

le c**nam** intechmer

Rapport de stage

présenté par

Margaux DUFOSSE

Promotion Lucien LAUBIER 2018-2021



Développement et caractérisation du profileur de vitesses verticales VVP (Vertical Velocity Profiler)

Stage de fin d'études pour l'obtention du diplôme de **Cadre Technique** *Génie de l'environnement marin*

Maîtres de stage : Stéphanie BARRILLON et Jean-Luc FUDA

Date de stage : du 19/04/2021 au 31/09/2021

Organisme : M.I.O. Campus de Luminy - 163, avenue de Luminy - Bâtiment Méditerranée - MARSEILLE cedex 9 04 86 09 05 00

Boulevard de Collignon - Tourlaville - 50110 Cherbourg-en-Cotentin

Remerciements

Je souhaite tout d'abord remercier infiniment mes maîtres de stage Stéphanie Barrillon et Jean-Luc Fuda pour leur gentillesse, leur accueil, pour leur accompagnement et leur disponibilité durant ce stage. Je les remercie d'avoir pris de leur temps pour partager leur passion, leur projet et enfin merci pour leurs nombreux encouragements. Ce fut un plaisir de travailler à vos côtés, j'espère avoir l'occasion de réitérer cette expérience.

Ensuite je tiens à remercier tout particulièrement Caroline Comby pour son aide précieuse dans le traitement des données et l'utilisation de Python, sans elle ce stage n'aurait semblé bien plus dur. Elle a toujours été présente pour répondre à mes nombreuses interrogations et pour cela merci. Ce fut un plaisir de partager le bureau avec toi dans la bonne humeur et la sympathie.

Par ailleurs, je remercie Claire Raffaelli pour son aide essentielle dans la préparation de la manipulation de la Comex et pour sa gentillesse.

De plus, je remercie Patrice Le Gal qui m'a fait découvrir son métier passionnant de chercheur en hydrodynamique et m'a aidé à de nombreuses reprises lors de l'analyse de la dynamique du VVP.

Je compte également remercier Michel Lafont pour son aide lors des manipulations en atelier ainsi que l'équipe du SAM.

Merci également à Anne Petrenko et Charlotte Cunci pour leurs aides lors du traitement des données et leurs conseils.

Enfin, je tiens à adresser mes remerciements les plus chaleureux à l'ensemble de l'équipe étudiant la dynamique à fines échelles au sein de l'équipe OPLC pour cet accueil et cette super ambiance de travail durant les manipulations et les nombreuses réunions en visio.

Je remercie le M.I.O. via l'AT Couplage VVP (PI. J.-L. Fuda), et l'équipe OPLC pour le financement de ce stage. Grâce à vous tous je sais maintenant vers quoi m'orienter pour mes projets futurs.

Table des matières

Remerciements	
Liste des figures	
Glossaire	
Présentation générale de la structure et des activités confiées	1
Introduction	3
Matériel et méthodes	5
A) Le Vertical Velocity Profiler (VVP)	5
1. Description	5
2. Principe de fonctionnement	7
3. CTD et ses différents capteurs	9
4. Largueurs à glace et hélice	11
5. Effet de sillage	12
B) Sorties en mer	13
1. Étapes préliminaires	13
2. Manipulations	13
C) Soufflerie	14
1. Description	14
2. Étapes préliminaires	15
3. Manipulations	17
D) Fosse Comex	
1. Étapes préliminaires	19
2. Manipulations	23
E) Traitements	25
Résultats	27
A) Sorties en mer	27
B) Soufflerie	30
C) Fosse Comex	31
1. Caractérisation de l'effet de sillage	31
2. Coefficient de traînée	
3. Effet de seiche	
Discussion	42
A) Mise en avant et caractérisation de l'effet de sillage	42

B)	Solutions mises en œuvre pour limiter l'effet de sillage	43
C)	Caractérisation du VVP	46
Conclu	usion et perspectives	47
Bibliog	graphie	49
Liste d	les annexes	I
Résum	né	
Abstra	ict	

Liste des figures

Figure 1 : Diagramme de Gantt des tâches réalisées durant le stage. * = réunion	2
Figure 2 : Schéma du premier prototype du VVP. Source : Andrea Doglioli	5
Figure 3 : Schéma du VVP. Source : Jean-Luc Fuda	6
Figure 4 : Schématisation des données de "pitch, roll et heading" du VVP	7
Figure 5 : Schématisation des forces s'appliquant sur le VVP	8
Figure 6 : Photographies légendées de la CTD	.10
Figure 7 : Photographie légendée du largueur à glace	.11
Figure 8 : Photographie de l'hélice du VVP. Source : BlueRobotics	.12
Figure 9 : Photographie du VVP avec carène (en bleu) et bulle (dôme transparent), installé dans la	
soufflerie	.12
Figure 10 : Photographie du navire l'Astroïdes	.13
Figure 11 : Photographie du VVP lors de la sortie en mer du 20 avril 2021	.14
Figure 12 : Schéma légendé de la soufflerie. Source : Hubert Branger	.15
Figure 13 : Photographie de l'intérieur du bassin de la soufflerie. Source : M.I.O	.15
Figure 14 : VVP suspendu lors de la manipulation en soufflerie	.16
Figure 15 : Schématisation des positions de mesure lors des tests à la soufflerie (vue du dessus).	
Source : Caroline Comby	.18
Figure 16 : VVP lors de l'ensemencement	.18
Figure 17 : Schéma et photographie du bassin de la Comex. Source : Comex	.19
Figure 18 : Largueurs à glace lors du test de l'enfoncement de l'insert. A = 4,5 cm, B = 3,5 cm, C = 2,	5
cm et D = 1,5 cm	.20
Figure 19 : VVP rallongé de 12 cm	.21
Figure 20 : Pesée du VVP dans un bac d'eau douce	.22
Figure 21 : Schéma des forces appliquées sur le VVP	.22
Figure 22 : Organigramme des différentes étapes de traitement des données CTD	.25
Figure 23 : Graphique de l'analyse de Fourier sur la plongée 21 du VVP configuration courte avec	
carène	.26
Figure 24 : Graphique comparatif de la profondeur en fonction de la vitesse pour les différentes	
sorties en mer	.27
Figure 25 : Graphique comparatif de la période des courbes de vitesse en fonction de la vitesse	.28
Figure 26 : Graphique comparatif de l'amplitude des courbes de vitesse en fonction de la vitesse	.29
Figure 27 : Photographie de la manipulation en soufflerie (vue de coté)	.30
Figure 28 : Graphiques de la vitesse en fonction du temps pour différentes configurations du VVP	.31
Figure 29 : Graphique de l'amplitude en fonction de la vitesse selon les différentes configurations d	lu
VVP	.32
Figure 30 : Spectres en période de l'analyse de Fourier selon les différentes configurations du VVP	.33
Figure 31 : Graphique des périodes en fonction de la vitesse selon les différentes configurations du	I
VVP	.34
Figure 32 : Graphique Colorplot de la période en fonction de la vitesse du VVP avec en couleur les	
intensités du spectre de l'analyse de Fourier	.35
Figure 33 : Graphique annoté du nombre de Strouhal en fonction du nombre de Reynolds. Source o	des
annotations : Patrice Le Gal. H = harmoniques d'oscillation du VVP	.37

Figure 34 : Graphique de la vitesse du VVP en fonction de son poids dans l'eau. Source : Stéphanie	
Barrillon	.39
Figure 35 : Spectre de l'analyse de Fourier sur les données de la CTD du fond de la fosse	.41
Figure 36 : Graphique du nombre de Strouhal de cylindres infinis de différentes sections en fonction	n
du nombre de Reynolds. Source : Wikipédia	.42
Figure 37 : Graphique du nombre de Strouhal en fonction du nombre de Reynolds avec courbes de	
périodes pour le VVP sans carène	.45

Glossaire

Termes	Définitions	Formules
Coefficient de traînée (Cd)	Nombre sans dimension utilisé pour quantifier la traînée ou la résistance d'un objet dans un fluide, tel que l'air ou l'eau.	$Cd = \frac{F_d}{\frac{1}{2} \times \rho \times w^2 \times S} \text{ où :}$ • Fd = Force de traînée (N) • ρ = masse volumique du fluide (kg/m ³) • w = vitesse de l'objet (m/s) • S = surface frontale de l'objet (m ²)
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique (organisme public de recherche)	
M.I.O.	Institut Méditerranéen d'Océanologie	
Nombre de Reynolds	Nombre sans dimension caractérisant un écoulement, en particulier la nature de son régime	Re = $\frac{w_{vvp} \times D}{v}$ où : • w_{vvp} = vitesse du VVP (m/s) • D = diamètre du VVP (m) • v = viscosité cinématique du fluide (m ² /s)
Nombre de Strouhal	Nombre sans dimension décrivant les mécanismes de circulation oscillante	St = $\frac{F \times D}{w_{vvp}}$ où : • F = Fréquences obtenues avec la transformée de Fourier (Hz) • D = diamètre du VVP (m) • w_{vvp} = vitesse du VVP (m/s)
VVP	Vertical Velocity Profiler	

Présentation générale de la structure et des activités confiées

Le M.I.O, Institut Méditerranéen d'Océanologie, est un laboratoire de recherche spécialisé dans l'étude et la compréhension des phénomènes mis en œuvre dans les océans. Il compte plus de 250 personnes dont une centaine de chercheurs et enseignants-chercheurs (CNRS, Université d'Aix-Marseille, Université de Toulon et IRD) et est implanté sur divers sites tels que le campus de Marseille-Luminy, l'Université de Toulon, la Base Marine d'IFREMER à la Seynesur-Mer et le Centre IRD de Nouméa.

Le M.I.O s'intéresse à de multiples thématiques alliant des disciplines comme la microbiologie, la biologie, la géochimie et la physique, telles que :

- la pollution marine et l'impact de l'homme sur le milieu marin

- l'étude du dynamisme et de la circulation océanique à diverses échelles

- l'étude de la biodiversité des écosystèmes marins dans leur ensemble.

Ses objectifs sont de mieux comprendre le système océanique et son évolution en réponse au changement global. Pour cela les scientifiques au sein du M.I.O. sont répartis parmi cinq équipes : OPLC (Océanographie Physique, Littorale et Côtière), CE (Chimie Environnementale – analytique et optique marine), MEB (Microbiologie Environnementale et Biotechnologie), CYBELE (Cycles Biogéochimiques – rôle des assemblages de microorganismes planctoniques), EMBIO (Écologie Marine et BIOdiversité) (voir organigramme du M.I.O. en *Annexe I*). Ces équipes travaillent conjointement sur des thématiques généralement pluridisciplinaires. Certaines thématiques pluridisciplinaires sont effectuées au sein des axes transverses (voir sur l'*Annexe I*). De plus, le laboratoire dispose de six plateformes analytiques lui permettant d'effectuer l'ensemble des tests lors de la préparation des campagnes, mais également d'analyser les échantillons récupérés au cours de ces dernières.

Lors de ce stage, je me suis intégrée dans l'équipe OPLC avec comme maîtres de stage Stéphanie Barrillon (chercheur CNRS) et Jean-Luc Fuda (ingénieur de recherche CNRS). Je partageais le bureau avec Caroline Comby en 1^{ère} année de thèse sur les vitesses verticales, qui m'a elle aussi beaucoup aidée durant ce stage. Les différentes tâches effectuées lors de ce stage étaient très variées. En premier lieu, le travail de terrain a été important, avec les différentes manipulations en mer, en soufflerie et à la fosse de la Comex. En amont de celles-ci, un travail d'atelier avec une préparation du matériel et des modifications au VVP a été réalisé. Enfin une partie plus informatique, durant laquelle j'ai traité avec Python les données issues des différentes manipulations (voir plus en détail dans la sous-partie *Traitement* de Matériel et Méthodes) et participé à de nombreuses réunions. La distribution de ces tâches est détaillée sur la *Figure 1*.



*Figure 1 : Diagramme de Gantt des tâches réalisées durant le stage. * = réunion*

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. Cette thématique est d'actualité en océanographie physique, l'intérêt croissant pour la dynamique des fines échelles lors de la dernière décennie ayant remis à l'ordre du jour le besoin d'informations sur cette composante verticale de vitesse.

Les fines échelles océaniques regroupent les processus de méso-échelle (avec des structures de taille comprise entre 50 et 100 km et de durée de vie de quelques semaines à plusieurs mois) et de sous-méso-échelle (avec une échelle spatiale horizontale couvrant 0,1 à 50 km, une échelle spatiale verticale pouvant s'étendre de 0,1 à 1 km de profondeur, ainsi qu'une durée de vie allant de quelques jours à quelques semaines) (Ferrari and Wunsch, 2009). En outre, les structures associées, telles que des tourbillons ou des fronts, peuvent être agéostrophiques, leur dynamique devenant alors nécessairement tridimensionnelle (Capet *et al.*, 2008, McWilliams, 2016), avec la présence de vitesses verticales. La compréhension de ces vitesses verticales est un point critique pour la compréhension des échanges verticaux.

La mesure des vitesses verticales constitue un sujet d'étude récent car celles-ci ont longtemps été négligées, considérées comme non mesurables ou encore paramétrées de façon simple, en raison de leur faible intensité par rapport à celle des composantes horizontales et des difficultés de leur estimation *in situ*. Les différentes études menées (à l'aide de modèles principalement) ont mis en avant le rôle clé de la composante verticale des courants dans l'équilibre global des océans et ses impacts par rapport au changement climatique. En effet, avec l'émergence de la problématique du réchauffement climatique lié à la modification du cycle du carbone par les activités anthropiques, l'impact des courants verticaux sur l'efficacité de la pompe biologique a été mis en avant. Par ailleurs, les courants verticaux influencent également la dynamique des flux verticaux des éléments nutritifs et du plancton. L'estimation des vitesses verticales apporte donc une information essentielle pour une meilleure représentation de la production biologique et des budgets biogéochimiques (Martin *et al.*, 2001, Lévy et al., 2012, Mahadevan, 2016, McGillicuddy, 2016, Rousselet *et al.*, 2019).

La mesure in situ des vitesses verticales représente un des plus grands défis de l'océanographie actuelle, principalement à cause de leur caractère éphémère (Petrenko et al., 2017), et de leur faible ordre de grandeur (mm/s à quelques cm/s). Les méthodologies pour atteindre cette mesure sont en cours de développement. L'approche la plus classique est l'estimation indirecte à l'aide de la version Q-vector de l'équation omega (Fiekas et al. 1994, Strass 1994), valable uniquement dans le cadre de l'approximation quasi-géostrophique. Les méthodes utilisant des ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), en mouillage ou en profil (L-ADCP) sont quelquefois utilisées, principalement en présence de vitesses verticales importantes (Dickey 2003, Thurnherr 2011). Les mesures issues des gliders (planneurs sousmarins) évaluent la vitesse verticale par déviation de la vitesse verticale prédite par un modèle de vol (Margirier et al. 2017, Fuda et al. 2013, Frajka-Williams et al. 2011, Merckelbach et al. 2010). Un réseau de mouillages fixes avec une vitesse verticale dérivée de l'équation de densité non diffusive peut également approcher cette mesure, mais cette technique ne peut pas être employée dans une démarche lagrangienne, à partir d'un bateau guidé par une stratégie adaptative de suivi de masses d'eau. Récemment, les flotteurs dérivants de subsurface comme les bouées lagrangiennes ou les balises Argos ont montré des résultats prometteurs (d'Asaro et al 2017).

La campagne FUMSECK (*Facilities for Updating the Mediterranean Submesoscale-Ecosystem Coupling Knowledge*, Barrillon. 2019), réalisée au printemps 2019 en mer Ligure, a testé diverses innovations technologiques pour l'étude de la dynamique à fines échelles et son couplage avec la biogéochimie. Durant cette campagne plusieurs méthodes de mesure des vitesses verticales ont été exploitées, à l'aide de différents ADCP (ADCP de coque, L-ADCP et Sentinel V (5 faisceaux) à profondeur fixe et en profil, FF-ADCP (Free Fall-ADCP) en chute libre), de gliders et du prototype de profileur de vitesses verticales VVP (*Vertical Velocity Profiler*), le sujet de ce stage.

Les essais menés lors du développement du VVP ont mis en évidence une instabilité du profileur, due vraisemblablement à un effet de sillage. Cette instabilité se traduit par une fluctuation sinusoïdale de la vitesse de remontée. Cet effet de mouvement vertical parasite est très probablement induit par le détachement périodique des tourbillons de sillage qui se

forment en aval du disque de friction. La problématique de ce stage est donc la suivante : est ce que les instabilités sont dues à un effet de sillage ? ; si oui comment les diminuer, voir les neutraliser ?

L'objectif de ce stage consiste donc à effectuer des tests de terrain (en mer, en soufflerie, et en bassin) et à analyser et interpréter les données issues de ces tests. Cela permettra de caractériser l'effet de sillage et les possibilités de s'en extraire, ou du moins de le minimiser le plus efficacement possible, soit par la modification de l'instrument (par l'ajout d'une carène et/ou d'une bulle), soit par le traitement analytique (filtres passe-bas).

Matériel et méthodes

A) Le Vertical Velocity Profiler (VVP)

1. Description

Le VVP (*Vertical Velocity Profiler*) est un instrument développé au M.I.O. sur la base de la mesure des vitesses verticales issue de gliders (Margirier et al., 2017, Fuda et al., 2013, FrajkaWilliams et al., Merckelbach et al., 2010), par déviation par rapport à un modèle de vol. Il s'agit d'un dispositif autonome de mesure de vitesses verticales, il fut utilisé pour la première fois en 2019 et notamment lors de la campagne FUMSECK au printemps 2019 mais sous une autre forme qu'actuellement, c'était le premier prototype, voir *Figure 2*.



Figure 2 : Schéma du premier prototype du VVP. Source : Andrea Doglioli

Après cette campagne, la forme fut changée sans modification du principe de fonctionnement. Le coefficient de traînée d'une sphère (ancienne version) varie selon le nombre de Reynolds, or pour la détermination d'une vitesse verticale, l'idéal est d'avoir un coefficient de traînée non variable. La nouvelle forme choisie fut un disque frottant, avec une valeur théorique de coefficient de traînée autour de 1 ne variant pas en fonction du nombre de Reynolds (*équations* analytiques. *Clift, Grace et Weber 1978*). Il se présente maintenant comme sur la *Figure 3*.



Figure 3 : Schéma du VVP. Source : Jean-Luc Fuda

Le VVP est constitué d'un disque en PVC de 52 cm de diamètre au-dessus de 6 flotteurs pouvant aller à une profondeur de 500m, permettant au VVP dans son ensemble d'être légèrement flottant. Un second disque plus petit que le précédent est fixé sous les flotteurs (AA sur la Figure 3). Un troisième disque permet la fixation de quatre tiges filetées en acier inoxydable, sur lesquelles sont montés le support pour une hélice et une CTD (Conductivity Temperature Depth, sonde mesurant la conductivité, la température et la profondeur) à l'extrémité inférieure. Le VVP est également équipé d'un largueur à glace et de lest (détaillé plus bas). Sur le haut du VVP se trouve un dôme (en bleu sur la Figure 3) refermant un traqueur SPOT GPS, dispositif alimenté par une pile permettant d'avoir la position précise du VVP au centimètre près. Les données de localisation sont actualisées toutes les 10 minutes et il est possible de les récupérer via le site internet findmespot.com ou sur l'application mobile. Sous ce dôme se trouve un cylindre renfermant une carte Arduino contrôlant un propulseur et un accéléromètre permettant l'évaluation des valeurs de « pitch, roll et heading », respectivement la rotation par rapport à l'axe x, y et z dans le référentiel de la Figure 4. Ces informations indiquent le mouvement du VVP dans l'eau, qui permet d'évaluer s'il pivote ou oscille lors de la remontée.



Figure 4 : Schématisation des données de "pitch, roll et heading" du VVP

2. Principe de fonctionnement

La mesure est réalisée en station. En premier lieu la descente est effectuée jusqu'à une profondeur donnée grâce à deux méthodes possibles : descente libre à l'aide d'un lest jusqu'à sa libération, ou descente forcée par l'hélice (voir *paragraphe A)4.* pour plus de détails). La mesure de vitesse verticale s'effectue à la remontée du VVP, sous le seul effet de sa flottabilité légèrement positive. De retour en surface, le VVP est repéré à l'aide du SPOT GPS et récupéré

à bord. Dans le cas de l'utilisation de l'hélice qui est pilotée par une carte Arduino, plusieurs profils successifs à une profondeur choisie peuvent être programmés sans nécessité de récupérer l'instrument à bord entre chaque plongée.

La mesure de la vitesse verticale océanique s'inspire des mesures effectuées par les gliders : l'appareil remonte à une vitesse qui ne dépend que de ses propriétés physiques (volume, poids, coefficient de traînée) et de la densité de l'eau de mer. Tout écart par rapport à la vitesse verticale théorique, prédite par l'équilibre mécanique entre le poids, la traînée hydrodynamique et la poussée d'Archimède, est considérée comme vitesse verticale. Pour pouvoir déterminer la vitesse théorique du VVP, on se base sur le bilan des forces s'appliquant sur le VVP :

- Le poids :

 $\vec{P} = m_{vvp} \times \vec{g}$ Avec m_{VVP} = masse du VVP (kg), mesuré en atelier \vec{g} = constante d'attraction gravitationnelle = 9,81 m.s⁻²

- La poussée d'Archimède :

$$\overrightarrow{P_a} = \rho_{\text{eau}} \times V \times (-\overrightarrow{g})$$

Avec ρ_{eau} = masse volumique de l'eau (kg.m⁻³), mesurée grâce à la CTD V= volume du VVP dans l'eau, mesuré en atelier grâce à un ballastage $-\vec{g}$ car poussée d'Archimède dans le sens inverse des autres forces



Figure 5 : Schématisation des forces s'appliquant sur le VVP

- La force de traînée :

 $\vec{T} = \frac{1}{2}\rho_{eau} \times S \times Cd \times w_{th}^2 \times \vec{k}$ Avec S = surface = ΠR^2 (m²) Cd = coefficient de traînée, déterminé grâce aux tests en fosse (partie C) w_{th} = vitesse verticale théorique de l'instrument (m.s⁻¹) \vec{k} = vecteur unitaire vertical vers le haut D'après la seconde loi de Newton nous savons que : $\sum \vec{F} = m imes \vec{a}$

Or ici, nous supposons la vitesse de chute de remontée quasi-constante, soit : $m \times \vec{a} \cong \vec{0}$ Ainsi nous obtenons : $\vec{P_a} + \vec{T} + \vec{P} = \vec{0}$, nous pouvons ainsi déterminer une valeur de vitesse théorique de l'instrument (modèle de vol) :

$$\Leftrightarrow |\overrightarrow{T}| = |\overrightarrow{P_a}| - |\overrightarrow{P}|$$
$$\Leftrightarrow \frac{1}{2}\rho_{eau} \times S \times Cd \times w_{th^2} = |\overrightarrow{P_a}| - |\overrightarrow{P}|$$
$$\Leftrightarrow w_{th} = \sqrt{\frac{2(|\overrightarrow{P_a}| - |\overrightarrow{P}|)}{\rho_{eau} \times S \times C_d}}$$

Par ailleurs, la vitesse verticale *in situ* de l'instrument est mesurée grâce à la CTD (décrite dans le paragraphe suivant), par le calcul suivant :

d'après la loi fondamentale de l'hydrostatique, l'équilibre hydrostatique se définit comme :

$$\frac{d_P}{dz} = \rho \times g$$
 où :

- *p* est la pression ;
- z est la profondeur ;
- ρ est la masse volumique du système (ici l'eau de mer);
- g est l'accélération de la pesanteur.

On a alors, en négligeant la pression dynamique : $p_{CTD} = \rho \times g \times z$ et $w_{CTD} = \Delta z / \Delta t$.

La différence entre w_{th} et w_{CTD} pourra alors être interprétée comme une vitesse verticale de courant, ayant pour effet de ralentir ou accélérer le VVP par rapport à sa vitesse théorique.

3. CTD et ses différents capteurs

Une CTD est un instrument utilisé en océanographie physique. C'est une sonde mesurant la conductivité et la température de l'eau, et la profondeur (grâce à une valeur de pression). La CTD installée sur le VVP est une Concerto RBR, c'est l'une des plus performantes du marché.

Elle mesure 50cm, pèse environ 200g dans l'eau, peut être alimentée par piles alcalines ou au lithium et résiste à une profondeur de 750m (Fiche technique en *Annexe II*). Elle échantillonne à 2Hz c'est à dire 2 mesures par seconde. Elle se présente comme sur la *Figure 6*.



Figure 6 : Photographies légendées de la CTD

La conductivité est mesurée grâce à des cellules de conductivité inductives (1 sur la *Figure 6*), ici il s'agit d'une bobine de fil logée dans un cylindre en céramique de 5cm de diamètre, dans les cas les plus courants il y a deux bobines. En mesure de conductivité inductive à transformateur unique, une extrémité de la bobine engendre un champ magnétique alternatif qui induit une tension électrique dans un liquide. Les ions présents dans le liquide sont traversés par un courant, qui augmente avec la concentration des ions. Le courant dans le liquide engendre alors dans l'autre extrémité de la bobine un champ magnétique alternatif. Le courant d'induction ainsi engendré est mesuré et on en déduit une valeur de conductivité (M. Le Menn, 2007).

Le capteur de température est une thermistance (un composant électronique dont la résistance électrique varie en fonction de la température) de taille millimétrique enfermée

dans une bille de verre, qui est située à l'intérieur d'un étui métallique qui protège la thermistance des variations de la pression ambiante (2 sur la *Figure 6*). Le capteur mesure donc la résistance électrique et en déduit une valeur de température.

Le capteur de pression à jauge de contrainte est situé sur l'embout du capteur (3 sur la *Figure* 6). La mesure repose sur la conversion d'une grandeur mécanique de déformation de la membrane en signal électrique. Plus il y a de pression, plus la membrane va se déformer et cela va se traduire par un signal électrique moins important et par différence de signal électrique on obtient une valeur de pression. Pour la RBR Concerto, le temps de réponse du capteur de pression est <0,01 s ce qui signifie que les données de pression n'ont pas besoin d'être corrigées pour l'alignement ou le temps de réponse. Les CTD RBR mesurent la pression absolue, qui est la somme de la pression de la mer et de la pression atmosphérique.

4. Largueurs à glace et hélice

Le VVP lors de sa descente utilise soit les largueurs à glace avec un lest soit l'hélice qui est programmée pour le faire descendre à une profondeur souhaitée. Le largueur à glace est un nouveau concept de largage sous-marin simple, robuste et économique qui a vu le jour au début du développement du VVP (et a donné lieu à un brevet par Jean-Luc Fuda). Il est basé sur la libération contrôlée dans le temps d'un insert en métal pris dans la glace (voir sur la *Figure 7*). L'hélice (propulseur T200 BlueRobotics, *Figure 8*) est pilotée par une carte Arduino connectée à une sonde de pression qui permet de couper l'alimentation lorsque la valeur de consigne est atteinte. Une fois l'hélice stoppée, le VVP remonte seul grâce à sa flottabilité propre.



Figure 7 : Photographie légendée du largueur à glace



Figure 8 : Photographie de l'hélice du VVP. Source : BlueRobotics

5. Effet de sillage

À la suite des premiers tests en mer, des oscillations inattendues de la vitesse de remontée du VVP, pouvant être interprétées à tort comme des vitesses verticales océaniques, ont été observées. En effet, la zone de mesure n'est pas propice à la présence de vitesses verticales d'une part et d'autre part, la réalisation de tests à différents endroits dans la baie de Marseille a montré la présence des mêmes oscillations. Une recherche bibliographique, complétée par l'analyse d'un chercheur hydrodynamicien, ont amené à la conclusion que ces oscillations sont dues à un effet de sillage, c'est-à-dire des turbulences provoquées par la génération de tourbillons derrière le VVP lors de sa remontée. Pour supprimer ou limiter ces effets, l'équipe a élaboré une carène sous le disque principal ainsi qu'une bulle au-dessus (voir sur la Figure 9). Le but de ce stage consiste à effectuer des tests de terrain (en mer, en soufflerie, et en bassin) et à analyser et interpréter les données issues de ces tests. Cela permettra de caractériser l'effet de sillage et les possibilités de s'en extraire. De nombreuses manipulations ont été mises en œuvre : des tests en mer avec les différentes configurations, des tests dans une soufflerie pour quantifier l'effet de sillage et une visualisation grâce à un dispositif fuméelaser et un test dans une fosse d'eau douce de 10m de profondeur pour observer le fonctionnement du VVP sans perturbation extérieure (houle, courants, ondes internes).



Figure 9 : Photographie du VVP avec carène (en bleu) et bulle (dôme transparent), installé dans la soufflerie.

B) Sorties en mer

Le but des sorties en mer est de tester le VVP dans ses conditions d'utilisation normales et de caractériser le signal avec et sans la carène et la bulle. Les tests en mer regroupent les sorties du « VVPTest 2020 » campagne réalisée en septembre 2020, du 17 février 2021 et des 20 et 23 avril 2021.

1. Étapes préliminaires

Avant la sortie en mer, il faut effectuer une préparation minutieuse du matériel et des largueurs à glace. Ils doivent être remplis d'eau et mis au congélateur à -18°c, au moins deux jours avant la manipulation, je m'en suis chargée pour la sortie du 23 avril.

2. Manipulations



Figure 10 : Photographie du navire l'Astroïdes

Les tests se déroulent à bord de l'Astroïdes, navire de 9 mètres appartenant au CNRS (voir *Figure 10*). Il est principalement utilisé par le M.I.O. comme support de plongée et pour effectuer la mise à l'eau et la récupération d'équipements scientifiques légers pour des prélèvements d'eau (bouteille hydrologique type Niskin) et d'organismes (filet à plancton).

La première étape avant de partir en mer est de tester le ballastage du VVP. En effet s'il était trop flottant, il remonterait trop rapidement et la mesure ne serait pas assez précise. La vitesse de remontée souhaitée est de 10cm/s. La détermination du ballastage le plus précis possible afin d'obtenir cette vitesse nominale de remontée est également un des objectifs de ce stage. Pour modifier le poids de l'appareil, la procédure adoptée est d'ajouter ou enlever des mousquetons qui pèsent chacun 57g dans l'eau douce. Le VVP est ensuite mis à l'eau, tenu avec un bout (cordage) assez long et poussé vers le fond avec une gaffe. S'il ne remonte pas c'est qu'il est trop lourd et n'a pas suffisamment de flottabilité, il faut par conséquent retirer un ou plusieurs mousquetons. L'opération est répétée jusqu'à obtenir un VVP juste flottant. Avant de mettre le VVP à l'eau nous allumons la CTD, un lest d'environ 1kg est attaché au largueur à glace (conservé dans une glacière contenant des packs de glace) et ce dernier est maintenu à l'aide du mousqueton se situant en bas du VVP. Une fois le VVP à l'eau (comme sur la *Figure 11*), j'avais pour mission de relever les coordonnées GPS précises, l'état de la mer, le numéro de plongée, la configuration du VVP (avec carène, bulle ou non), l'heure de mise à l'eau et de remontée et la distance à laquelle il est remonté par rapport au point de mise à l'eau (évaluée grâce au GPS du navire) pour le logbook (voir *Annexe III*). Le logbook est un document résumant toutes les opérations effectuées et les conditions associées. Il doit être rédigé le plus précisément possible pour que chacun des collaborateurs puisse l'utiliser pour analyser les données.



Une plongée dure environ 20 minutes, elle comprend le temps de la descente, le temps au fond qui correspond au temps pris par le largueur pour fondre puis libérer l'insert en métal et le temps de remontée. Si le VVP n'est pas visible à l'œil nu lorsqu'il est en surface, on peut le localiser à l'aide du traqueur GPS SPOT.

Figure 11 : Photographie du VVP lors de la sortie en mer du 20 avril 2021

Dans notre cas nous n'avions pas utilisé l'hélice. Entre deux plongées il fallait donc récupérer le VVP à bord pour récupérer le largueur vide et en

mettre un nouveau. Une fois la sortie terminée, nous récupérons les données de la CTD et nous rinçons à l'eau douce tout le matériel. Le traitement des données est réalisé selon une routine détaillée dans la partie E).

C) Soufflerie

1. Description

L'objectif principal de cette manipulation en soufflerie était de caractériser l'effet de sillage de l'instrument. Nous avons pour cela mis en évidence les tourbillons de sillage et mesuré leur fréquence d'émission en fonction de la configuration (avec ou sans carène d'un côté, avec ou sans bulle de l'autre) et de la vitesse du vent. Nous avons également visualisé la trajectoire du fluide à l'aide de fumée et d'un plan laser. La grande soufflerie air-eau située sur le campus de Luminy à Marseille est équipée d'un équipement d'interaction Air-Mer. Mondialement connu, il est conçu pour mener des recherches fondamentales et appliquées dans le domaine des interactions air-mer, de la mécanique des fluides classique et environnementale ainsi que du génie éolien, océanique et côtier. Il s'agit d'un grand bassin d'eau (vide lors de nos manipulations) alimenté en vent par une soufflerie à circuit fermé (voir *Figures 12 et 13*). L'installation fonctionne depuis 1972.



Figure 13 : Photographie de l'intérieur du bassin de la soufflerie. Source : M.I.O.



Figure 12 : Schéma légendé de la soufflerie. Source : Hubert Branger

2. Étapes préliminaires

Les tests en soufflerie se sont déroulés les 29 et 30 avril 2021. Avant d'effectuer ces tests le VVP a dû être suspendu à l'horizontale à l'intérieur du bassin. Pour cela nous l'avons fixé aux extrémités, au-dessus et en dessous (4 câbles sur les côtés, un vers le haut et un vers le sol) pour qu'il ne puisse pas bouger malgré le vent (voir sur la *Figure 14*). Nous aurions pu le laisser plus lâche, pour être le fidèle plus possible à son fonctionnement en mer, sa remontée en mer

étant libre de déplacements horizontaux et verticaux, mais il aurait toutefois été difficile d'obtenir un mouvement équivalent en soufflerie.



Figure 14 : VVP suspendu lors de la manipulation en soufflerie

Le second appareil installé est un anémomètre sonique (Marque GILL). Il mesure, à l'aide de la vitesse du son dans l'air, une valeur de vitesse du vent selon 3 axes orthogonaux. Il sert de référence pour calibrer l'anémomètre à fil chaud et pour mesurer le vent en entrée du canal.

Nous installons également un anémomètre à fil chaud, il s'agit d'un capteur fixé sur un pied et relié à un ordinateur possédant un système d'acquisition des données. Nous le déplaçons à différents endroits dans le sillage du VVP pour ainsi caractériser les tourbillons de sillage (extension spatiale, fréquence et énergie). Le principe de fonctionnement de l'anémométrie à fil chaud consiste à mesurer la puissance transférée depuis un fil fin chauffé par effet Joule (150°C pour cet anémomètre Dantec) et refroidi par le passage du fluide. La puissance emportée par le fluide donne donc une mesure indirecte du module de la vitesse de l'écoulement (mais pas de sa direction).

Pour finir, nous effectuons la mise en place de l'ensemenceur de fumée. Cet appareil est équipé de 4 buses immergées dans de l'huile d'olive. Sous l'apport de pression d'air (4 jets par buse) l'huile va être atomisée sous la forme de gouttelettes d'un micron de diamètre environ. Nous allons donc avoir formation d'un nuage de gouttelettes semblable à de la fumée qui va nous permettre d'observer les tourbillons de sillage. L'ajout d'un plan laser apporte encore plus de visibilité.

3. Manipulations

Une fois tout le matériel en place, les manipulations peuvent débuter. On règle le vent dans la soufflerie à 1,5m/s car l'on veut avoir le même nombre de Reynolds qu'en mer (vitesse optimale du VVP 10cm/s) pour avoir le même comportement, or on sait que :

Re =w × D/v où :

- w = vitesse du VVP (m/s)
- D = diamètre du VVP (m)
- v = viscosité cinématique du fluide (m²/s)

Donc pour avoir le même nombre de Reynolds on a :

 $\frac{w_{air}}{v_{air}} = \frac{w_{eau}}{v_{eau}}$ (car le diamètre du VVP reste inchangé)

$$w_{air} = \frac{w_{eau} \times v_{air}}{v_{eau}} = \frac{0.1 \times (1.5 \times 10^{-5})}{10^{-6}} = 1.5 \text{ m/s}$$

La première manipulation consiste à envoyer un vent constant horizontal face au VVP (suspendu à l'horizontale) avec une acquisition de l'anémomètre à fil chaud pendant 5 minutes. Nous changeons la position de l'anémomètre selon un quadrillage bien défini (voir *Figure 15*). Dans cette première phase le VVP est en configuration sans carène et sans bulle et nous ne changeons pas la valeur du vent, le but étant d'estimer la distribution spatiale des tourbillons à différents endroits autour du VVP en conditions normales d'utilisation. Dans la seconde phase nous plaçons l'anémomètre en position 4 (voir *Figure 15*) car c'est à cette position que nous avons observé les tourbillons les plus énergétiques, et nous faisons varier la valeur du vent en gardant une acquisition de 5 minutes. Nous avons testé des vitesses de vent de 1,5, 2,7 et 3 m/s (correspondant à 10cm/s, 18 cm/s et 20 cm/s en mer). Nous effectuons cette dernière phase pour les quatre configurations différentes, combinant l'absence et la présence de la carène et de la bulle.



Figure 15 : Schématisation des positions de mesure lors des tests à la soufflerie (vue du dessus). Source : Caroline Comby

La seconde manipulation consiste à visualiser les tourbillons crées par l'effet de sillage du VVP. Pour cela nous utilisons le plan laser et l'ensemenceur. Il faut environ 15 minutes vent éteint pour avoir un nuage de fumée suffisant pour que la visualisation soit correcte (voir *Figure 16*). Nous allumons ensuite le laser et la soufflerie avec une valeur de vent comprise entre 0,46 et 2,7 m/s, tout en laissant l'ensemenceur allumé. La prise de vidéos est effectuée par différents membres de l'équipe selon différents plans pour avoir une



Figure 16 : VVP lors de l'ensemencement

visualisation globale des phénomènes. La manipulation est effectuée sur le VVP avec la carène et avec carène et bulle.

De retour au laboratoire, une analyse des vidéos est effectuée. Je me suis occupée de mettre au ralenti les vidéos et j'ai également rédigé une ébauche de news pour les sites web et les réseaux sociaux (voir *Annexe IV*).

D) Fosse Comex

L'objectif principal de cette manipulation est de caractériser le fonctionnement et les mesures du VVP dans une fosse de 10 mètres de profondeur, dans une eau au repos, sans perturbation extérieure due à la houle, aux ondes internes ou aux courants, avec une vitesse verticale du courant nulle ou quasi-nulle. De plus nous allons calculer le coefficient de traînée pour ainsi avoir un modèle de vol très précis.

La Comex (Compagnie Maritime d'Expertises), fondée en 1961 à Marseille, est une pionnière mondiale dans le développement des technologies pour l'intervention humaine et robotique dans des environnements extrêmes (hypobare et hyperbare principalement). Elle dispose d'un bassin d'essai avec une fosse de 10 mètres de profondeur (voir *Figure 17*).

Les tests ont eu lieu les 2 et 3 juin 2021.



Figure 17 : Schéma et photographie du bassin de la Comex. Source : Comex

1. Étapes préliminaires

Une intense préparation qui a duré plusieurs semaines fut nécessaire pour mener à bien la série d'essais à la Comex. Durant cette période, j'étais en autonomie et voici les différentes tâches que j'ai effectuées :

- Inventaire du matériel disponible, commandes et achat du matériel manquant. Le nombre de largueurs disponibles était de 7, nombre suffisant pour les tests en mer car souvent 6 profils étaient effectués. Ils ont l'avantage d'être réutilisables, nécessitant seulement un nouvel insert en métal et un lest. Pour les tests à la Comex nous n'avons pas utilisé l'hélice car son utilisation dans un milieu confiné comme la fosse aurait créé des perturbations et donc faussé les mesures. Pour ces essais en fosse étalés sur 2 jours, il nous fallait 30 largueurs supplémentaires.
- Tests de durée de largage de l'insert en fonction du remplissage du largueur et de l'enfoncement de l'insert. Pour cela il fallait placer à différentes hauteurs l'insert en métal (voir *Figure 18*) ou remplir à différents niveaux le largueur en PVC (bord supérieur, milieu ou bord inférieur de la partie serrée du largueur), et les placer au congélateur pendant une nuit. Le lendemain dans un bac d'eau, j'ai chronométré le temps mis par la glace pour libérer l'insert, en sachant que nous souhaitions une durée de largage comprise entre 7 et 10 minutes.



Figure 18 : Largueurs à glace lors du test de l'enfoncement de l'insert. A = 4,5 cm, B = 3,5 cm, C = 2,5 cm et D = 1,5 cm

Préparation des largueurs, des vis et des lests avec l'aide de Claire Raffaelli (stagiaire L2). À la suite des tests nous savions qu'il fallait des inserts enfoncés de 4 cm et un remplissage à mi-hauteur de la partie plus fine du largueur. Nous avons donc préparé 60 inserts, 30 largueurs et plus de 60 lests d'environs 1kg (grosses chaînes découpées).

- Test d'étanchéité des largueurs, ils étaient faits d'un raccord PVC avec un bouchon fixé grâce à de la colle PVC. Une fois celle-ci sèche, il fallait s'assurer qu'il n'y ait aucune perte d'eau.
- Les tests de la Comex servent à comprendre le fonctionnement précis du VVP. Pour cela il fallait qu'il soit dans sa configuration la plus définitive possible. Or, lors des tests en mer, l'équipe a constaté que l'hélice se trouvait trop près de la carène ce qui empêchait son bon fonctionnement. Avec Jean-Luc Fuda nous avons donc rallongé le VVP. Pour cela, nous avons eu besoin de raccords de tige filetée et de tiges filetées de 12 cm. Il a fallu le démonter en entier pour fixer les nouvelles tiges filetées (*Figure 19*).



Figure 19 : VVP rallongé de 12 cm

Mesure du poids du VVP, pour cela nous l'avons pesé à l'aide d'un peson. Il pèse 17,5 kg (+/- 0,5 kg) dans l'air. Pour sa mesure dans l'eau, nous avons dû le suspendre à l'horizontale à des pesons (deux à l'arrière et un à l'avant) dans un bac rempli d'eau douce (voir *Figure 20*). Nous obtenons un poids de 1,58 kg à l'arrière, 0,72 kg à l'avant et 2,20 kg de lestage à l'avant et donc un poids dans l'eau douce de 0,10 kg. Ce poids signifie que le VVP est coulant, nous décidons donc de retirer un poids de 0,50 kg situé sous la CTD on obtient donc un VVP de poids - 0,40 kg.



Figure 20 : Pesée du VVP dans un bac d'eau douce

 Détermination de son volume dans l'eau, grâce à la pesée du VVP dans l'eau et dans l'air.



Figure 21 : Schéma des forces appliquées sur le VVP

Selon l'équation des moments on peut écrire :

$$1580 + |\overrightarrow{P_a}| + 720 = 2200 + 17500$$
$$|\overrightarrow{P_a}| = 2200 + 17500 - 1580 - 720$$
$$\overrightarrow{|P_a|} = 17400 \text{ g}$$

Or on sait que $\overrightarrow{P_a} = \rho_{eau} \times V$ où V = volume de l'appareil

Donc V_{vvp}=
$$\frac{\overrightarrow{P_a}}{\rho eau} = \frac{17400}{1000} = 17,4$$
 l

 Test de flottabilité du VVP dans un bassin d'eau douce avec Stéphanie Barrillon, Jean-Luc Fuda et Claire Raffaelli. Nous avons également fait deux trous sous la carène avec une perceuse pour limiter l'emprisonnement de bulles d'air.

- L'un des objectifs des essais à la Comex est de calculer le coefficient de traînée. Pour cela il faut faire varier la vitesse de remontée du VVP. Pour l'alourdir il suffit d'ajouter sur le bas du VVP des mousquetons qui pèsent chacun 57g dans l'eau douce. Pour ajouter de la flottabilité nous avons découpé des morceaux de polystyrènes (5x5x2cm) de 54g de flottabilité dans l'eau et nous avons installé une chaussette au-dessus de l'hélice pour les contenir dans l'axe du VVP.
- La dernière étape fut de préparer tout le matériel pour la sortie (congélateur, lests, largueurs, cordage, tapis en caoutchouc pour le fond de la fosse car une fois largués les lests tapent sur le fond de la piscine et y restent, support pour les différents appareils de mesure, GoPro, VVP, carène, matériel annexe, caisse à outils).

2. Manipulations

Nous voulions étudier le VVP dans un environnement non perturbé et donc s'assurer que c'était bien le cas. Pour cela de nombreux autres appareils de mesure ont été déployés :

- Une CTD fut placée sur le fond de la fosse, pour enregistrer les données durant les 48 heures de manipulation, en particulier les variations de pression au fond dues aux variations du niveau de l'eau du bassin sous l'effet du vent.
- Un ADV (*Acoustic Doppler Velocimetry*) fixé à 3 mètres de profondeur sur le bord de la fosse, pour enregistrer à haute fréquence (16 Hz) les composantes instantanées de la vitesse en un point unique.
- Des caméras GoPro installées sur le fond, sur le côté au milieu de la fosse et une avec une position variable pour visualiser le VVP sous tous les angles.

Une fois les différents appareils et tapis de protection mis en place par les plongeurs, les essais peuvent commencer. Lors de la première journée nous avons effectué des tests sur le VVP long (c'est-à-dire avec les raccords et les tiges filetés comme sur la *Figure 19*), le matin sans carène et l'après-midi avec carène. Nous n'effectuons pas de test avec la bulle car le VVP remonte trop vite avec celle-ci. Le second jour, le VVP avait été replacé dans son ancienne

configuration avec la même organisation ; sans carène le matin et avec l'après-midi. L'objectif était de tester le VVP avec différentes vitesses de remontée. Nous faisons donc varier le nombre de mousquetons (de 1 à 5) et de polystyrènes (2, 4, 5 et 15). La manipulation se déroulait de la façon suivante :

- Vérification de l'arrêt de la filtration de la piscine
- Allumage de la CTD
- Mise à l'eau du VVP
- Largueur sorti du congélateur et fixation d'un lest
- Fixation du système largueur + lest au VVP
- Mise en place des mousquetons ou polystyrènes
- Mise au centre de la fosse du VVP. Au début, Jean-Luc Fuda et moi allions le déposer au centre en nageant avec des palmes, mais rapidement nous nous sommes rendu compte que les mouvements dans le bassin perturbaient les mesures. Nous avons donc placé le VVP au centre depuis le bord en dehors de la piscine grâce à une gaffe et un cordage
- Descente du VVP sur le fond, il prend entre 7 et 10 minutes pour remonter une fois au fond
- Remontée du VVP avec chronométrage de son temps de remontée, récupération du VVP au bord du bassin (le VVP reste à l'eau), sortie d'un largueur, fixation d'un lest et fixation sur le VVP et repositionnement du VVP au milieu, et ainsi de suite. Nous réalisons des triplicats pour chacune des configurations (ex : 3 essais avec 1 mousqueton).
- Sortie hors de l'eau du VVP et récupération des données de la CTD et de l'accéléromètre lors de la mise en place de la carène et le soir.

Une news fut également rédigée, voir *Annexe V*. À la suite des manipulations, j'ai également repris toutes les données des logbooks papier pour en faire un logbook global informatisé, voir *Annexe VI*.

E) Traitements

Afin d'analyser et de comparer les données de la CTD du VVP lors des différentes manipulations, j'ai dû mettre en place à l'aide de mes maîtres de stage et de Caroline Comby (en 1^{ère} année de thèse sur les vitesses verticales) une routine de traitement Python. Les différentes étapes sont détaillées sur la *Figure 22*.

Étape 1 : récupération des données de la CTD sur PC	Étape 2 : découpe des plongées, sélection de la remontée uniquement pour les essais de la Comex	Étape 3 : calcul de la vitesse de remontée avec $\frac{\Delta z}{\Delta t}$ (voir partie A)3.)
Étape 4 : lissage avec moyenne glissante sur 5 secondes	Étape 5 : analyse de Fourier	Étape 6 : calcul de l'amplitude de l'oscillation dominante
Étape 7 : réalisation de graphiques : périodes vs vitesse de remontée	Étape 8 : calcul du nombre de Strouhal et du nombre de Reynolds	Étape 9 : réalisation de graphiques : nombre de Strouhal vs nombre de Reynolds

Figure 22 : Organigramme des différentes étapes de traitement des données CTD

La CTD récolte de multiples données (voir *Annexe VII*). Nous nous concentrons lors du traitement sur les données de « Time » et « Depth » utiles pour calculer la vitesse.

L'étape 5 permet de mesurer les périodes d'oscillations significatives de la vitesse verticale en s'appuyant sur l'analyse de Fourier. Cet outil mathématique décompose un signal temporel quelconque en une somme de fonctions sinusoïdales, pondérées par des coefficients dits de Fourier.

Le premier graphique de la *Figure 23* représente la vitesse de remontée du VVP en fonction du temps avec en rouge la courbe de lissage sur 5 secondes. On effectue une transformée de Fourier avec la fonction *fft* de la librairie Python *scipy.io* sur les données brutes et sur le lissage. Les deuxième et troisième graphiques représentent le spectre de Fourier en fonction de la fréquence en Hz et en fonction de la période en secondes. Le(s) pic(s) observé(s) sur le dernier graphique correspond(ent) à la (aux) période(s) significative(s) du spectre. Par exemple, le spectre de la plongée 21 montre une oscillation principale de période 14,8 secondes. On effectue ce traitement pour toutes les plongées et on relève toutes les valeurs des pics significatifs.



Figure 23 : Graphique de l'analyse de Fourier sur la plongée 21 du VVP configuration courte avec carène

Le calcul de l'amplitude A de l'étape 6 est réalisé de la façon suivante :

A = (valeur maximale de vitesse - valeur minimale de vitesse) / 2 (en m/s)

Ce calcul est effectué sur la courbe lissée, entre ¼ et ¾ de la série temporelle, afin d'en retirer les phases instables d'accélération (apparaissant en particulier avec la configuration avec carène, voir partie Résultats) et de fin de profil. Ce calcul est automatisé pour ainsi traiter toutes les plongées de la même façon.

Résultats

A) Sorties en mer

Les résultats suivants sont montrés pour les sorties en mer de février et d'avril, à la suite des traitements des différentes données. La *Figure 24* représente la profondeur du VVP en fonction de sa vitesse. Les vitesses sont positives à la descente, négatives à la remontée (rapport $\frac{\Delta z}{\Delta t}$ négatif). Chaque couleur correspond à une configuration ou à un jour différents.



Figure 24 : Graphique comparatif de la profondeur en fonction de la vitesse pour les différentes sorties en mer

De manière générale on voit que le VVP se comporte de la même façon. Il est en surface puis sous le poids du lest descend (courbes de droite) jusqu'au fond. Là il s'immobilise puis remonte avec une vitesse différente selon sa configuration. Les courbes de même couleur correspondant à un triplicat sont superposées ou très similaires, ce qui montre que le VVP a un comportement répétitif et non aléatoire.

Lors de la remontée du VVP (courbes de gauche), phase pendant laquelle les mesures de vitesses verticales sont effectuées, les courbes montrent les oscillations de vitesse avec des périodes et des amplitudes différentes. Par exemple, les 3 courbes violettes qui représentent le VVP avec la bulle et la carène ont une amplitude plus importante et une période d'oscillation également plus grande que les autres courbes. Dans cette configuration, la vitesse de

remontée est de l'ordre de 18 cm/s, ce qui, comparé avec la courbe avec carène et sans bulle du même jour (courbe bleue), montre un effet net de la bulle sur le comportement du VVP. En modifiant son hydrodynamisme, la bulle induit une augmentation de sa vitesse de remontée et un changement de l'amplitude et de la période d'oscillation des vitesses. Les courbes bleues, rouges et noires représentent le VVP avec la carène et sans la bulle, les périodes et les amplitudes des oscillations semblent assez similaires entre elles, malgré des vitesses de remontées différentes. La plongée du 23/04 (bleue) a une vitesse de remontée d'environ 10 cm/s, celle du 20/04 (rouge) de 5 cm/s et celle du 17/02 (noire) de 9 cm/s.

D'autre part, on observe une augmentation de la vitesse de remontée lors des 20 derniers mètres pour toutes les configurations. En particulier, cette augmentation est très visible sur les courbes rouges. Ce phénomène est probablement dû soit à des bulles d'air coincées dans le système dont le volume augmente lors de la remontée, soit à une contraction de certains composants (flotteurs, caisson électronique ...) du VVP en profondeur sous l'effet de la pression. Cet effet semble légèrement moins prononcé lors de la plongée sans carène (verte à 60 mètres). On peut donc émettre l'hypothèse que la carène peut amplifier cette augmentation de vitesse observée sur les 20 derniers mètres. Ce phénomène d'augmentation de la vitesse à la remontée devra être investigué ultérieurement, afin d'être intégré dans le modèle de vol définitif. Si l'on compare maintenant les valeurs de période et d'amplitude des oscillations principales après l'analyse de Fourier, on obtient les *Figures 25 et 26*.





28



Figure 26 : Graphique comparatif de l'amplitude des courbes de vitesse en fonction de la vitesse

On observe que le VVP avec carène et avec bulle a des valeurs de périodes comprises entre 37 et 43 secondes et une amplitude plus élevée que toutes les autres configurations. Les valeurs de période et d'amplitude des profils du 23/04 sont différentes des valeurs des profils correspondants pour les autres jours. On peut donc émettre l'hypothèse que l'état de la mer influe le fonctionnement du VVP au même titre que sa configuration. Cette hypothèse est corroborée par le fait que les données vertes et rouges qui correspondent au même jour sont assez similaires.

Grâce aux sorties en mer on peut dire que la carène et la bulle ont un effet sur la vitesse, ainsi que sur l'amplitude et la période des oscillations du VVP et que les perturbations liées à la houle et au courant influencent le fonctionnement de l'appareil. La bulle implique des vitesses de remontées trop importantes. La carène ne semble pas éliminer ou diminuer les oscillations de sillage.

B) Soufflerie

Lors des manipulations en soufflerie, les prises de photos et vidéos pour observer l'effet de sillage ont été réalisées, comme montré dans la *Figure 27*.



Figure 27 : Photographie de la manipulation en soufflerie (vue de coté)

On observe au centre de la photographie, un tourbillon se formant juste après la carène, puis plus loin des décrochements de tourbillons. Lors de l'analyse des ralentis de toutes les vidéos, nous observons à chaque fois ce même phénomène. Plus la vitesse du vent est importante et plus les tourbillons sont rapides et se détachent tôt. La carène et la bulle n'ont semble-t-il pas d'effet sur cette formation.

L'analyse des données de l'anémomètre à fil chaud a été effectuée par les responsables de la soufflerie (Hubert Branger et Christopher Luneau) ainsi que par notre collaborateur chercheur hydrodynamicien (Patrice Le Gal). La valeur du nombre de Strouhal qui caractérise la dynamique des tourbillons de sillage est d'environ 0,15, pour une période d'environ 32 secondes à une vitesse de 1,5 m/s en soufflerie, qui correspond à 10 cm/s en mer, et à un nombre de Reynolds de 50 000. Ces mesures sont cohérentes avec les essais en mer, confirmant que le sillage est responsable des oscillations de vitesse verticale observées.

C) Fosse Comex

1. Caractérisation de l'effet de sillage

Lors des essais à la Comex, 4 configurations ont été testées pour un total de 66 plongées. Nous voulions déterminer si la longueur du VVP jouait sur les effets de sillage et si la carène atténuait ces derniers. Pour les comparaisons entre configurations, nous utiliserons pour illustration toujours les quatre mêmes plongées avec des valeurs de vitesses de remontée d'environ 10 cm/s. Toutes les plongées apparaitront cependant dans les graphiques généraux de comparaison. La *Figure 28* montre les séries temporelles de la vitesse verticale du VVP pour les quatre configurations des quatre plongées choisies.



Figure 28 : Graphiques de la vitesse en fonction du temps pour différentes configurations du VVP

On observe que les courbes de vitesses (négatives car il s'agit de la remontée) sont assez différentes en fonction des configurations. Le VVP avec carène montre un comportement différent de celui sans carène. Lorsque la carène est présente, on observe au début du profil montant, une diminution de la vitesse pour ensuite revenir à une valeur moyenne d'environ 10 cm/s. Nous retrouvons ce motif « carène » sur toutes les plongées avec carène, que le VVP

soit court ou long. Entre le VVP long sans carène et court sans carène il ne semble pas avoir de différences significatives, des traitements plus poussés ont été nécessaires pour conclure sur l'influence de la longueur du VVP sur les caractéristiques des tourbillons.

Nous avons dans un premier temps étudié l'amplitude des oscillations pour les 66 plongées et nous obtenons la *Figure 29*. Ce graphique représente l'amplitude des oscillations en fonction de la vitesse de remontée du VVP (les vitesses augmentent vers la gauche du graphique). Chaque configuration est représentée avec une couleur différente, le VVP long avec des ronds et le court avec des étoiles, pour une meilleure lisibilité.



Figure 29 : Graphique de l'amplitude en fonction de la vitesse selon les différentes configurations du VVP

Nous observons sur ce graphique deux modes : le VVP avec carène et celui sans carène. Ils ont des comportements très distincts, en effet l'amplitude augmente avec la vitesse pour le VVP avec carène, l'amplitude est stable entre 1 cm/s et 0,5 cm/s pour celui sans carène. La carène semble donc impliquer des oscillations d'amplitudes plus importantes, ce qui est contraire à ce que nous essayons d'obtenir (atténuation de l'amplitude). La longueur ne semble pas avoir d'influence sur l'amplitude de l'oscillation de sillage.

Pour étudier la période des oscillations temporelles de la vitesse, nous avons utilisé la transformée de Fourier (voir *Matériel et Méthode partie E)*). À la suite des traitements des 4 plongées de la *Figure 28*, nous obtenons les spectres de la *Figure 30*.

Les valeurs de périodes en secondes sont représentées sur l'axe des abscisses et les valeurs d'intensités du spectre (densité spectrale d'énergie comprise entre 0 et 0,0055 m².s⁻²/Hz) sur l'axe des ordonnées. En bleu il s'agit du spectre du signal brut (échantillonnage à 2Hz) et en rouge celui du signal lissé sur 5 secondes. Nous représentons les deux mais nous intéressons principalement à la courbe rouge. En effet, nos mesures concernent des processus physiques dont la durée de vie est bien supérieure à 5s. Les hautes fréquences (petites périodes) se trouvent sur la gauche du graphique.



Figure 30 : Spectres en période de l'analyse de Fourier selon les différentes configurations du VVP

On observe sur ces graphiques différents pics ayant des intensités supérieures à la moyenne, représentatifs d'une oscillation du signal à la période associée. Ces périodes sont différentes entre le VVP long et le VVP court. Pour le VVP long, on observe des valeurs de périodes assez similaires avec ou sans la carène. Pour le VVP court, elles sont légèrement différentes avec ou sans la carène. Les valeurs de périodes pour une configuration donnée sont proches de multiples l'une de l'autre, on peut donc émettre l'hypothèse qu'il y a une oscillation fondamentale et que les autres valeurs de périodes sont des harmoniques de celle-ci.

Lors des analyses nous avons mis en avant la difficulté de choisir le ou les pics significatifs des périodes de nos oscillations. De plus, la mauvaise résolution du spectre (dû à la faible durée des remontées / faible profondeur de la fosse) induit une analyse délicate des spectres.

Après avoir relevé manuellement les valeurs de périodes sur les spectres comme dans la *Figure 30* pour les 66 plongées que représentent les essais de la Comex, nous obtenons la *Figure 31*.



Figure 31 : Graphique des périodes en fonction de la vitesse selon les différentes configurations du VVP

Ce graphique représente les périodes des oscillations en fonction de la vitesse du VVP. Chaque configuration est représentée avec un code couleur et une forme. Différentes nuances de couleur correspondent à différentes valeurs de périodes (pics) pour une même vitesse. Aucune différence marquante entre le VVP court et le VVP long en ce qui concerne la période n'est observée : dans les deux cas la période diminue lorsque la vitesse augmente. De plus, la carène ne semble pas avoir d'influence sur la période des oscillations.

Pour pouvoir analyser au mieux les valeurs de périodes sans sélection des pics, nous avons utilisé une approche globale de visualisation de toutes les valeurs de périodes. Nous représentons les périodes en fonction de la vitesse du VVP, avec en 3^{ème} dimension, la valeur d'intensité des spectres (voir *Annexe VIII*). Avec ces graphiques nous prenons en compte de

manière objective toutes les valeurs de périodes car il n'y a pas de sélection manuelle dépendant de l'opérateur. Sur la base des graphiques en 3D, j'ai réalisé des « Colorplots » (3^{ème} dimension représentée en échelle de couleur) pour visualiser au mieux les valeurs de périodes (voir les *Figures 32*).



Figure 32.1 : Graphique Colorplot de la période en fonction de la vitesse du VVP avec en couleur les intensités du spectre de l'analyse de Fourier. VVP long sans carène.



Figure 32.2 : Graphique Colorplot de la période en fonction de la vitesse du VVP avec en couleur les intensités du spectre de l'analyse de Fourier. VVP long avec carène.



Figure 32.3 : Graphique Colorplot de la période en fonction de la vitesse du VVP avec en couleur les intensités du spectre de l'analyse de Fourier. VVP court sans carène



Figure 32.4 : Graphique Colorplot de la période en fonction de la vitesse du VVP avec en couleur les intensités du spectre de l'analyse de Fourier. VVP court avec carène.

On observe pour les quatre configurations que la période diminue avec l'augmentation de la vitesse. Nous avions également fait cette observation avec la *Figure 31*. Les valeurs de périodes les plus hautes pour chaque vitesse correspondent aux pics en fin de spectre en période, peu significatifs. Nous retrouvons de manière récurrente des valeurs de périodes à environ 10 secondes dans la *Figure 31* et dans les *Figures 32*.

Pour déterminer si ces oscillations proviennent de l'effet de sillage du VVP ou de phénomènes extérieurs, nous réalisons la *Figure 33*. Ce graphique représente le nombre de Strouhal en fonction du nombre de Reynolds, les différentes configurations du VVP sont représentées avec des formes et des couleurs différentes.



Figure 33 : Graphique annoté du nombre de Strouhal en fonction du nombre de Reynolds. Source des annotations : Patrice Le Gal. H = harmoniques d'oscillation du VVP

On observe cinq distributions horizontales des points avec un nombre de Strouhal fixe et un nombre de Reynolds croissant. Ce mode de distribution est caractéristique des oscillations propres de sillage de l'objet. Sur la *Figure 36* représentant le nombre de Strouhal en fonction du nombre de Reynolds, on a dans cette zone de Reynolds un nombre de Strouhal plat pour presque toutes les formes. Les oscillations trouvées en soufflerie avaient un nombre de Strouhal entre 0,15 et 0,17. On retrouve ces valeurs sur la *Figure 33* notées en marron, les

autres valeurs semblent être des harmoniques d'oscillation du VVP. En effet, pour la tendance bleue le VVP oscille deux fois moins vite qu'en soufflerie, en rouge et en jaune deux fois et trois fois plus vite. La courbe violette quant à elle représente une tout autre dynamique, le nombre de Strouhal diminue avec l'augmentation du nombre de Reynolds. Cette distribution est caractéristique d'une oscillation induite par un phénomène extérieur. Nous pouvons donc émettre l'hypothèse que le VVP oscille à cause de son sillage, à un nombre de Strouhal constant tout en ayant des harmoniques, mais qu'il oscille également par perturbation due à un phénomène externe.

2. Coefficient de traînée

Pour finir, l'un des objectifs de la Comex était de déterminer le coefficient de traînée en mesurant la vitesse en fonction du poids dans l'eau (= flottabilité = Poussée d'Archimède - Poids).

La *Figure 34* représente la vitesse moyenne de remontée du VVP en fonction de son poids dans l'eau calculé par rapport à l'ajout de mousquetons ou de flotteurs. Les différentes configurations sont représentées avec une couleur différente. Sur ce graphique, des courbes de vitesse en fonction du poids avec différentes valeurs de coefficient de traînée ont été ajoutées, selon la formule :

w = $\sqrt{(2 / \rho / S \times (-P) / Cd)} \times 100 \text{ où}$:

- w = vitesse (cm/s)
- ρ = masse volumique de l'eau douce (km/m³)
- S = surface du disque frottant (m²)
- P = poids du VVP dans l'eau (N)
- Cd = coefficient de traînée, que nous faisons varier



Figure 34 : Graphique de la vitesse du VVP en fonction de son poids dans l'eau. Source : Stéphanie Barrillon

On observe que les valeurs expérimentales de la Comex sont très proches de la courbe pleine avec un coefficient de traînée de 2,1, ce qui donne une très bonne estimation du coefficient de traînée. Cette valeur est éloignée de la valeur du disque frottant, c'est en accord avec les contraintes imposées par sa construction pratique (flotteurs et structures qui augmentent significativement le frottement).

3. Effet de seiche

Lors des analyses des données des sorties en mer et en soufflerie, nous n'avons pas trouvé de périodes d'oscillation du VVP d'environ 10 secondes. Or lors des tests en fosse à la Comex cette valeur était présente sur toutes les analyses de Fourier (spectres et Colorplots de la partie précédente). Sur la figure annotée du nombre de Strouhal en fonction du nombre de Reynolds (*Figure 33*) nous avions observé un mode d'oscillation non intrinsèque au

fonctionnement propre du VVP. À la suite de toutes ces observations, nous avons émis l'hypothèse que cette période d'oscillation à 10 secondes venait d'une perturbation extérieure et plus particulièrement d'un effet de seiche.

L'effet de seiche correspond à une oscillation de l'eau dans un bassin, de forme et de taille quelconques, provoquée par de petites secousses telluriques, par le vent ou par des variations de la pression atmosphérique.

Dans un premier temps, nous effectuons le calcul théorique de la seiche du bassin de la Comex. Nous utilisons pour cela la formule de Merian établie en 1828, qui calcule la période T des ondes stationnaires d'un bassin rectangulaire fermé de profondeur constante de la manière suivante :

$$T = \frac{2L}{n \times \sqrt{(g \times h)}}$$
 où :

- T : périodes des oscillations
- L : longueur de la piscine
- g : accélération de la pesanteur
- h : profondeur de la piscine
- n : nombre entier

Avec n = 1 correspondant à l'oscillation fondamentale

$$T_1 = \frac{2 \times 26,5}{1 \times \sqrt{(9,81 \times 3)}} = 9,77s$$

Avec n = 2 correspondant à la première harmonique

T₂ = 4,88 s

On constate d'après le calcul que la seiche théorique a une période de 9,77 secondes, ce qui correspond à nos observations.

Pour valider notre hypothèse, nous analysons les données de la CTD placée sur le fond de la fosse de la Comex. En faisant une analyse de Fourrier sur les données brutes correspondant aux deux jours, nous obtenons la *Figure 35*.



Figure 35 : Spectre de l'analyse de Fourier sur les données de la CTD du fond de la fosse

Ce graphique représente l'intensité des spectres de l'analyse de Fourier en fonction de la période pour les données de la CTD du fond de la fosse. On observe trois pics principaux donnant des valeurs de périodes d'oscillation de 5s, 8,3s et 9,42s. Cette dernière valeur est très proche de la valeur théorique de la seiche et le 5s correspondrait à la première harmonique.

Lorsque nous appliquons la formule de Merian, nous prenons la longueur de la piscine, mais lorsque nous prenons la largeur on obtient :

T' =
$$\frac{2 \times 23}{1 \times \sqrt{(9,81 \times 3)}}$$
 = 8,48 s or cette valeur se rapproche de la valeur observée sur le spectre à 8,3s.

Il y aurait donc une seiche dans le sens de la longueur mais aussi une dans la largeur.

Pour finir, nous nous intéressons aux données de l'ADV fixé à 3 mètres de profondeur audessus de la fosse. À la suite d'une analyse spectrale de la pression sur l'ADV sur un spectre non moyenné, nous obtenons une période d'oscillation autour de 0,10666 Hz qui correspond à une période de 9,37 s. Le calcul de l'amplitude de cette oscillation donne des valeurs entre 1 mm et 1,6 mm, qui sont en dessous de l'incertitude de la mesure. De plus, nous pouvons considérer qu'il n'y aucune autre oscillation durant les deux jours de mesures.

Nous pouvons donc dire d'après de multiples analyses que la période d'oscillation du VVP d'environ 10 secondes est induite par une seiche dans la fosse de la Comex. Cependant, comme la mesure de la vitesse verticale du VVP est déduite de la mesure de pression, nous ne

pouvons pas en déduire si le VVP a une vitesse qui varie effectivement en synchronisation avec la seiche ou s'il mesure la variation de pression d'eau au-dessus liée à la seiche.

Discussion

A) Mise en avant et caractérisation de l'effet de sillage

De nombreuses manipulations ont été mises en œuvre avec les différentes configurations : les tests en mer, les tests dans la soufflerie et les essais dans la fosse d'eau douce de 10m de profondeur pour observer le comportement du VVP sans perturbation extérieure (houle, courants, ondes internes). Ces manipulations nous ont permis de mettre en évidence un effet de sillage sur le VVP.

Lors des essais en mer, l'effet de sillage avait été soupçonné et demandait donc à être confirmé. C'est lors des tests en soufflerie et notamment lors de la visualisation des tourbillons de sillage grâce à un système fumée-plan laser que nous avons mis cet effet en évidence de manière claire et directe.

Nous avons également pu caractériser cet effet de sillage. En effet, il est associé à un nombre de Strouhal de 0,15 pour un nombre de Reynolds de 50 000 correspondants à une vitesse de remontée du VVP de 10 cm/s. Nous comparons ces valeurs avec le graphique de référence du nombre de Strouhal en fonction du nombre de Reynolds d'après *Blevins et al (Figure 36*).





Ce graphique représente le nombre de Strouhal en fonction du nombre de Reynolds (Re). Chacune des différentes courbes expérimentales représente la dynamique d'une forme en fonction du Re, et donc de la vitesse de l'écoulement créant un sillage autour de la forme. Les mesures effectuées sur le VVP sont représentées par la croix bleue. Si on extrapole les courbes, on constate qu'il se situe entre la courbe bleue et l'orange foncée, c'est-à-dire que l'hydrodynamisme de l'effet de sillage du VVP peut se rapprocher de celui d'un triangle ou d'une demi-bulle.

De plus, lors des tests à la Comex nous avons pu mettre en avant les différents modes d'oscillations du VVP. Dans certains cas, il oscille en suivant son oscillation fondamentale avec un nombre de Strouhal de 0,15 mais d'autres fois il va osciller deux, trois fois plus vite en suivant les harmoniques de l'oscillation fondamentale (voir *Figure 33*). Nous avons également constaté qu'il pouvait osciller en suivant la période d'un phénomène externe qui peut être la houle ou une seiche. En résumé, le VVP semble avoir deux comportements :

- le plus souvent, une période de 32 secondes pour une vitesse de remontée d'environ 10 cm/s, ce qui correspond à un nombre de Strouhal de 0,15. Le VVP oscille à la fréquence d'émission tourbillonnaire comme observée et mesurée en soufflerie. Il s'agit d'une résonance directe entre le sillage et le VVP.
 - quelques fois, le VVP oscille à une période de 16 secondes pour la même vitesse de remontée, ce qui correspond à un nombre de Strouhal de 0,3 soit le double de la fréquence de l'émission tourbillonnaire. Dans ce cas le VVP fait deux oscillations par émission tourbillonnaire.

Maintenant que nous avons caractérisé cet effet de sillage, nous étudions les solutions mises en œuvre pour s'en extraire, ou du moins pour le minimiser le plus efficacement possible.

B) Solutions mises en œuvre pour limiter l'effet de sillage

Pour limiter au maximum, voire supprimer cet effet de sillage, l'équipe a élaboré une carène en dessous du disque principal ainsi qu'une bulle au-dessus. Les phénomènes visés par la mesure de vitesse verticale par le VVP ont une basse fréquence. Le but était donc d'augmenter la fréquence de l'effet de sillage pour le différencier du signal visé, sans modifier le nombre de Reynolds, et se retrouver le plus proche possible de la forme verte sur la *Figure 36*.

Nous avons observé lors des tests en mer que la bulle augmentait considérablement l'hydrodynamisme du VVP, ce qui implique des vitesses de remontées trop importantes. De plus, lors des essais en soufflerie, la faible différence de période de l'effet de sillage entre le VVP sans bulle et avec bulle, ne justifie pas l'utilisation de cette dernière. Nous avons donc décider d'éliminer définitivement l'utilisation de la bulle.

En ce qui concerne la carène, il a fallu plus de comparaisons pour déterminer si elle jouait un rôle dans la limitation des effets de sillage. Grâce aux tests en mer et en soufflerie, nous avons pu montrer que la carène n'influençait pas les périodes d'oscillation, mais qu'elle avait en revanche un impact sur leurs amplitudes. En effet, avec la carène les amplitudes augmentent avec la vitesse, alors que sans carène elles restent sensiblement constantes. On retrouve sur tous les graphiques le motif « carène » qui correspond à une décélération avant une stabilisation lors de la remontée. De plus, l'utilisation de la carène en mer n'est pas pratique. Lors de la remontée la carène se remplit d'eau et il est difficile de remonter le VVP à bord du navire.

Nous pouvons donc conclure que ces deux modifications de matériel n'ont pas l'effet escompté sur l'effet de sillage. Nous prévoyons de mettre en place un nouveau dispositif, constitué d'un cylindre de grillage autour du VVP avec pour objectif de fractionner au maximum les tourbillons et ainsi limiter l'effet de sillage. Il sera testé en mer les 23 et 24 août 2021, et je participerai à ces tests.

Les solutions techniques testées jusqu'alors ne semblent pas modifier significativement l'effet de sillage, nous allons donc de mettre en place un traitement analytique. Ce dernier est basé sur un filtrage passe-bas supprimant les effets de sillage indésirables dans la mesure de vitesses verticales.

Cette phase n'en est qu'aux prémices mais l'utilisation de filtre passe-bas (par exemple de type Lanczos) est envisagée. Pour déterminer la fréquence de coupure du filtre, nous nous appuyons sur la *Figure 37*.



Figure 37 : Graphique du nombre de Strouhal en fonction du nombre de Reynolds avec courbes de périodes pour le VVP sans carène

Cette figure reprend les données correspondant au VVP sans carène, les couleurs représentent les intensités du spectre de l'analyse de Fourier. Les points jaunes représentent les intensités les plus importantes correspondant à l'effet de sillage, ce sont celles que nous voulons supprimer avec le filtre. Les courbes représentent les évolutions du nombre de Strouhal en fonction du nombre de Reynolds pour des périodes fixées. Ainsi, appliquer un filtre passe-bas à une certaine période équivaut à supprimer tous les points au-dessus de la courbe correspondante. Si l'on s'intéresse aux nombres de Reynolds de 50 000 on constate que le filtre passe-bas avec période de 10 secondes (supprimant toutes les périodes inférieures à 10s) n'est pas suffisant alors que les filtres à 30 et 60 secondes semblent adaptés. Une série de tests doit être réalisée pour optimiser le filtrage.

C) Caractérisation du VVP

Tous les essais réalisés ces derniers mois nous ont permis de mieux connaître et comprendre le comportement du VVP. Tout d'abord, les tests en mer et à la Comex ont mis en évidence que les triplicats étaient très reproductibles, ce qui signifie que le VVP a une dynamique déterministe, donc prévisible. Nous avons également testé différentes versions du VVP et nous avons observé que le VVP long et le VVP court avaient tous deux des périodes comprises entre 10s et 50s et que la longueur ne semblait pas jouer sur la valeur des périodes.

Lors de la préparation pour la Comex nous avons réalisé une pesée du VVP qui nous a permis de connaitre son poids dans l'air qui est de 17,5 kg (+/- 0,5 kg), et 0,10 kg dans l'eau douce (avant suppression d'un poids de 0,5 kg). Un ballastage lors de la mise à l'eau est cependant toujours nécessaire. Nous connaissons également son volume qui est de 17,4 l.

Les essais à la Comex ont également permis de déterminer son coefficient de traînée qui est d'environ 2,1. Cette valeur est supérieure au 1 constant du disque frottant. Cela s'explique par le fait que le VVP est constitué en sa base d'un disque frottant mais les ajouts de flotteurs et de tiges filetées augmentent son frottement. Cette valeur de coefficient n'est pas comparable avec des valeurs de formes déjà connues.

Ces tests réalisés à différentes vitesses de remontée ont permis de valider notre valeur de vitesse optimale à 10 cm/s, qui correspond à un nombre de Reynolds de 50 000. En effet, à une vitesse inférieure, le VVP à un comportement moins stable et plus risqué (à peine flottant, il risque de couler en rencontrant une eau légèrement moins dense). À trop grande vitesse, la résolution d'échantillonnage sur la verticale n'est pas assez importante et on risquerait de ne pas mesurer les courants verticaux avec une résolution suffisante.

Enfin, nous nous sommes également rendu compte de la limitation de mesure de la vitesse déduite la pression, en effet on ne peut jamais savoir si on mesure une vitesse effective du VVP ou une variation de pression d'eau au-dessus de lui (houle ou seiche). L'équipe a donc pour projet de coupler la mesure de la CTD avec un « ADCP 5 faisceaux Sentinel » ce qui permettrait d'avoir une double mesure de la vitesse verticale avec deux méthodes de mesure différentes et complémentaires. Une autre approche serait de déployer le VVP en parallèle

avec d'autres instruments comme un FF-ADCP (*Free-Fall* ADCP) pour permettre une intervalidation des données.

Conclusion et perspectives

Ce stage dans son ensemble a permis de mieux comprendre le comportement du VVP. Un effet de sillage a été mis en évidence et nous avons pu le caractériser. À la suite de cela nous avons entrepris de nous en extraire, ou du moins de le minimiser le plus efficacement possible par la modification de l'instrument (carène, bulle). Cependant, les analyses approfondies que j'ai réalisées ont montré que ces modifications ne permettent pas de supprimer ou de minimiser les oscillations de vitesses verticales induites par les tourbillons de sillage. Pour résoudre ce problème la mise au point d'un traitement analytique (filtre passe-bas) est en cours. De plus, à la fin août, une nouvelle série de tests en mer va être réalisée avec l'utilisation d'un carénage grillagé ayant pour but de fragmenter les tourbillons. Mon stage étant prolongé jusqu'à fin septembre, je vais pouvoir participer à la campagne en mer JULIO - VVPTest début septembre pendant laquelle des tests du VVP avec l'hélice vont être effectués. Nous avons également programmé une dernière journée à la fosse de la Comex, ainsi que des tests de compression des flotteurs du VVP pour tester sa résistance dans de grandes profondeurs.

À moyen terme, le but est que le VVP soit opérationnel pour la campagne PROTEVS-Gibraltar prévue en 2022, puis pour la campagne BioSWOT-Med prévue en 2023. PROTEVS-Gibraltar a pour objectif la mesure des ondes internes et des vitesses verticales associées dans cette région caractérisée par des courants de densité. BioSWOT-Med a pour objectif la mesure tridimensionnelle de la dynamique océanique à fines échelles et son influence sur la biologie autour du lancement du nouveau satellite SWOT, permettant une mesure satellitaire à haute résolution de l'altimétrie. À plus long terme, l'objectif est une utilisation systématique du VVP pour les mesures de vitesses verticales, avec possiblement l'élaboration d'une flotte de dizaine de VVPs permettant des mesures simultanées dans une zone géographique plus étendue. Dans cette projection, l'idée serait de déployer un VVP « maître » avec la CTD RBR de haute qualité, avec autour des VVPs à plus bas coût avec des capteurs moins précis, pour une vision synoptique de la zone.

Personnellement ce stage m'a apporté beaucoup, je n'avais aucune base en Python et grâce à l'aide de Stéphanie Barrillon et de Caroline Comby j'ai pu réaliser de nombreuses analyses approfondies, et j'aime maintenant cela. Il m'a fait gagner en autonomie et j'ai également progressé sur l'analyse des résultats. Le volet technique réalisé avec Jean-Luc Fuda fut vraiment mon préféré, en effet travailler sur le prototype, faire des tests en mer, en soufflerie et en fosse est fait pour moi.

L'océanographie physique est un milieu que j'appréciais déjà beaucoup avant de réaliser ce stage, mais maintenant j'ai la certitude de m'orienter vers cette voie pour la suite de mon projet professionnel. Si l'occasion d'étudier les vitesses verticales se présente, je n'hésiterais pas car il y a encore beaucoup à découvrir.

Enfin, ce stage m'a permis de rencontrer des personnes passionnées avec qui j'espère rester en contact.

Bibliographie

Eric A. D'Asaro, Andrey Y. Shcherbina, Jody M. Klymak, d, Jeroen Molemaker, Guillaume Novelli, Cédric M. Guigand, Angelique C. Haza, Brian K. Haus, Edward H. Ryan, Gregg A. Jacobs, Helga S. Huntley, Nathan J. M. Laxague, Shuyi Chen, Falko Judt, James C. McWilliams, Roy Barkane, A. D. Kirwan Jr., Andrew C. Poje, and Tamay M. Özgökmen2017. *Ocean convergence and the dispersion of flotsam.* PNAS | February 6, 2018 | vol. 115 | no. 6 www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1718453115

Barrillon, S. 2019. FUMSECK cruise, RV Téthys II. https://doi.org/10.17600/18001155

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: 10.1175/2011JTECH0830.1.

Fuda J.L, Marin F., Durand F., and Terre T.. Diagnosing ocean vertical velocities o_ 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'H_ev_eder 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, JC. 2016. Submesoscale currents in the ocean. *Proceedings of the Royal Society A*, **472**.

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

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

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.

Thurnherr, A. M. 2011. Vertical velocity from LADCP data. 2011 IEEE/OES 10th Current, Waves and Turbulence Measurements (CWTM), Monterey, CA, 198–204.

M. E. Weber, Roland Clift, John R. Grace. 1978. Bubbles, Drops, and Particles. doi: 0022-1120/79/0397-7590

<u>Livre :</u>

Instrumentation et métrologie en océanographie physique Coll. Capteurs et instrumentation,

LE MENN Marc 2007

Rapports :

Mémoire de stage Master 2 de Caroline Comby sur la mise en place d'une nouvelle méthodologie pour la mesure in situ des vitesses verticales océaniques grâce aux données de la campagne FUMSECK 2019

Mémoire de stage L3 de Charlotte Cunci sur l'étude des anomalies de vitesses verticales des courants obtenues par ADCP de coque durant la campagne FUMSECK

Rapport de stage d'observation L1 de Claire Raffaelli

Liste des annexes

Annexe I : Organigramme du M.I.O. Source : site web du M.I.O	I
Annexe II : Fiche technique de la CTD RBR Concerto. Source : rbr-global.com	I
Annexe III : Logbook de la sortie en mer du 20 avril 2020	/
Annexe IV : News de la soufflerie. Source : https://www.M.I.Oosupytheas.fr/fr/le-vvp-savait-nager-	
et-maintenant-il-vole V	I
Annexe V : News de la Comex. Source : https://www.M.I.Oosupytheas.fr/fr/le-vvp-se-la-coule-	
douceV	I
Annexe VI : Extrait du logbook de la Comex VI	I
Annexe VII : Extrait des données brutes de la CTD VI	I
Annexe VIII : Graphiques 3D de la période en fonction de la vitesse avec en 3 ^{ème} dimension l'intensité	
du spectre de Fourier	<

Annexe I : Organigramme du M.I.O. Source : site web du M.I.O.



Directeur | R. Sempéré Directeurs - adjoints | T. Changeux, C. Grenz, J. Touboul Membre de l'équipe | J. Espié

MIO

Juillet

2021

Administration	Equipe 1	Equipe 2	Equipe 3	Equipe 4	Equipe 5
Responsable	OPLC Océanographie Physique, Littorale et	CEM Chimie des Environnements Marine	MEB Microbiologie	CYBELE CYcles	EMBIO Ecologie Marine et BIOdiversité
Espié J. (IE)	Côtière	Mounier S. (MC)	Biotechnologie	fonctionnel des assemblages	Poggiale J.C. (PR),
Assistante de direction Fakir B. (T)	Baklouti M. (PR), Caccia II. (MC)	Panagiotopoulos C. (CR)	Bonin P. (DR),	planctoniques	Thibaut T. (MC)
Assistant pilotage	Barrillon S. (CR)	Chifflet S. (IR) De Luigi C. (MC)	Armougom F. (IR)	Grégori G. (CR), Van Wambeke F. (DR)	Aurelle D. (MC) Banaru D. (MC)
Lesage P. (IE)	Bosse A. (PHAD) Bourras D.(CR)	Dufour A. (IE) Dupouy C. (CR)	Bally M. (CR) Bartoli M. (T)	André JM. (CR)	Berline L. (MC) Boudouresque CF. (PR)
Chargée de Médiation scientifique	Chemin R. (IE) Chevalier C. (CR)	Durrieu G. (IE) Fauvelle V. (CR)	Biégala I. (CR) Blanc G. (DR)	Benavides M. (CR) Bonnet S. (DR)	Carlotti F. (DR) Changeux T. (IR)
Casanova A. (IE)	Dekeyser I. (PR) Devenon JL. (PR)	Fichez R. (DR) Garcia N. (IR)	Bouchard S. (IE) Cabrol L. (CR)	Cornet-Barthaux V. (IE) Denis M. (DR)	Coupé S. (MC) Gauduchon M. (MC)
Resp : Lozingot A. (AI)	Doglioli A. (MC) Francius M. (MC)	Goutx M. (DR) Grenz C. (DR)	Casalot L. (CR) Cavol J L. (MC)	Didry M. (T) Grosso O. (IE)	Guilloux L. (IE) Harmelin-Vivien M. (DR)
Chan F. (AJT) Davy M.C. (AJT)	Fraunié P. (PR) Fuda JI. (IR)	Grimaldi M. (MC) Guigue Tedetti C. (IE)	Combet-Blanc Y. (CR) Cupy Ph. (PR)	Jardin Camps M. (AI) Leblanc K. (CR)	Jamet D. (MC) Jamet JL. (PR)
Guedin I. (T) Stever Németh Z. (T)	Guérin CA. (PR)	Hajjoul H. (IR) Heimburger LA. (CR)	Davidson S. (IE) Desnues C. (DR)	Lefèvre D. (CR) Moutin T. (PR)	Martini S. (CR) Ménard F. (DR)
D	Luce H. (MC) Mazovar C. (IGE)	Lagadec V. (IE) Le Moigne F. (CR)	Erauso G. (PR) Gales G. (MC)	Niclas Chirurgien L. (AI) Nunige S. (IE)	Nérini D. (MC) Pagano M. (DR)
Jover S. (T)	Missamou T. (T) Molcard A (PR)	Le Poupon C. (IR) Lenoble V. (CR)	Garel M. (IE) Gaussier H. (MC)	Pulido E. (CR) Quéguiner B. (PR)	Prévost D'Alvise N. (MC) Richard S. (MC)
Aide au montage des	Ourmières Y. (MC) Petrenko A. (MC)	Mari X. (DR) Martino C. (T)	Guasco S. (T) Hingamp P. (MC)	Thyssen M. (CR)	Rodier M. (CR) Ruitton S. (MC)
contrats Pagano B. (T)	Piazzola J. (PR) Pinazo C. (MC)	Oursel B. (IE) Papillon L. (AI)	Hirschler A. (MC)	Non permanent	Thibault D. (MC)
Chargé de mission ITA	Pioch S. (MC) Quentin C. (IB)	Patel N. (MC) Raimbault P. (DR)	Labat M. (DR) Lescot M. (IR)	Ababou F. (Doc) Barre L. (Doc)	Non permanent
Chifflet S. (IR)	Resch F. (PR) Rev V. (PR)	Redon R. (MC) Ripert M. (MC)	Liebgott P.P. (CR) Lorouin J. (IR)	Chowdhury S. (Doc)	Ascencio E. (Ater) Blanfuné A. (Ater)
Correspondant Nouméa	Rossi V. (CR) Saillard M. (PR)	Rontani JF. (DR) Sanial V. (MC)	Michotey V. (PR) Militon C. (MC)	Fourquez M. (Post-Doc)	Bouchemousse S. (Ater)
Biégala I. (CR)	Sous D. (MC) Taunier Letage I. (CR)	Schintu-Jacquet S. (CR) Sempéré R. (DR)	Misson B. (MC) Navarro E. (CR)	Lory C. (Doc)	Di Stefano M. (Doc)
Service hygiène &	Tedeschi G. (MC) Touboul J. (MC)	Strady E. (CR) Tedetti M. (CR)	Postec A. (MC) Pradel N. (CR)	Saulia E. (IR)	Fierro Gonzalez P. (Doc)
sécurité	Zakardjian B. (PR)	Vaultier F. (T) Wagener T. (MC)	Pringault O. (DR) Quémeneur M. (CR)		Garcia T. (Doc)
prévention	Non permanent	Non permanent	Rommevaux C. (CR) Simon G. (MC)		Mahe M. (Doc)
F. Vaultier, M. Lafont	Barral Q. (Doc) Bensoussan N. (IR)	Abbad N. (Doc) Da Silva Justino A K (Doc)	Sylvi L. (T) Tamburini C. (DR)		Monfort T. (Doc) Pavaux A.S. (Ater)
Personnes Compétentes	Bourg N. (IE) Bruch W. (Doc)	Desgranges MM. (Doc) Dignan C. (Doc)	Timsit Y. (DR) Valette C. (T)		Podlejski W. (Doc) Richard T. (Doc)
en Radioprotection	Caceres A. (Post-Doc) Comby C. (Doc)	D'Onofrio S. (IE) Faure V. (Post-Doc)			Seyer T. (Doc) Tesan J. (Doc)
T. Missamou	Cuevas A. (IE)	Guyomarc'h L.M. (IE) Luz Santos T.T. (Doc)	Non Permanent Andrianjakarivony F. (De	oc)	Tribot A.S. (Post-Doc)
Référents Infrastructure	Dumas D. (Doc)	Ourgaud M. (Post-Doc) Peireira de Morais C (Doc)	Astorch Cardona A. (Doc) Baumas C. (Doc))	
Pacifique : S. Chifflet * Gaz : C. Tedetti-Guigue	Jenkins J. (Doc)	Phuong N.N. (Post-Doc) Sanou W.I. (Doc)	Burot C. (Doc) Chase E. (Doc)		
O. Grosso * Eau déminéralisée :	Legrand T. (Doc)	Schmidt N. (Post-Doc) Torres Rodriguez N. (Doc)	Fiard M. (Doc) Gadouin E. (Doc)	Axes Transverses	& Pôles F.Carlotti
S. Nunige, V. Lagadec * Eau de mer :C. Ré	Paugam C. (Doc) Seceh C. (Doc)	Whiteside A. (Doc) Wimart-Rousseau C. (Doc)	Geballa Koukoulas K. (D Hardy J. (Doc)	AT End to End] AT Couplage A.	D. Banaru, C. Chevalier Doglioli, G. Grégori, M. Lescot
	Sudre F. (Doc) Tran O. (Doc)		Iborra L. (Doc) Lecoeuvre A. (Post-Doc)	AT CONTAM P. AT POMPE BIOL	. Cuny, B. Misson OGIQUE C. Tamburini
Formation	Tzortzis R. (Doc)		Prime A.H. (IE) Villion K. (IE)	Pôle AGIR T. Cl Pôle MIO-OBS 0	nangeux, S. Ruitton C. Grenz, P. Raimbault
Correspondants Formation	Commission Locau	x G. Grégori	Plateformes C.G	renz	
Guedin I. (T) Missamou T. (T)	Référents Oceanor	med – Polytech-Soufflerie	PACEM N. Garcia	a (IR) ~ P. Raimbault, C. Panag zover (IGE) ~ C. Pinazo	riotopoulos
Nunige S. (IE)	CEM C. Tedetti	Guigue	Cultures expérimen (AI) L. Niclas-Chin	ntales S. Davidson (IE), M. M	oreau (ATRF), M. Jardin Camp
	CYBELE M. Thy	ssen	PRECYM Cytomet: Microscopie et Ima	rie pour la microbiologie A. Ba	rani (IGE) ~ G. Grégori et Barthaux (IE) ~ F. Carlotti
	ENIBIO J.C. Pog	giate	OMICS F. Armou Radioactivitá M	ugom (IR) ~ L. Casalot Garel (IE) ~ C. Tamburini	or burnaux (IE) T. Carlotti
			Macrophytes ~ T. Service Atmospher	Thibaut, CF Boudouresque re & Mer N. Bhairy (IE), F. G.	arcia (IGE), M. Fornier (AJT).
			Lafont (AI), D. Mal	lengros (AI) ~ C. Grenz	

||

Annexe II : Fiche technique de la CTD RBR Concerto. Source : rbr-global.com



FEATURES



RBR CT and CTD data loggers are available in the following configurations:

RBRduo³ C.T

RBRconcerto³ C.T.D

- moored instrument; measures conductivity and temperature
- moored instrument; measures conductivity, temperature and depth
- RBRconcerto³ C.T.D.Tu|fast8 turbidity, 8Hz profiling instrument; fast sensor response
- RBRconcerto³ C.T.D | fast16
 - 6 16Hz profiling instrument; fast sensor response
- RBRconcerto³ C.T.D | fast32 32Hz profiling instrument; fast sensor response

RBR CT and CTD loggers make it simple to configure the optimum sampling regime for your measurements. The large data storage capacity and fast download ability facilitate long deployments with higher sampling rates. The loggers are available in a standard body or extended body with additional power for extended deployments. Conductivity measurements are performed using a rugged inductive cell that can be frozen into ice. Dataset export to Matlab, Excel, OceanDataView®, or text files makes post processing with your own algorithms effortless.

rbr-global.com



RBRduo³ C.T / RBRconcerto³ C.T.D

CT AND CTD DATA LOGGERS MOORED AND PROFILING INSTRUMENTS

Specifications

Physical

Storage: Power: Communication: Clock drift: Depth rating:

Housing: Size: Weight: Sampling period: Fast option: 240M readings 8 AA cells USB-C or RS-232/485 ±60 seconds/year 750m (plastic) 10,000m (titanium) Plastic or titanium ~355 or 490mm x Ø63.25mm ~1300g in air, 200g in water 1s to 24h (moored) [fast8 — 1 – 8Hz (profiling) [fast16 — 1 – 8, 16Hz (profiling) [fast32 — 1 – 8, 16, 32Hz (profiling)

Conductivity (up to 6000m)

Range: Initial accuracy: Resolution: Typical stability:

Temperature

Range: Initial accuracy: Resolution: Time constant: Typical stability: -5°C to 35°C ±0.002° 0.00005°C ~1s (standard), ~0.1s (option) 0.002°C per year

0-85mS/cm

±0.003 mS/cm

0.010 mS/cm per year

0.001 mS/cm

Depth Range:

Initial accuracy: Resolution:	Initial accuracy: Resolution: Time constant:	Runge	
Resolution:	Resolution: Time constant:	Initial	accuracy:
	Time constant:	Resolu	ution:

20 / 50 / 100 / 200 / 500 / 750 1000 / 2000 / 4000 / 6000 / 10,000m (dbar) ±0.05% FS (full scale) 0.001% FS <0.01s 0.05% FS per year

Options

- Wi-Fi communication
- ▶ |fast8, |fast16 or |fast32Hz sampling for profiling
- External data and power connector with USB, RS-232, or RS-485



RBR Ltd

+1 613 599 8900 info@rbr-global.com rbr-global.com

RBR#0005579revC 06/2021

Annexe III : Logbook de la sortie en mer du 20 avril 2020

Sortie VVP s	ur Asteroides	du 20/04/202	1				
Test sans car	Test sans carène sans mousqueton						
N°	Heure	Profondeur	Coordonées	Etat de la mer	Durée immersion	Distance du point de dépar	
	10:05 HL		L: 43°15,6774N	Calme et présence			
1	10:41 HL	51,1 m	G:005°17,9555E	de méduse	36 min	52 m NE	
	10:55 HL		L: 43°15,7491N				
2	11:25 HL	48 m	G:005°18,0488E	Calme	30 min	23m NE	
	11:35 HL		L: 43°15,028N	Houle légère mais			
3	12:14 HL	60 m	G:005°17,170E	régulière (voir vidéo)	39 min	470m NE	
Test avec carène et 2 mousquetons							
	12:28 HL		L:43°15,7951N				
4	12:58 HL	48 m	G: 005°17,9550E	Forte dérive et houle	30 min	790 m NE	
	13:05 HL		L: 43°15,683N				
5	13:39 HL	47,5 m	G:005°17,964E	Forte dérive et houle	34 min	1,025 km NE	
	13:44 HL		L: 43°15,683N				
6	14:14 HL	48 m	G:005°17,964E	Forte dérive et houle	30 min	650 m NE	

Annexe IV : News de la soufflerie. Source : https://www.M.I.O..osupytheas.fr/fr/le-vvp-savait-nager-et-maintenant-il-vole



Les 29 et 30 avril 2021, une partie de la « VVP-Team » s'est rendue à la soufflerie afin d'effectuer une série de tests hydrodynamiques de leur prototype de profileur de vitesses verticales VVP (*Vertical Velocity Profiler*), en particulier pour l'effet de sillage de l'instrument. Nous avons ainsi pu mesurer la fréquence des tourbillons de sillage en fonction de la configuration (avec ou sans carène d'un côté, avec ou sans demi-sphère de l'autre) et de la vitesse du vent. Nous avons également visualisé la trajectoire du fluide à l'aide de fumée et d'un plan laser. Un grand merci à Hubert, Christopher et Mélanie pour leur accueil et leur aide précieuse !

Participants : Jean-Luc Fuda, Margaux Dufosse, Caroline Comby, Kassim Benabdelmoumène, Stéphanie Barrillon (MIO), Patrice Le Gal, Hubert Branger (IRPHE), Christopher Luneau, Mélanie Doret (OSUPythéas).



Annexe V: News de la Comex. Source : https://www.M.I.O..osupytheas.fr/fr/le-vvp-se-la-coule-douce



Les 2 et 3 juin 2021, c'est dans l'eau douce de la fosse profonde de 10 m de la célèbre société de travaux sous-marins COMEX que le VVP (Vertical Velocity Profiler) est allé faire ses preuves. Équipé des largueurs à glace développés au MIO pour le libérer de son lest après chaque plongée, le VVP a effectué plus de 80 profils ascendants à différentes vitesses et avec différentes configurations, afin de caractériser sa dynamique dans un environnement contrôlé. Les mesures permettront d'évaluer son coefficient de traînée, ainsi que la fréquence et l'amplitude des tourbillons de sillage en fonction de la vitesse et de la configuration du VVP. Ces précieuses informations permettront de mettre au point la méthodologie de déploiement du VVP pour les mesures en mer lors des futures campagnes océanographiques.

Deux jours intenses et riches !



Photo Crédits : Gérald Grégori, Dorian Guillemain

Financements

- AT Couplage VVP (PI J.-L. Fuda),
- LEFE FUMSECK-vv (PI S. Barrillon et A. Petrenko),
- CNES BioSWOT (PI A. Doglioli et G. Grégori)
- Équipements de la plateforme GLADYS : Vector Nortek

Participants

- MIO : Jean-Luc Fuda, Margaux Dufosse, Claire Raffaelli, Caroline Comby, Anne Petrenko, Andrea Doglioli, Gérald Grégori, Roxane Tzortzis, Deny Malengros, Charlotte Cunci,
- Stéphanie Barrillon
- IRPHE : Patrice Le Gal (CNRS)
- OSU Pytheas : Dorian Guillemain, Michel Lafont
- GIS Posidonie : Bruno Belloni
- IMBE : Sandrine Chenesseau
- CEREGE : Sam Meulé

⇒ Test avec 1 petit mousqueton + 5 polystyrènes

1) 16:13 : sortie 27^e glaçon 16:14 : plongée VVP 16:15 : VVP au fond 16:18 : VVP largué 16:18 : VVP en surface t1 = 39 s donc v=7.8/39=**20 cm/s**

- 2) 16:20 : sortie 28^e glaçon
 16:22 : plongée VVP
 16:22 : VVP au fond
 16:24 : VVP largué
 16:25 : VVP en surface
 t2 = 34 s donc v=7.8/34=22.9 cm/s
- 3) 16:26 : sortie 29^e glaçon
 16:27 : plongée VVP
 16:28 : VVP au fond
 16:30 : VVP largué
 16:31 : VVP en surface
 t3 = 45 s donc v=7.8/45=17.33 cm/s

Annexe VII : Extrait des données brutes de la CTD

Time, Conductivity, Temperature, Pressure, Sea pressure, Depth, Salinity, Speed of sound, Specific conductivity, Density anomaly 2021-04-16 09:09:09.000, -0.0026068, 22.9322587, 9.9353721, -0.1971279, -0.1955204, 0.0115167, 1491.0217280, -2.7137359, NaN 2021-04-16 09:09:09.500, -0.0031186, 22.9303859, 9.9284181, -0.2040819, -0.2024177, 0.0115159, 1491.0163044, -3.2466454, NaN 2021-04-16 09:09:10.000, -0.0022481, 22.9266722, 9.9306622, -0.2018378, -0.2001919, 0.0115145, 1491.0058159, -2.3405372, NaN 2021-04-16 09:09:10.500, -0.0023487, 22.9237119, 9.9278587, -0.2046413, -0.2029725, 0.0115133, 1490.9973782, -2.4454106, NaN 2021-04-16 09:09:11.000, -0.0020721, 22.9213512, 9.9244623, -0.2080377, -0.2063412, 0.0115124, 1490.9906296, -2.1575578, NaN 2021-04-16 09:09:11.500, -0.0030226, 22.9196537, 9.9258804, -0.2066196, -0.2049347, 0.0115117, 1490.9858409, -3.1473425, NaN 2021-04-20 08:01:47.000, -0.0020454, 13.7293991, 10.1341023, 0.0016023, 0.0015892, 0.0073531, 1461.4307964, -2.6062627, -0.7111462 2021-04-20 08:01:47.500, -0.0015853, 13.7309529, 10.1304447, -0.0020553, -0.0020386, 0.0073539, 1461.4363579, -2.0198818, NaN 2021-04-20 08:01:48.000, -0.0020239, 13.7356828, 10.1349344, 0.0024344, 0.0024145, 0.0073563, 1461.4553397, -2.5784941, -0.7119925 2021-04-20 08:01:48.500, -0.0020026, 13.7373248, 10.1324149, -0.0000851, -0.0000844, 0.0073572, 1461.4594380, -2.5513178, NaN 2021-04-20 08:01:48.500, -0.0020026, 13.7373248, 10.1324149, -0.00205726, -0.0025577, 0.0073564, 1461.450437, -2.3801316, NaN Annexe VIII : Graphiques 3D de la période en fonction de la vitesse avec en 3^{ème} dimension l'intensité du spectre de Fourier



Graphique 3D - VVP court avec carène







Résumé

La mesure in situ des vitesses verticales constitue un sujet d'étude récent car celles-ci ont longtemps été négligées, considérées comme non mesurables ou encore paramétrées de façon simple, en raison de leur faible intensité par rapport à celle des composantes horizontales et des difficultés de leur estimation in situ. Pourtant, cette composante de la vitesse est indispensable à la compréhension des processus physiques et biologiques de nos océans. C'est pour cela que le groupe « fines échelles » au sein de l'équipe d'Océanographie Physique Littorale et Côtière du M.I.O. a créé un prototype de profileur de vitesse verticale, le VVP (Vertical Velocity Profiler). Ce rapport traite de la caractérisation de cet instrument, ainsi que de l'effet de sillage observé lors de précédents tests. Pour cela de nombreux tests en mer, en soufflerie, et en fosse de 10 mètres de profondeur furent réalisés, et une analyse de données approfondie en Python a été développée. Nous avons ainsi pu mesurer les caractéristiques du VVP, mettre en évidence l'effet de sillage et comprendre les comportements des différentes configurations du VVP sous l'influence de cet effet. À la suite des études avec l'analyse de Fourier en s'appuyant sur les nombres de Reynolds et de Strouhal nous avons également pu déduire que la modification de l'appareil uniquement ne réduisait pas l'effet de sillage. Cet effet doit donc être traité de manière analytique. Différentes solutions sont actuellement à l'étude et seront testés lors de prochaines manipulations.

<u>Mots-clés</u>: Vitesses verticales, VVP (*Vertical Velocity Profiler*), processus de fine échelle, hydrodynamique, océanographie physique

Abstract

The *in situ* measurement of vertical velocities is a recent subject of study. Indeed, these vertical velocities have long been neglected, considered as unmeasurable or parameterized in a simple way, because of their low intensity compared to the horizontal components and the difficulties of *in situ* their estimation. However, this component of the velocity is essential to understand the physical and biological processes of our oceans. This is why the "fine scale" group within the MIO's Physical Oceanography Coastal team has created a prototype of a vertical velocity profiler (VVP). This report describes the characterization of this instrument, and of the wake effect observed during previous tests. For this purpose, numerous tests at sea, in a wind tunnel, and in a 10-meter deep pit were performed, and a data analysis was developed in Python. We measured the characteristics of the VVP, highlighting the wake effect and understanding the behaviour of the different configurations of the VVP under the influence of this effect. Following studies with Fourier analysis based on Reynolds and Strouhal numbers, we were also able to deduce that the modification of the device alone did not reduce the wake effect. This effect must therefore be treated analytically. Different solutions are currently under study and will be tested in future manipulations.

<u>Keywords:</u> Vertical velocities, VVP (*Vertical Velocity Profiler*), fine scale processes, hydrodynamics, physical oceanography