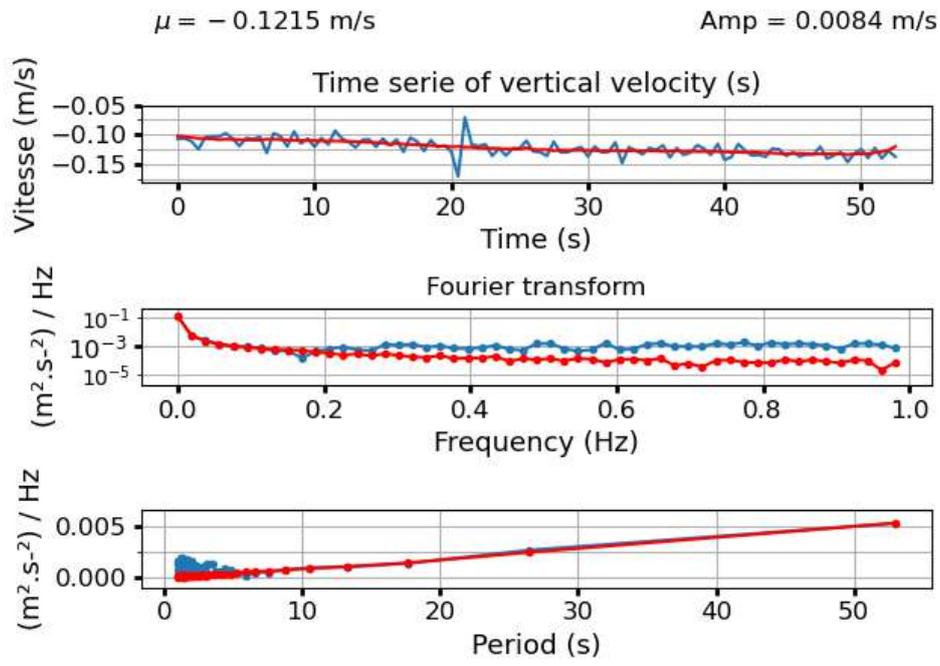


FIGURE 7 – Série temporelle de la vitesse verticale, et spectres de Fourier en fréquence et en période.

<i>Avec empennage</i>	Vitesse moyenne	Amplitude	Périodes
Numéro de plongée	$(m.s^{-1})$	$(m.s^{-1})$	(s)
1	-0.1072	0.0072	/
2	-0.0888	0.0119	/
3	-0.0861	0.0098	/
4	-0.1086	0.0109	/
5	-0.0995	0.0090	/
6	-0.0932	0.0094	/
7	-0.1231	0.0093	/
8	-0.1215	0.0084	/
9	-0.1008	0.0079	/
10	-0.0935	0.0086	/
11	-0.1067	0.0099	/
12	-0.1063	0.0095	/
<i>Sans empennage</i>	Vitesse moyenne	Amplitude	Périodes
Numéro de plongée	$(m.s^{-1})$	$(m.s^{-1})$	(s)
13	-0.1095	0.0058	9.2; 15.9
14	-0.1075	0.0093	15.5
15	-0.1075	0.0047	15.0
16	-0.1052	0.0073	9.2; 16.0
17	-0.1187	0.0063	9.6; 14.3
18	-0.1199	0.0085	8.1; 14.1
19	-0.1180	0.0064	7.1; 14.4
20	-0.1178	0.0050	8.3; 14.6
21	-0.1182	0.0040	7.1; 14.7
22	-0.1189	0.0082	9.2; 13.9
23	-0.1198	0.0048	8.5; 14.8
24	-0.1189	0.0068	9.4; 14.0
25	-0.1341	0.0061	6.7; 12.1

TABLE 1 – Tableau récapitulatif des données extraites des vitesses verticales, par plongée.

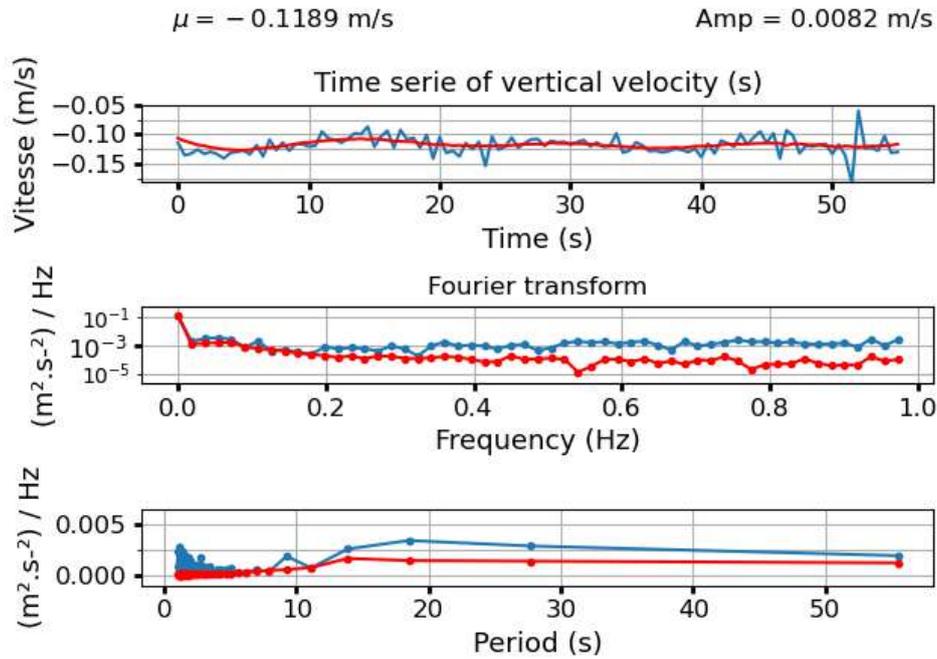


FIGURE 8 – Série temporelle de la vitesse verticale, et spectres de Fourier en fréquence et en période avec une deuxième période caractéristique.

3.2 Analyses des oscillations

L'étape suivante est d'analyser les caractéristiques de ces oscillations de vitesse lorsqu'elles sont observées. Pour cela, les amplitudes de ces oscillations sont calculées et les périodes sont déterminées grâce aux spectres de Fourier, puis représentées en fonction de la vitesse verticale moyenne de remontée (Figure 9).

Les graphiques de la Figure 9 représentent ainsi les amplitudes pour l'ensemble des plongées, ainsi que les périodes observées pour les données sans empennage (après-midi), et donc avec oscillations de sillage. La répartition des amplitudes semble assez claire, avec des valeurs comprises entre 0.007 et 0.011 m/s pour la configuration avec empennage, et entre 0.004 et 0.009 m/s dans le cas du VVP sans empennage. Quant aux périodes, trois groupes distincts de mesures sont observés, correspondant aux groupes de test à de différentes vitesses dues au changement du lest. Ici, la vitesse verticale et la période varient en sens inverse, c'est-à-dire que la période diminue lorsque la vitesse augmente.

Ensuite, les nombres de Reynolds et Strouhal ont été calculés à partir des périodes déter-

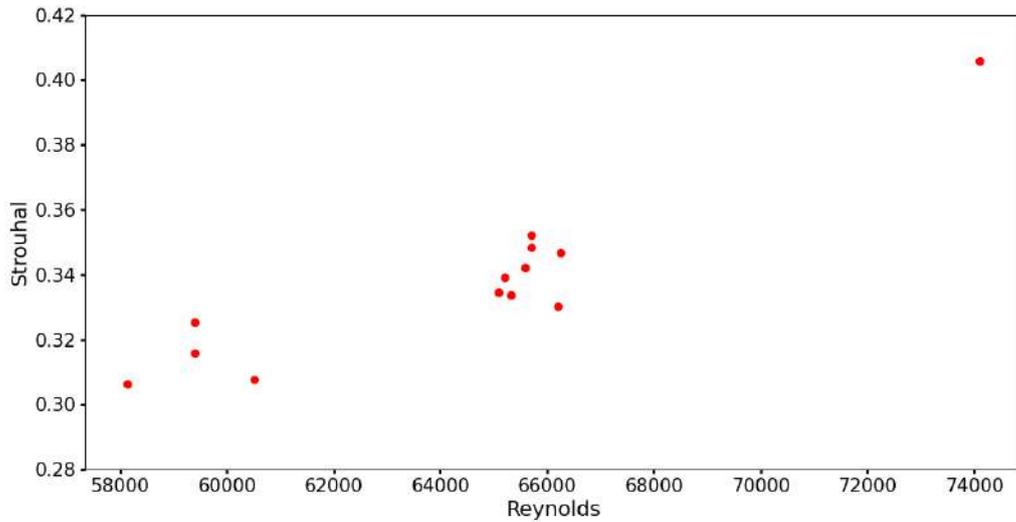
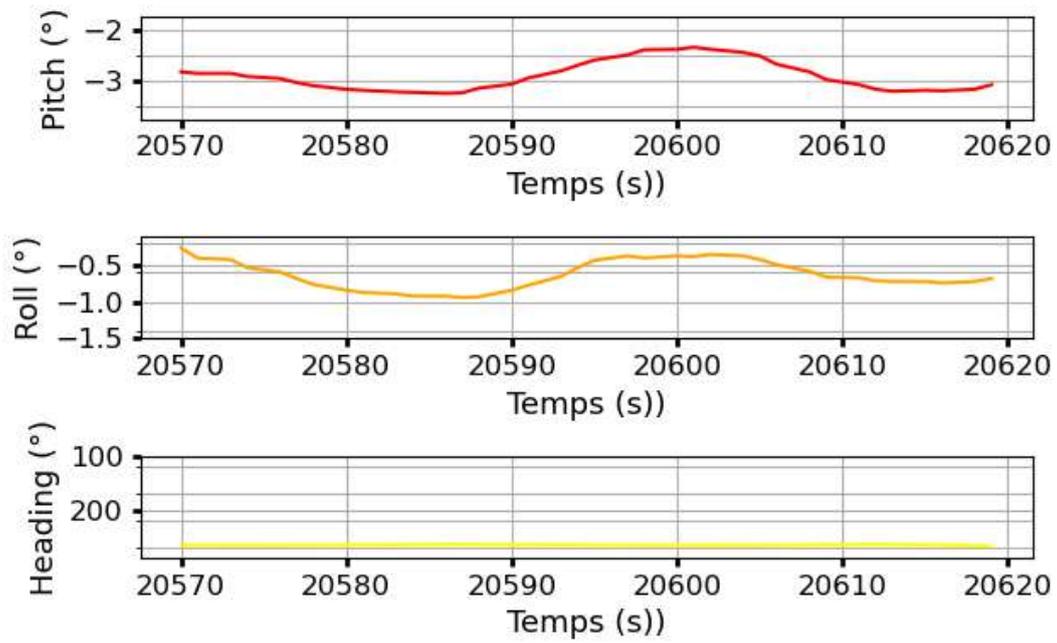


FIGURE 10 – Nombre de Strouhal en fonction du nombre de Reynolds

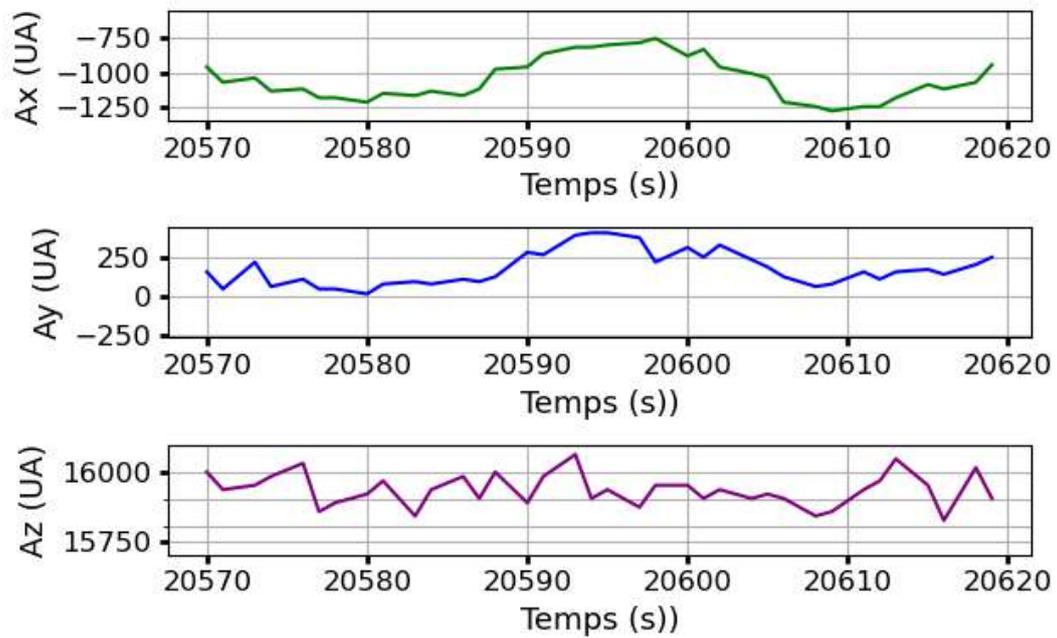
3.3 Angles d’inclinaison et accélérations

Pour finir, les données sur les angles pitch, roll et heading, de même que les composantes de l’accélération, sont également analysées pour mieux comprendre le comportement du VVP dans la configuration sans empennage. Toutes ces données sont présentées sous la forme de séries temporelles (Figure 11), toujours dans le cas de la plongée 18.

Une oscillation pour les angles pitch et roll est clairement visible, ainsi que pour les composantes x et y de l’accélération, avec une période proche mais un léger décalage temporel entre les deux. L’ensemble de ces périodes d’oscillation déterminées graphiquement est répertorié dans le tableau ci-après (Tableau 2). Pour la plongée 18, les périodes des angles pitch et roll sont de 32 et 30.8 secondes, tandis qu’elles varient entre 29.3 et 28.4 secondes pour les composantes horizontales de l’accélération. L’angle heading reste globalement constant tout au long de la remontée du VVP. Quant à la dernière composante (verticale) de l’accélération, elle montre une plus forte variabilité sans osciller de manière comparable aux autres accélérations.



(a)



(b)

FIGURE 11 – (a) Séries temporelles des angles d'inclinaison et (b) des composantes du vecteur accélération.

<i>Sans empennage</i>	Période des angles (s)		Période des accélérations (s)	
	Numéro de plongée	Pitch	Roll	Ax
13	34.2	33.7	34.9	29.0
14	33.5	33.7	37.4	36.2
15	34.1	32.7	32.3	31.9
16	33.1	34.8	33.5	35.7
17	33.0	24.9	32.3	27.2
18	32.0	30.8	29.3	28.4
19	31.4	26.8	30.1	29.2
20	24.4	29.4	28.9	29.2
21	36.1	30.0	33.9	30.0
22	30.2	34.9	33.8	36.2
23	34.5	29.7	31.2	33.1
24	25.3	28.5	24.1	29.8
25	26.5	29.5	29.0	26.3

TABLE 2 – Tableau récapitulatif des périodes des angles et des accélérations, par plongée.

4 Discussion

4.1 Caractérisation de l'effet de sillage

Grâce aux résultats présentés ci-dessus ainsi qu'aux précédentes analyses qui ont été faites sur les tests du VVP [3], les périodes dominantes observées sur le spectre de Fourier ont pu être caractérisées comme étant dues à un effet de sillage lié à la morphologie du VVP.

Toutefois, l'oscillation de vitesse repérée sur les données sans empennage ne semble pas être l'oscillation fondamentale trouvée lors des tests en soufflerie (Figure 12), mais plutôt une harmonique de celle-ci ayant une fréquence et un nombre de Strouhal ($St \approx 0.33$) deux fois plus élevés, ainsi qu'une période de 16 secondes, donc deux fois plus petite. Sur la figure, les données se situeraient dans la distribution horizontale "2H", entre des valeurs de 58 000 et 74 000 pour le nombre de Reynolds. De plus, l'analyse des données

des journées précédentes avaient montré plusieurs pics périodiques sur les spectres de Fourier, ce qui n'est pas le cas ici. Un forçage du vent amoindri, couplé à la dynamique oscillatoire propre du VVP, pourraient expliquer cette différence notable.

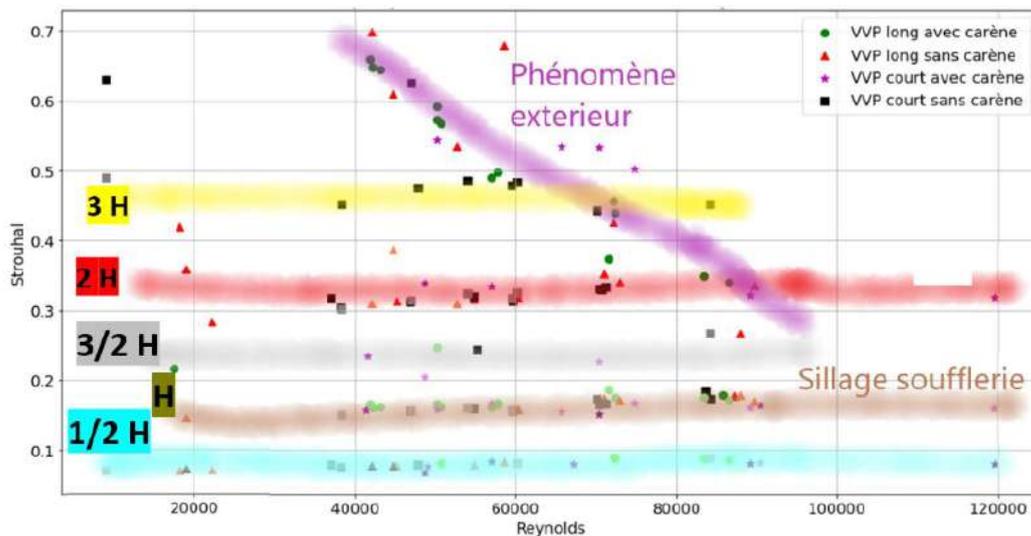


FIGURE 12 – Graphique annoté du nombre de Strouhal en fonction du nombre de Reynolds (P. Le Gal).

À noter que la dernière valeur du jeu de données de la figure 4, autrement dit celle qui a été mesurée à une vitesse plus importante, semble se rapprocher de la distribution oblique, caractéristique d'une oscillation due à un phénomène extérieur. Ce phénomène est également observé sur certains des spectres de Fourier, se matérialisant par un pic distinct à une période d'environ 9 secondes, et avait été caractérisé comme étant la conséquence d'un effet de seiche [3]. L'effet de seiche est une oscillation d'un fluide contenu dans un bassin provoquée par le forçage du vent, des changements de pression atmosphérique, ou encore des mouvements telluriques. Elle peut être de forme et de taille quelconque, mais dépend de la forme du bassin et notamment de ses dimensions. En effectuant le calcul théorique de la période de cet effet de seiche, la valeur trouvée correspond avec les observations. Cette analyse est renforcée par le fait que l'anémomètre avait enregistré une intensification du vent peu de temps avant d'observer la seiche.

Pour résumer, le VVP semble subir deux contraintes principales. La première est l'oscillation entraînée par l'effet de sillage d'une période de 16 secondes pour une vitesse d'environ 10 cm/s. Cela correspond à un nombre de Strouhal d'environ 0.33, soit le double de la

fréquence fondamentale d'émission tourbillonnaire. Autrement dit, le VVP effectue deux oscillations par émission tourbillonnaire. À cela s'ajoute l'oscillation causée par l'effet de seiche du bassin, cependant il reste difficile de déterminer à quel point cela peut influencer la mesure des vitesses verticales du VVP.

4.2 Impacts sur le comportement du VVP

L'effet de sillage influence donc les réactions du VVP. Pour en savoir plus, les amplitudes des vitesses ont été tracées en fonction de la vitesse verticale mesurée, et l'accélération et les angles d'inclinaison ont été représentés sous la forme de séries temporelles. Les mesures du VVP sans empennage montrent des amplitudes plus faibles que pour celles avec empennage. Cependant, les oscillations de vitesse pour les données du matin (avec empennage) ne sont pas représentatives d'une oscillation de la vitesse du courant car il n'y a pas de variation périodique sur ces données, mais plutôt d'un changement de vitesse constant lié au stockage de bulles d'air dans le bois des ailettes. Les amplitudes en rouge (sans empennage) et en vert (avec empennage) ne sont donc pas dues au même phénomène.

Pour ce qui est des angles et des accélérations, une variation périodique sinusoïdale est observable pour les composantes x et y principalement. L'oscillation due à l'effet de sillage entraîne donc une oscillation de ces composantes horizontales, c'est-à-dire que les émissions tourbillonnaires déstabilisent le VVP en le faisant osciller "de gauche à droite" et "d'avant en arrière" dans le plan orthogonal, ce qui induit également des perturbations dans la vitesse de remontée, autrement dit une accélération ou décélération dans ce même plan. Toutefois, une analyse plus poussée serait nécessaire, afin de pouvoir comparer les oscillations de vitesse et celles des angles et des composantes d'accélérations synchronisées en temps. Pour cela, il faudra réussir à superposer les données de la CTD et du VVP qui n'ont pas la même résolution temporelle et donc pas la même quantité de valeurs mesurées par plongée. En général, les oscillations de vitesse verticale montrent deux périodes complètes par remontée, tandis qu'il n'en apparaît qu'une seule sur les séries temporelles des angles et des accélérations. Ainsi, les périodes des angles et accélérations sont à près le double de celles des vitesses verticales. Dans le cas de la plongée 18, la

période d'oscillation de la vitesse verticale est de 14.1 secondes, tandis que les périodes d'oscillation des angles et des accélérations sont comprises entre 28 et 32 secondes, soit un peu plus du double. Le VVP observerait donc 2 oscillations de vitesse verticale par émission tourbillonnaire, mais un seul déplacement horizontal.

4.3 Solutions mises en oeuvre

Afin de contrer ces différentes perturbations, plusieurs configurations du VVP ont pu être testées auparavant lors des deux premières journées à la Comex et comparées dans le but de trouver une forme qui permettrait d'éliminer cet effet de sillage ou du moins de le limiter. Le but était de faire augmenter la fréquence de l'effet de sillage, car les phénomènes liés aux mesures de vitesse verticale du VVP se trouvent dans les basses fréquences, et ainsi de pouvoir les différencier. Plusieurs dispositifs, dont une bulle et une carène, positionnées respectivement au-dessus et en-dessous du disque principal, ou encore un cylindre grillagé entourant le VVP ont pu être testés, mais aucun d'eux n'a eu l'effet escompté. De plus, la bulle contribuait à augmenter fortement l'hydrodynamisme du VVP, ce qui le faisait remonter trop vite et empêchait de prendre des mesures de vitesses verticales correctes. Quant à la carène, elle se remplissait d'eau durant la remontée, ce qui compliquait grandement sa manipulation en mer. Lors du troisième jour de test à la fosse de la Comex, un dernier montage comprenant quatre ailettes (empennage) a pu être testé. Les données récoltées lors de cet ultime essai montrent l'absence totale de pic sur le spectre des périodes de Fourier, synonyme d'une absence d'oscillations de la vitesse verticale, qu'elles soient d'origine externe ou bien dues au VVP. Comme l'expérience se fait dans un milieu théoriquement au repos (en fosse), cela signifie que l'effet de sillage a bien été éliminé par les modifications apportées au VVP.

5 Conclusion et perspectives

Les analyses que j'ai réalisées lors de ce stage ont permis de vérifier l'efficacité de l'empennage pour empêcher la formation d'émissions tourbillonnaires périodiques et ainsi d'adapter et finaliser le VVP sous une forme hydrodynamiquement plus stable. Quant aux données récoltées lors des essais réalisés sans empennage, leur analyse a démontré

qu'il s'agissait bien là d'oscillations de vitesses dues à un effet de sillage, et que c'était bien ce phénomène qui devait être contrôlé.

À l'aide de l'Ingénieur de Recherche Jean-Luc Fuda, j'ai pu participer à l'installation d'un nouvel empennage en plastique dur sur le VVP afin de lui donner sa forme définitive. Pour conclure sur la validité et l'efficacité de cette dernière configuration, une dernière sortie en mer à laquelle j'ai participé a été organisée, avec des tests de plongée à 10, 40 et 60 mètres de profondeur. Cependant, les valeurs brutes n'étant pas rapidement analysables, un traitement de ces nouvelles données sera nécessaire avant de pouvoir conclure sur l'efficacité de l'empennage en conditions réelles et la cohérence des nouveaux résultats avec ceux présentés dans ce rapport.

Le but premier est ici que le VVP soit opérationnel dans les prochaines semaines afin de pouvoir participer aux campagnes PROTEVS-Gibraltar et BioSWOT-Med, prévues respectivement en 2022 et 2023. Sur le plus long terme, une utilisation régulière voire systématique de VVPs, seul ou en groupe, lors de ce genre d'expéditions serait envisageable, permettant alors de réaliser des mesures simultanées sur une zone géographique plus importante, et ainsi cartographier les variations de vitesses verticales à une échelle spatio-temporelle plus étendue.

Références

- [1] Stéphanie Barrillon, Hubert Bataille, Nagib Bhairy, Caroline Comby, Théo Coulon, Andrea M. Doglioli, Francesco D’Ovidio, Jean-Luc Fuda, Gérald Grégori, Anne Petrenko, Anaïs Ricout, Louise Rousselet, Melilotus Thyssen, and Roxane Tzortzis. FUMSECK Cruise Report. Technical report, MIO-Mediterranean Institute of Oceanography, Aix-Marseille Université, June 2020.
- [2] Xavier Capet, James C. McWilliams, M. Jeroen Molemaker, and Alexander F. Shchepetkin. Mesoscale to Submesoscale Transition in the California Current System. Part 2 : Frontal Processes. *Journal of Physical Oceanography*, 38 :44–64, 2008.
- [3] Margaux Dufosse. Développement et Caractérisation du Profileur de Vitesses Verticales VVP (Vertical Velocity Profiler), 2020.
- [4] Raffaele Ferrari and Carl Wunsch. Ocean Circulation Kinetic Energy : Reservoirs, Sources, and Sinks. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 41 :253–282, 12 2008.
- [5] Marina Lévy, Doroteaciro Iovino, Laure Resplandy, Patrice Klein, Gurvan Madec, Anne-Marie Tréguier, Sébastien Masson, and Keiko Takahashi. Large-Scale Impacts of Submesoscale Dynamics on Phytoplankton : Local and Remote Effects. *Ocean Modelling*, 43-44 :77–93, 2012.
- [6] Amala Mahadevan. The Impact of Submesoscale Physics on Primary Productivity of Plankton. *Annual Review of Marine Science*, 8(1) :161–184, 2016. PMID : 26394203.
- [7] Dennis McGillicuddy. Mechanisms of Physical-Biological-Biogeochemical Interaction at the Oceanic Mesoscale. *Annual Review of Marine Science*, 8, 09 2015.
- [8] James C. McWilliams. Submesoscale Currents in the Ocean. *Proceedings of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 472(2189) :20160117, 2016.
- [9] Anne Petrenko, Andrea M. Doglioli, Francesco Nencioli, Marion Kersalé, Ziyuan Hu, and Francesco d’Ovidio. A Review of the LATEX Project : Mesoscale to Submesoscale Processes in a Coastal Environment. *Ocean Dynamics*, 24(3) :513–533, 2017.
- [10] Claire Raffaelli. Rapport de Stage d’Observation, 2021.

- [11] Louise Rousselet, Andrea M. Doglioli, Alain de Verneil, Alice Pietri, Alice Della Penna, Léo Berline, Pierre Marrec, Gérald Grégori, Melilotus Thyssen, François Carlotti, Stéphanie Barrillon, François Simon-Bot, Mathias Bonal, Francesco d’Ovidio, and Anne Petrenko. Vertical Motions and their Effects on a Biogeochemical Tracer in a Cyclonic Structure Finely Observed in the Ligurian Sea. *Journal of Geophysical Research. Oceans*, 124(6) :3561–3574, April 2019.
- [12] A. H. P. Skelland. Bubbler, Drops, and Particles, by R. Clift, J.R. Grace, and M.E. Weber, Academic Press, Inc., 1978, 380 pages, \$32.00. *AIChE Journal*, 25(4) :733–733, 1979.
- [13] Volker H. Strass. Mesoscale Instability and Upwelling. Part 2 : Testing the Diagnostics of Vertical Motion with a Three-Dimensional Ocean Front Model. *Journal of Physical Oceanography*, 24(8) :1759–1767, August 1994.
- [14] Roxane Tzortzis, Andrea M. Doglioli, Stéphanie Barrillon, Anne Petrenko, Francesco d’Ovidio, Lloyd Izard, Melilotus Thyssen, Ananda Pascual, Bàrbara Barceló-Llull, Frédéric Cyr, Marc Tedetti, Nagib Bhairy, Pierre Garreau, Franck Dumas, and Gérald Grégori. Impact of Moderately Energetic Fine-Scale Dynamics on the Phytoplankton Community Structure in the Western Mediterranean Sea. *Biogeosciences*, 18(24) :6455–6477, December 2021.

Résumé

Les mesures des vitesses verticales océaniques ont longtemps été négligées en raison de leur faible intensité par rapport aux composantes horizontales. Cependant, de récentes études ont montré l'importance de considérer cette composante verticale pour une meilleure compréhension de la dynamique physique et biogéochimique des océans. C'est pourquoi l'équipe du MIO s'est chargée de construire un instrument de mesure *in situ* des vitesses verticales, le Vertical Velocity Profiler. Après de premiers essais, un effet de sillage dû à la morphologie du VVP avait été détecté, créant des oscillations parasites des vitesses mesurées. Différentes configurations avaient été testées afin d'en déduire son impact sur le comportement du VVP. Dans ce mémoire, il a été déterminé que la configuration avec empennage éliminait l'effet de sillage, permettant de réaliser les mesures de vitesses verticales sans perturbations dues à l'appareil.

Mots-clés : Processus à fine échelle, vitesses verticales, VVP (Vertical Velocity Profiler), hydrodynamisme, effet de sillage

Abstract

The measurement of vertical oceanic velocities have long been neglected due to their low intensity compared to the horizontal components. However, recent studies showed the importance to consider this vertical component for a better understanding of oceanic physical and biogeochemical dynamics. This is why the MIO's Physical Oceanography Coastal team developed an instrument for measuring vertical velocities *in situ*, the Vertical Velocity Profiler (VVP). After the first tests, a wake effect due to VVP morphology had been detected, creating interfering oscillations of measured velocities. Several configurations had been tested in order to deduce their impact on the behavior of the VVP. In this report, it was determined that the configuration of the VVP with empennage eliminated the wake effect, allowing vertical velocity measurements to be performed without disturbance due to the device.

Keywords : Fine-scale processes, vertical velocities, VVP (Vertical Velocity Profiler), hydrodynamics, wake effect

Annexes

Annexe 1 - Extrait Logbook Données Comex

1. Test avec empennages :

VVP long, avec Gopro, 3 poids de 0.5 kg et empennages

⇒ Test avec 4 gros mousquetons

1) 09 :06 : sortie 1^{er} glaçon

09 :09 : Plongée du VVP

09 :09 : Gopro 2 allumée

09 :11 : VVP largué

$t_1 = 66\text{s}$ donc $v = 7.8/66 = \mathbf{11,8\text{ cm/s}}$

Note : VVP ne tourne pas ($x=5.5$ et $y=5$)

2) 09 :14 : sortie 2^e glaçon

09 :15 : Plongée du VVP

09 :19 : VVP largué

$t_2 = 91\text{s}$ donc $v = 7.8/91 = \mathbf{8,6\text{ cm/s}}$

2. Test sans empennages :

⇒ Test avec 3 gros mousquetons

13) 13 :04 : sortie glaçon

13 :05 : Plongée du VVP

13 :10 : VVP largué

$t = 73\text{s}$ donc $v = 7.8/73 = \mathbf{10,7\text{ cm/s}}$

14) 13 :13 : sortie glaçon

13 :14 : Plongée du VVP

13 :17 : VVP largué

$t = 73\text{s}$ donc $v = 7.8/73 = \mathbf{10,7\text{ cm/s}}$

Annexe 2 - Extrait Logbook Sortie Mer

Ajout 3 plombs (32g/plomb), 2 Mousquetons (57g/mousqueton), 1 disque (450g)

8h18 : Test de Flottabilité oK

8h20 : Départ Bateau

8h25 : Problème de démarrage de la sonde à profondeur

Présence d'une légère houle, beau temps, pas de vent

8h31 : démarrage du VVP 43° 14,545'N 5° 21,142'E 18m de fond

8h35 : Allumage puis éteignage de la CTD car pas certain de l'allumage

8h37 : CTD allumé

8h39 : Passage de l'Anthedon II à une cinquantaine de mètres

8h41 : Mise à l'eau du VVP

8h42 : VVP toujours en surface à 5m du bateau

8h45 : En attente de la plongée qui devrait être effective à 8h51

8h51 : Plongée du VVP 43° 14,418'N 5° 21,007'E (plongée à 10m)

8h54 : Petit goûter + VVP en surface

9h03 : Check spot oK

9h04 : Nouvelle plongée du VVP

9h08 : VVP en surface Enoncement de l'idée du prochain objectif, plongée à 40m

9h11 : Démarrage de récup du VVP

9h12 : Pêche du VVP et VVP sur le pont

9h17 : Prise du bateau dans boue flottante mais décrochage rapide, reprise de la route

9h24 : Arrivée vers le Frioul

9h27 : Décapsulage de la carte Arduino

9h29 : Sortie de la carte pour arrêt

9h30 : Carte Arduino éteinte

9h31 : début de reprogrammation pour nouvelle profondeur de plongée (10min en surface, 3h de mission, 40m de profondeur)

9h34 : Fin de reprogrammation

9h35 : Réassemblage de la carte Arduino

9h36 : Allumage de la carte Arduino

9h40 : Prêt à envoyer le VVP

9h41 : Départ vers site de mise à l'eau

9h43 : Arrivé sur le site de mise à l'eau, déroulage du flotteur de suivi avec mise à l'eau

9h44 : Mise à l'eau VVP 43°15,731'N 5°18,212'E

9h45 : Ecartement de la boué flottante

9h53 : Mise en arrière du bateau a cause de la dérive

9h54 : Plongée du VVP

10h08 : VVP en surface, début de vent

10h18 : Plongée du VVP

10h32 : VVP en surface

10h33 : Repêchage du VVP

10h34 : VVP sur le pont et récupération de la boué flottante

10h37 : décapsulage de la carte Arduino