



Institut PYTHEAS Observatoire des Sciences de l'Univers Aix+Marseille Université

## Mise en place d'une nouvelle méthodologie pour la mesure *in situ* des vitesses verticales océaniques grâce aux données de la campagne FUMSECK 2019

Caroline COMBY

Stage M2 Océanographie Physique et Biogéochimique – OSU Pythéas

06/01/2020-05/06/2020

Encadrement : Barrillon, S. & Petrenko, A.



- Estimation indirecte par équation-ω
- Absence de mesures <u>directes</u> in situ



Importance des vitesses verticales : physique, biologie, biogéochimie

15/06/2020

A. Mahadevan, 2016

Soutenance M2 – OPB



Conclusions & Perspectives

## Sentinel V50 (Teledyne RDI\*) Acoustic Doppler Current Profiler nouvelle génération

ADCP 500 kHz → portée de la mesure ~50 m Acquisition basse fréquence [1 Hz]

#### Mesures de courantologie classique :

Mesure des composantes de vitesse horizontales (*u* et *v*) et estimation de la vitesse verticale via les composantes horizontales *w from 4 beams* 

### Nouveauté :

Mesure de la vitesse verticale via un 5<sup>ème</sup> faisceau *w from 5<sup>th</sup> beam* 



Mesure directe de *w* en milieu hauturier

\* RDI : Research & Development Instruments

Introduction

Soutenance M2 – OPB





 $w_{CTD}$  dérivée de  $\frac{1}{\rho g} \frac{\partial p}{\partial t}$  (approximation hydrostatique)

## <u> Défis :</u>

- Nouveauté de l'instrument, utilisation innovante
- Méthode de traitement développée ex nihilo
- Généralisation des conventions → extension à d'autres instruments











**3.** Généralisation de la convention des angles d'attitude

# **Convention RDI** 3 + 90 90 PITC ± 90 • ROLL ± 90 Adapted from RDI





**3.** Généralisation de la convention des angles d'attitude



## **Convention sphérique**



Introduction Méthode Résultats Conclusions & Perspectives

## **4.** Changement de référentiel Sentinel → Terre



θ écart par rapport à la verticale stricte →orientation déterminée par les angles d'attitude et de cap

8

Introduction Méthode Résultats

## **4.** Changement de référentiel Sentinel → Terre



θ écart par rapport à la verticale stricte →orientation déterminée par les angles d'attitude et de cap

**Conclusions &** 

Perspectives

Mesure par le faisceau vertical  $w_s \rightarrow$  plusieurs composantes *u*, *v*, *w* 

8

Introduction Méthode Résultats

## **4.** Changement de référentiel Sentinel → Terre



θ écart par rapport à la verticale stricte → orientation déterminée par les angles d'attitude et de cap

**Conclusions &** 

Perspectives

Mesure par le faisceau vertical  $w_s \rightarrow$  plusieurs composantes *u*, *v*, *w* 

Nécessaire de **projeter** la mesure dans le **référentiel terrestre** 

3D

 $\mathbf{O}\mathbf{O}$ 

## 4. Changement de référentiel Sentinel $\rightarrow$ Terre

Méthode

Compas magnétique

- Angles d'attitude sphériques : roulis (**R**, *Roll*) et tangage (**P**, *Pitch*)
- Angle de cap (H, Heading)

Transducteur acoustique

• Composantes de vitesse : *w<sub>s</sub>* , *u*, *v* 

# Mise en place d'une matrice de passage

**Résultats** 

**Conclusions &** 

Perspectives

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} u_s \\ v_s \\ w_s \end{bmatrix}$$

Terrestre ← Sentinel <u>NB :</u> M inversible

	$\cos H * \cos R - \sin H * \sin P * \sin R$	$\sin H * \cos P$	$-\cos H * \sin R - \sin H * \sin P * \cos R$
M =	$-\sin H * \cos R - \cos H * \sin P * \sin R$	$\cos H * \cos P$	$\sin H * \sin R - \cos H * \sin P * \cos R$
	$\cos P * \sin R$	sin P	$\cos P * \cos R$

## → M applicable à toutes les mesures issues du 5<sup>ème</sup> faisceau

15/06/2020

Г

Soutenance M2 – OPB

**Caroline Comby** 

Т



Upcasts : tension du câble + résonance  $\rightarrow$  choix des profils downcasts

Réduction progressive des écart-types : jusqu'à un facteur 20 Incertitude limite intrinsèque ~ 3mm/s

 $\mu \sim mm/s$ **Ordres de grandeur atteints :**  $\sigma \sim 1 \text{ cm/s}$ 

STATION	1	2	3	4	5	6
μ [10 <sup>-2</sup> m/s]	-0.3	-0.0	-0.5	-0.5	-0.8	-0.6
σ [10 <sup>-2</sup> m/s]	0.7	0.7	1.3	1.9	0.9	0.6
15/06/2020	Souten	ance M2 – OPB	С	aroline Comby		

Downcasts : moyenne 0-150 m



### II. Comparaison des résultats Sentinel 5<sup>th</sup> Beam, Sentinel 4 Beams, L-ADCP

**STATION 2** 

Sentinel 5<sup>th</sup>B

Sentinel 4Bs

L-ADCP





#### L-ADCP

différence en surfaceconcordance en profondeur



-50

## → Généralisation de la méthode de traitement au L-ADCP → $\sigma$ meilleurs pour les données issues du Sentinel

15/06/2020

**Caroline Comby** 

**STATION 3** 

Sentinel 5<sup>th</sup>B

Sentinel 4Bs

L-ADCF

Introduction

Méthode

Résultats ●●●○○ Conclusions & Perspectives

## II. Comparaison des mesures de vitesses verticales

3 instruments déployés → 4 mesures de *w* Sentinel 5<sup>th</sup> beam, Sentinel 4 beams, L-ADCP, FF-ADCP



Soutenance M2 – OPB

Introduction Méthode Résultats Conclusions & Perspectives

## III. Analyse des données de courantologie horizontale

Mesures des **composantes** *u* **et** *v* par le **Sentinel** et le **L-ADCP corrigées** de l'effet de **dérive** du navire profondeurs



→ Concordance *u* et *v* entre chaque instrument & dynamique attendue dans la zone → Confiance dans l'acquisition de *w* par le Sentinel 5<sup>th</sup> beam

15/06/2020

Soutenance M2 – OPB

Introduction Méthode Résultats

Conclusions & Perspectives

## IV. Dynamique 3D dans la zone d'étude FUMSECK

Utilisation de différentes sources de données Sentinel : w (5<sup>th</sup> beam), u et v Satellite : produits L3 et L4 de chlorophylle et SST



Introduction 

Méthode  $\bigcirc$ 

**Résultats** 

**Conclusions &** Perspectives

## IV. Dynamique 3D dans la zone d'étude FUMSECK

Utilisation de différentes sources de données **Sentinel** : w (5<sup>th</sup> beam), u et vSatellite : produits L3 et L4 de chlorophylle et SST

CHL INTERP MULTI L4 - 2019-05-04 Distinction de plusieurs zones : 0.18 30' w [cm/s] 10 cm/s10 cm/s 0.16 **Courant Nord (liguro-provençal)**  $\otimes$ - 0.5 **Recirculation cyclonique** 15' 0.14 8.0 - 🚫 Zone intermédiaire 0.12 44°N CHI [mg/] 1.0 CHI [mg/] → Différences géographiques Impact sur les vitesses verticales 0.06 (Sentinel – downcasts) : 0.04 30 Faible contraste des *w* dans la zone, 0.02 w faiblement < 0 0 8°E 20 40 9°E 20' → Différents processus de fine échelle 15/06/2020 Soutenance M2 – OPB **Caroline Comby** 

Conclusions & Perspectives

## Conclusions

- Méthode innovante de traitement des vitesses verticales généralisée pour différents instruments
  - $\rightarrow$  ordres de grandeurs attendus : quelques mm/s au cm/s.
- 4 jeux de données à disposition → bonne concordance sur les moyennes, quelques variations dans les écarts-types selon les instruments.
- Bon fonctionnement de la méthodologie de déploiement en free-fall

   précision optimale dans l'acquisition de w.
- Analyse 3D concluante → schéma récapitulatif
  - → faible contraste des w dans la zone : cohérent avec la région et la période d'échantillonnage
  - → w globalement < 0, différences géographiques & processus de fine échelle



## Perspectives

- Prolongation contrat (15/07/2020)
- → Rédaction article scientifique

- Analyse des données du SeaExplorer (modèle de vol)
- $\rightarrow$  Étude de w<sub>glider</sub> sur l'ensemble du transect
- Développement du système *free-fall* Sentinel V
- → Futures campagnes du projet BIOSWOT VVPTest, Gibraltar, etc. pour tester la méthodologie









## Merci pour votre attention

## Annexes

## Séries temporelles des mesures de w par Sentinel 5<sup>th</sup> beam





Soutenance M2 – OPB





15/06/2020

Soutenance M2 – OPB

Caroline Comby

28



#### downcasts

STATION	1	2	3	4	5	6
μ [10 <sup>-2</sup> m/s]	-0.8	-0.4	0.1	N. A.	-1.0	-0.5
σ [10 <sup>-2</sup> m/s]	1.4	1.0	1.5	N. A.	1.2	1.3
15/06/2020	Soutenance M2 – OPB		Caroline Comby			29

## Phénomène de résonance – ou ringing

### <u>1. Pulse acoustique :</u>

- envoi du signal
- vibration de la dalle

2. Écoute écho cellules proches :

- vibration de la dalle
- écho du signal masqué par la vibration

Effet Doppler  $\rightarrow$  0

<u>3. Écoute écho cellules</u> <u>éloignées</u> :

- aucune vibration
- écho du signal non perturbé

#### Effet Doppler



15/06/2020

## Sentinel V : 5-beam ADCP



15/06/2020

Soutenance M2 – OPB

### **FF-ADCP**



15/06/2020

Soutenance M2 – OPB



## % données conservées SENTINEL 5th beam

15/06/2020

## Comparaison des fenêtres de lissage pour µ & o downcasts







ļ

Sentinel 5<sup>th</sup> beam

Sentinel 4 beams

Ī

6

Sentinel 5<sup>th</sup> beam

Sentinel 4 beams

L-ADCP

L-ADCP

5

I I I I

I I I I

## Ajustement automatique des datasets



## $\sigma$ minimum = index d'ajustement des séquences

15/	'06/	2020
	00,	2020

Soutenance M2 – OPB



## Choix de la fenêtre sur 1 seconde :

Échantillonnage 24 Hz conservé + Bruit en grande partie éliminé

15/06/2020

Soutenance M2 – OPB

## Impact du changement de convention

- **1. COSINUS** résultats identiques entre les deux conventions
- 2. SINUS



#### $\rightarrow$ Résultats identiques

 $\rightarrow$  Inversion du signe

→ Matrice de passage à adapter en conséquence pour le changement de référentiel

15/06/2020

Soutenance M2 – OPB

## Principe de l'étape de correction CTD speed 1Hz

Utilisation des datasets Sentinel & CTD

Principe de base :  $w_{océan} = w_{mesurée} - w_{CTD}$ 

La séquence de données Sentinel est **synchronisée** avec celle de la CTD.

Les **vitesses calculées** de la CTD sont **lissées** sur la période = 1 seconde. Puis **moyennées à 1 Hz**.

Les **mesures de** *w from 5th beam* et *w from 4 beams* sont corrigées de la part due au mouvement des instruments (approximation hydrostatique) :

 $W_{\text{CTD}} = \frac{1}{\rho g} \frac{\partial p}{\partial t}$ 

## Étape de coupure des extrémités sup./inf.

Approche statistique de la mesure

 $\rightarrow$  nécessité d'analyser des données avec des effectifs élevés



40



# III. Analyse des données de courantologie horizontale → composantes u, v

#### Données à disposition

#### **Précision**

- Sentinel : Sentinel V50 500 kHz
   L-ADCP : Workhorse 300 kHz
- ADCP de coque : Ocean Surveyor 75 kHz

mesure x 0.3 % ± 0.3 cm/s mesure x 0.5 % ± 0.5 cm/s mesure x 1.0 % ± 0.5 cm/s

Meilleure précision obtenue avec l'utilisation du Sentinel : lorsque la fréquence du pulse acoustique augmente → l'incertitude de mesure diminue

#### Confiance dans l'acquisition de *w* par le Sentinel 5<sup>th</sup> beam

Soutenance M2 – OPB

## **Traitement des données glider SeaExplorer** *Étude préliminaire*

#### <u>Deux grandes étapes :</u>

- Calcul de la vitesse de plongée/remontée :  $\frac{\partial z}{\partial t}$
- Soustraction de la vitesse moyenne sur la plongée/remontée hypothèse : pitch ~ cst



### → En première approximation on obtient des w de l'ordre de quelques mm/s

15/06/2020

Soutenance M2 – OPB





Altimétrie satellite révolutionnaire mesure 2D : Sea Surface Heigh

→ Mesure à haute résolution spatiale Précision l'ordre  $\approx$  cm

Phase de Fast Sampling (premiers mois post-lancement)

- $\rightarrow$  Mesure à haute résolution temporelle
  - 1 à 2 passages journaliers par point de croisement





15/06/2020

Soutenance M2 – OPB

## Références

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.

Doglioli, A. 2015. OSCAHR cruise, RV Téthys II. https://doi.org/10.17600/15008800

**d'Ovidio, F**., Fernández, V., Hernández-García, E. and C. López. 2004. Mixing structures in the Mediterranean Sea from finite-size Lyapunov exponents. *Geophysical Research Letters*, **31**.

**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.

**Firing, E**. and R. Gordon. 1990. Deep ocean acoustic Doppler current profiling. *Proceedings of the IEEE Fourth Working Conference on Current Measurements,* Clinton, MD, Current Measurements Technology Committee of the Oceanic Engineering Society, 192–201.

**Fischer, J**. and M. Visbeck. 1993. Velocity profiling with self-contained ADCPs. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **10**, 764–773.

**Lévy, M**. 2008. The modulation of biological production by oceanic mesoscale turbulence. in <u>Transport and Mixing</u> in <u>Geophysical Flows</u> (Weiss J. B. and A. Provenzale, Ed.), Springer, 219–261, 262 pp.

Lévy, M., Iovino, D., Resplandy, L., Klein, P., Madec, G., Tréguier, A.-M., Masson, S. and K. Takahashi. 2012. Largescale 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.

**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**.

Millot, C. 1999. Circulation in the western Mediterranean Sea. Journal of Marine Systems, 20, 423–442.

**Millot, C**. and I. Taupier-Letage. 2005. Circulation in the Mediterranean Sea. in <u>The Mediterranean Sea</u> (Saliot A., Ed.), Springer, **5**, part. K, 29–66.

**RD Instrument**. 2008. ADCP coordinate transformation: Formulas and calculations. RDI Manual P/N 9516079-00, 31 pp. **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.

**Polzin, K**., Kunze, E., Hummon, J. and E. Firing. 2002. The Finescale Response of Lowered ADCP Velocity Profiles. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **19**, 205–224.

**Richardson, P.L.** 1983. Eddy kinetic energy in the North Atlantic from surface drifters. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **88**, 4355–4367.

**Rousselet, L**. 2018. Étude de l'influence de la circulation à (sous)mésoéchelle sur la distribution spatiale des éléments biogéochimiques et biologiques à l'aide de mesures in situ et satellites couplées physique-biogéochimie. http://www.theses.fr/s182477

**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.

**Rudnick, D.L**. 1996. Intensive Surveys of the Azores Front 2. Inferring the Geostrophic and Vertical Velocity Fields. *Journal of Geophysical Research*, **101**, 16,291–16,303.

**Strass, V. H**. 1994. Mesoscale instability and upwelling. Part 2: Testing the diagnostics of vertical motion with a threedimensional ocean front model. *Journal of Physical Oceanography*, **24**, 1759–1767.

**Thurnherr, A. M**. 2010. A practical assessment of uncertainties in full-depth velocity profiles obtained with Teledyne/RDI Workhorse Acoustic Doppler Current Profilers. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **27**, 1215–1227.

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

**Thurnherr, A. M**. 2012. The finescale response of lowered ADCP velocity measurements processed with different methods. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **29**, 597–600.

**Visbeck, M**. 2002. Deep velocity profiling using lowered acoustic Doppler current profilers: Bottom track and inverse solutions. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **19**, 794–807.