

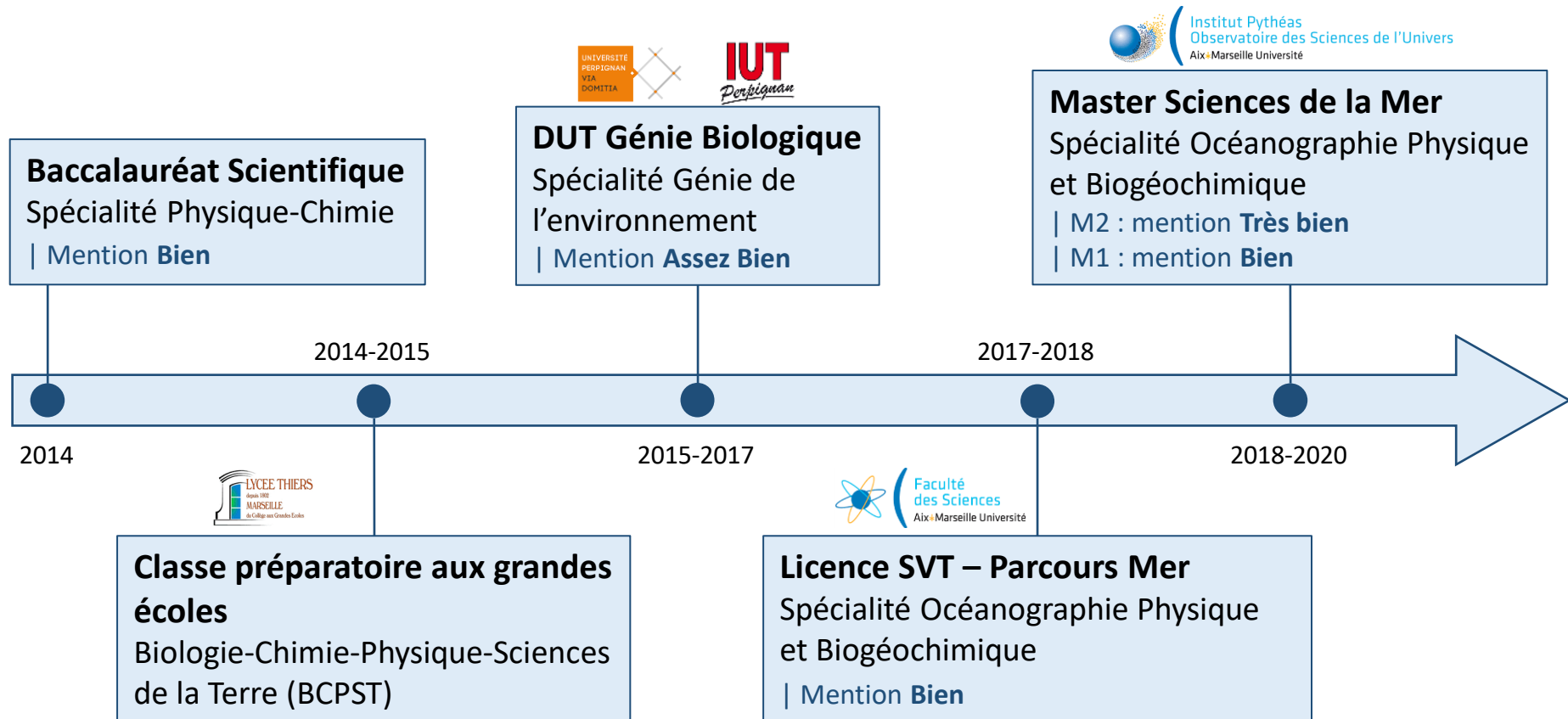
Vitesses verticales et dynamique océanique de fine échelle

Caroline COMBY

23/06/2020

Encadrement : Stéphanie BARRILLON, Anne PETRENKO

Parcours d'études



Compétences

Connaissances théoriques

Océanographie Physique

- Dynamique des fluides
- Approche lagrangienne et stratégies d'échantillonnage
- Optique marine
- Flux à l'interface air/mer
- Analyse du signal et traitements statistiques

Océanographie générale, biogéochimique, biologique et chimique

Connaissances pratiques

Modélisation

Programmation

Matlab, FORTRAN, R, Python

Modèles numériques

ROMS, MARS3D

Terrain

Campagne PHYBIO 2019

Expériences de travail en laboratoire de recherche

DUT → M1 : Nombreux stages autour de l'océanographie microbiologique, chimique, **physique**

M2 : Mise en place d'une nouvelle méthodologie pour la mesure *in situ* des vitesses verticales océaniques grâce aux données de la campagne FUMSECK 2019

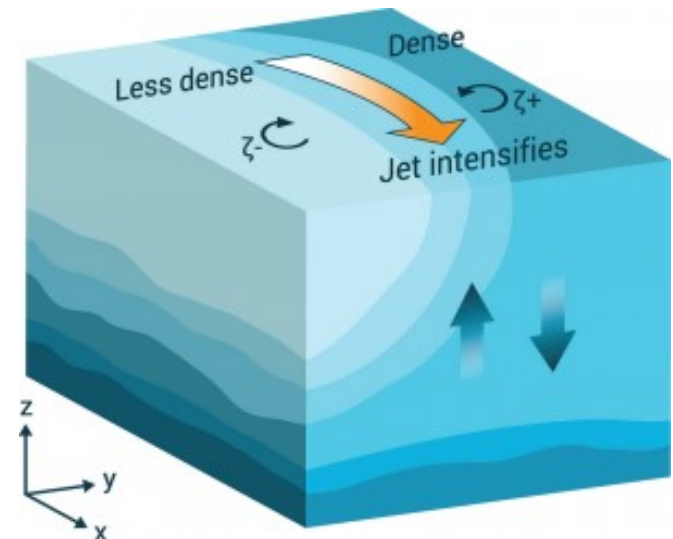
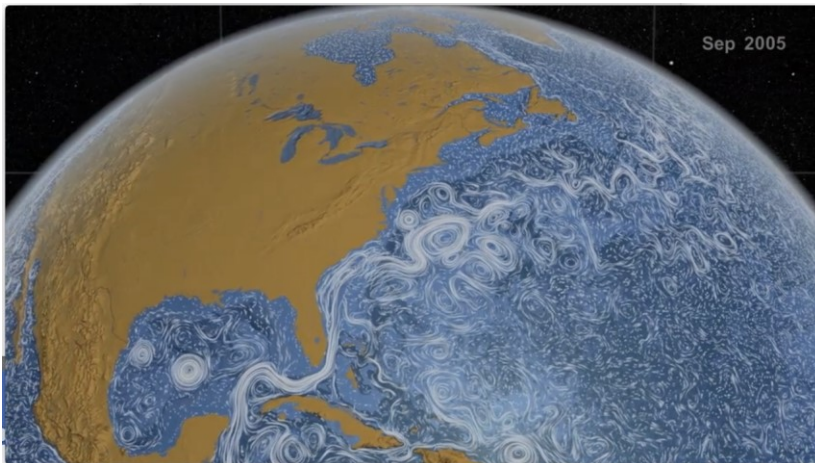
Sujet de thèse

Vitesses verticales et dynamique océanique de fine échelle

Estimation directe des vitesses verticales à (sous)méso-échelle

→ **Principal défi actuel en océanographie physique**

La mesure **directe** *in situ* des **vitesses verticales** est à la base des questionnements sur les échanges verticaux dans le contexte du **changement climatique**



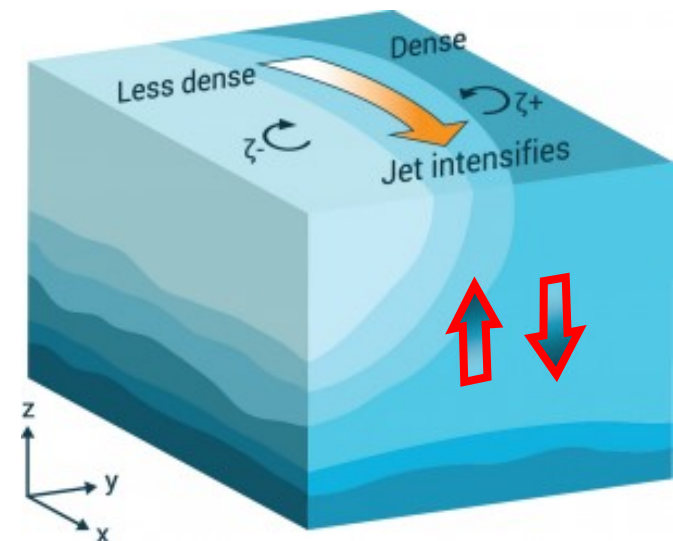
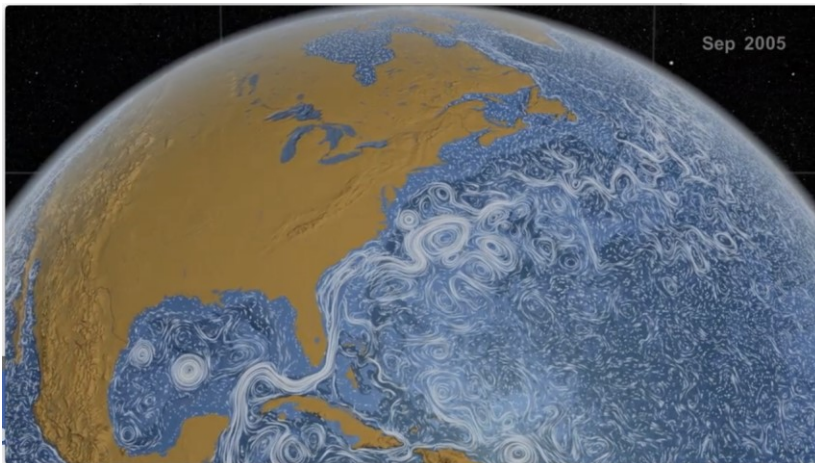
Sujet de thèse

Vitesses verticales et dynamique océanique de fine échelle

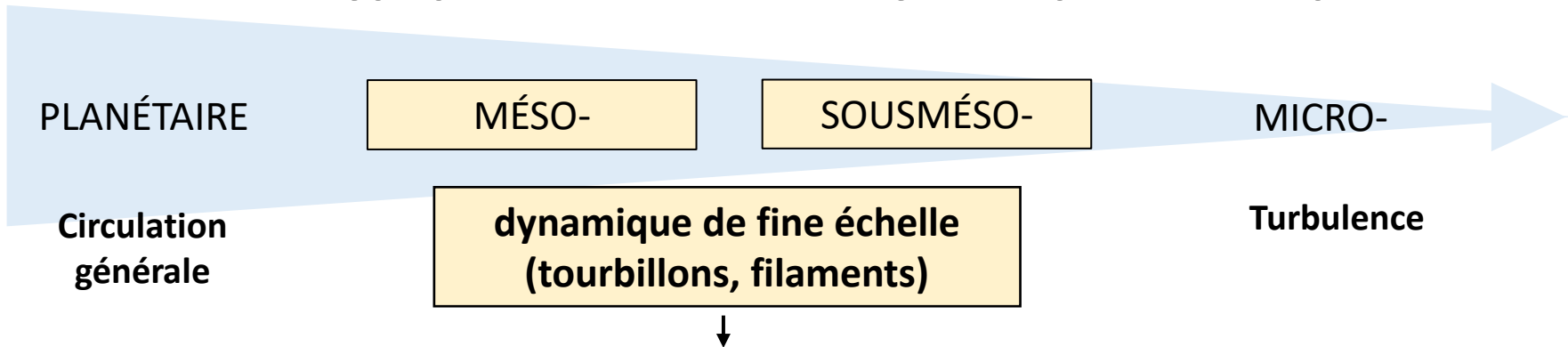
Estimation directe des vitesses verticales à (sous)méso-échelle

→ **Principal défi actuel en océanographie physique**

La mesure **directe** *in situ* des **vitesses verticales** est à la base des questionnements sur les échanges verticaux dans le contexte du **changement climatique**



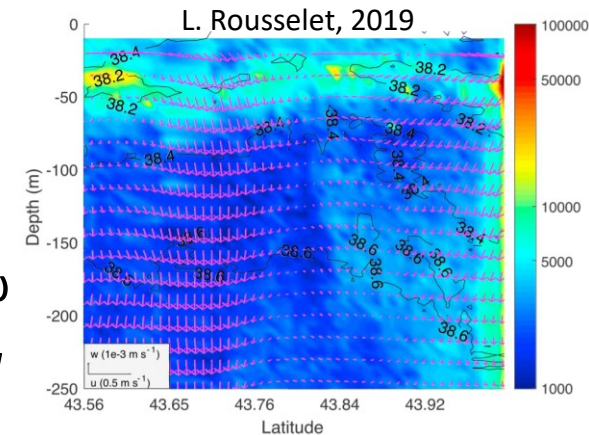
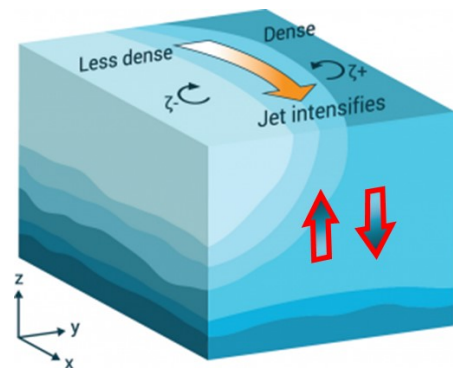
Échelles typiques d'étude de la dynamique océanique



Rôle clé dans l'équilibre océanique global impliquant une dynamique agéostrophique et tridimensionnelle

Étude des vitesses verticales :

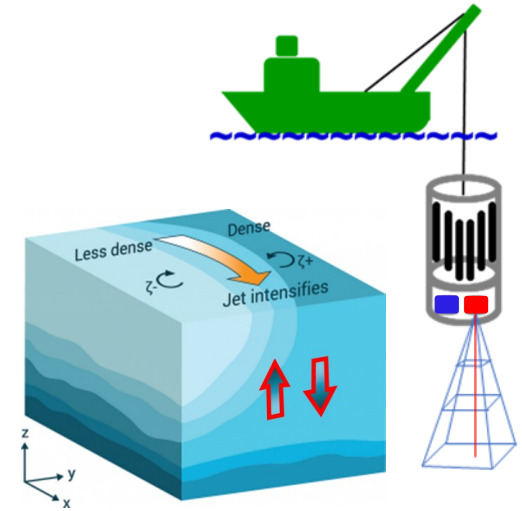
- Modélisation numérique
- Approximation $w = 0$ m/s
- Estimation indirecte par équation- ω
- Absence de mesures directes *in situ*



Importance des vitesses verticales : physique, biologie, biogéochimie

Mesure directe *in situ* de w : défi océanographique

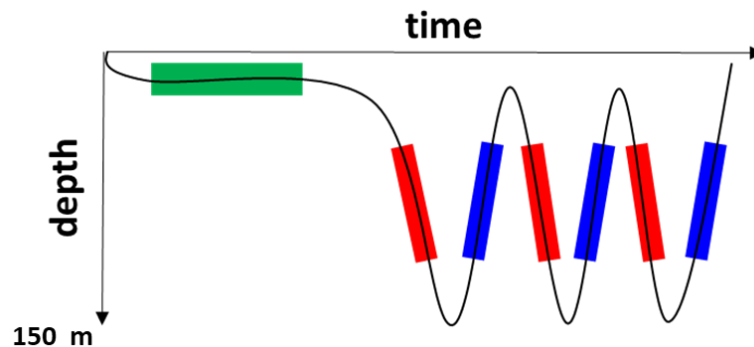
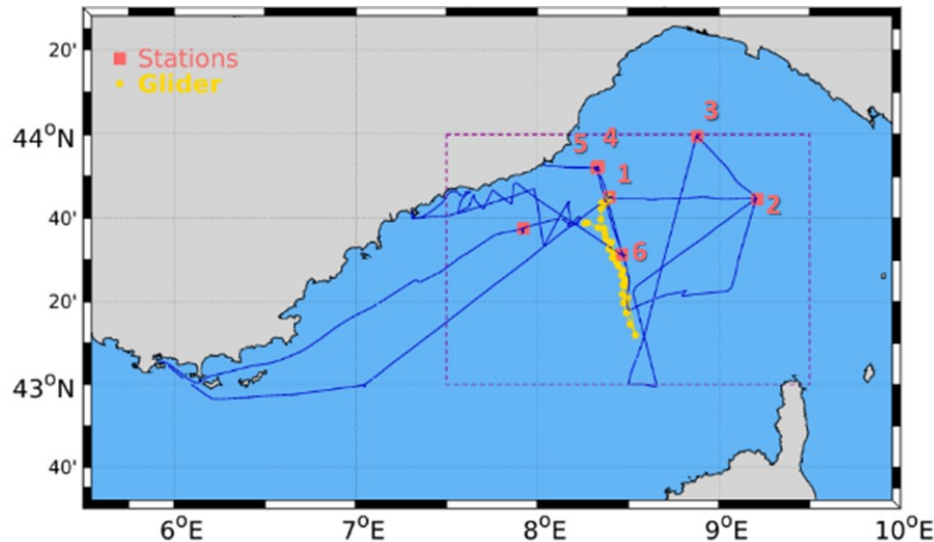
- Ordres de grandeurs : $w \ll u, v$
composante verticale $\sim \text{mm/s}$
composantes horizontales $\sim 10 \text{ cm/s}$
- Caractère éphémère des structures de fine échelle
durée de vie non pérenne, détection satellite en temps réel
- Difficulté d'estimation *in situ*
méthodologies en cours de développement



Objectifs scientifiques

- Vision 3D *in situ* de la dynamique de fine échelle
- Confirmation des prévisions des modèles numériques
- Compréhension des observations satellites à haute résolution

Campagne FUMSECK 2019



Conditions d'échantillonnage

6 stations « vitesses verticales »

4 jours d'échantillonnage

01/05/2019 – 04/05/2019

Instruments de mesure

Sentinel V50, L-ADCP, CTD



3 phases d'acquisition

immersion fixe (10 m)

downcast (x3) / upcast (x3)

→ Stage M2 : Développement d'une méthode d'analyse innovante
Analyse des mesures acoustiques de vitesse verticale

Sentinel V50 *(Teledyne RDI*)*

Acoustic Doppler Current Profiler nouvelle génération

ADCP 500 kHz → portée de la mesure ~50 m

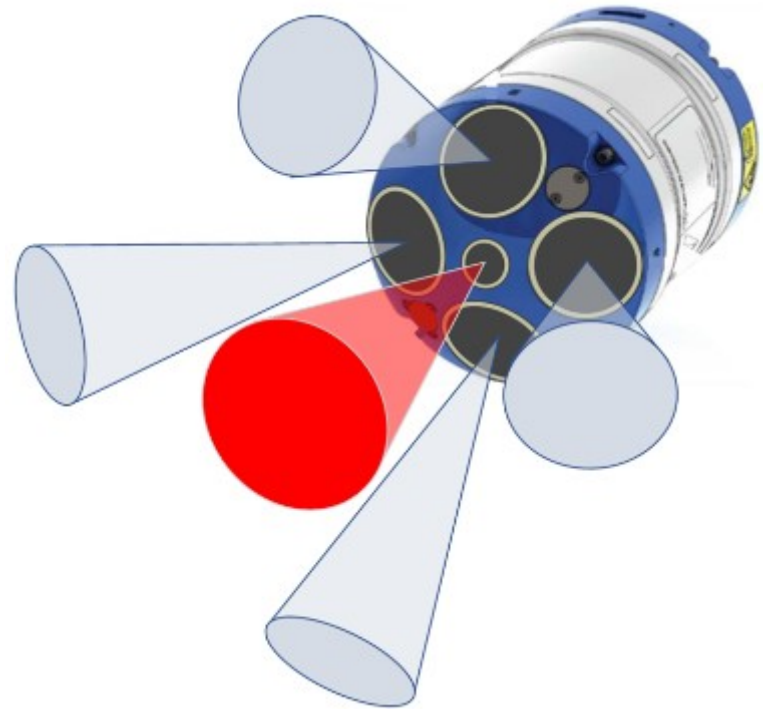
Acquisition basse fréquence [1 Hz]

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^{ème} faisceau
w from 5th beam

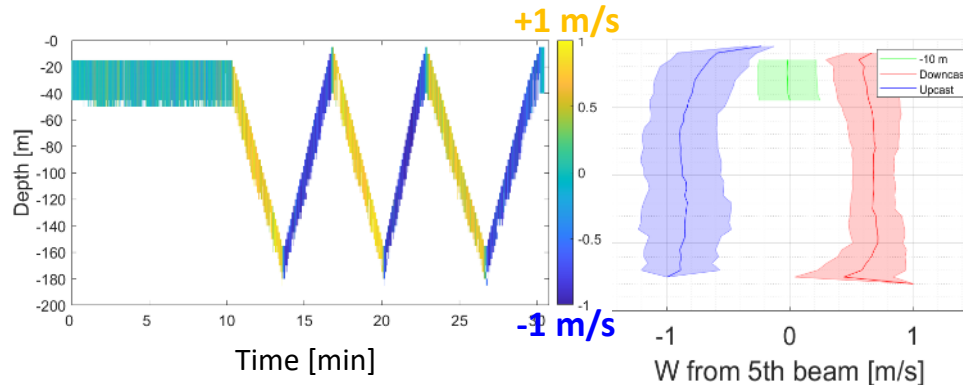


Mesure directe de w en milieu hauturier

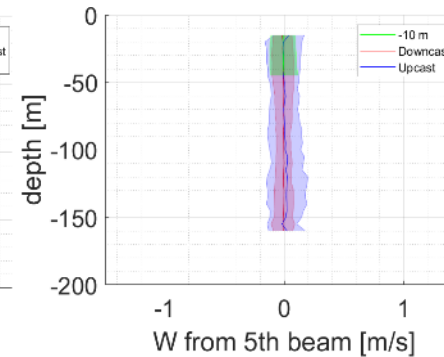
* RDI : Research & Development Instruments

I. Traitement des données : Sentinel 5th beam – STATION 6

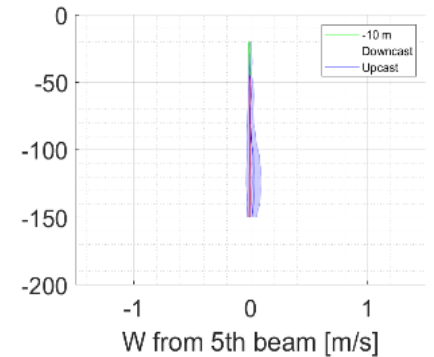
Données brutes



Milieu de traitement



Profils finaux



Réduction progressive des écarts-types : jusqu'à un facteur 20

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

Downcasts : moyenne 0-150 m

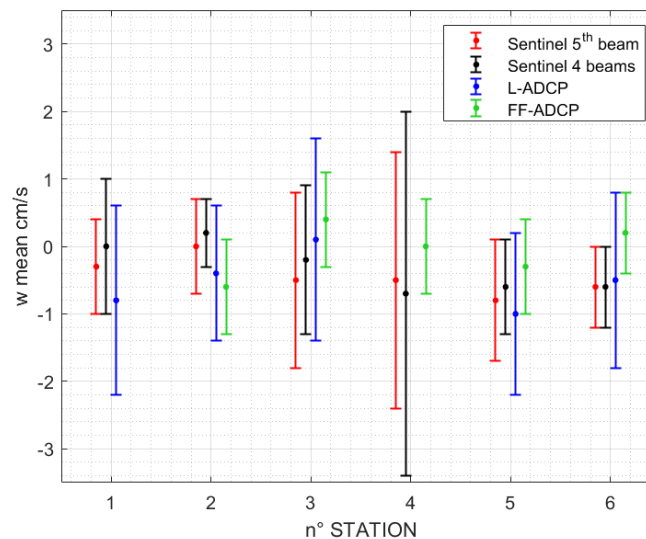
STATION	1	2	3	4	5	6
$\mu [10^{-2} \text{ m/s}]$	-0.3	-0.0	-0.5	-0.5	-0.8	-0.6
$\sigma [10^{-2} \text{ m/s}]$	0.7	0.7	1.3	1.9	0.9	0.6

Incertitude limite intrinsèque $\sim 3 \text{ mm/s}$

II. Comparaison des mesures de vitesses verticales

3 instruments déployés → 4 mesures de w

Sentinel 5th beam, Sentinel 4 beams, **L-ADCP**, **FF-ADCP**



Données downcasts 0 – 150 m

$\mu \sim \text{mm/s}$

$\sigma \sim \text{cm/s}$

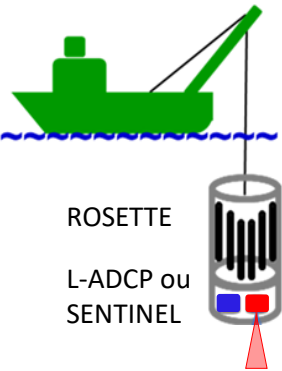
Meilleures précisions :

FF-ADCP & **Sentinel 5th beam**

- 1) Technique **free-fall** très **peu sensible** aux conditions d'agitation
- 2) **Sentinel 5th beam** plus **précis** qu'un ADCP classique

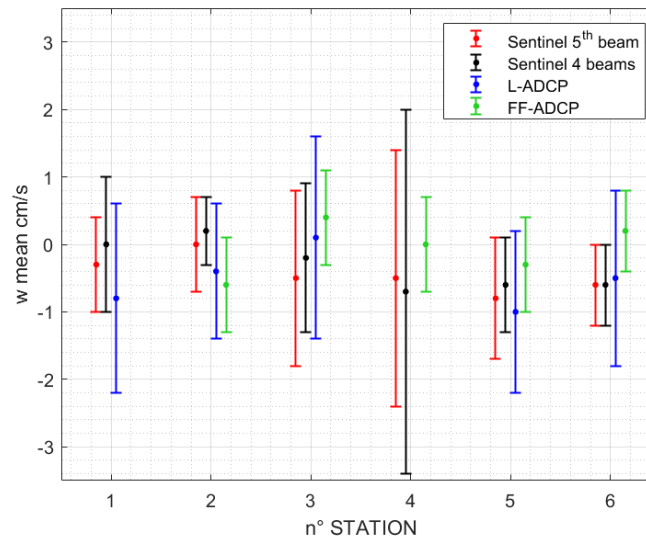
→ Déploiement du Sentinel V en **free-fall** pour une mesure optimale des vitesses verticales

II. Comparaison des mesures de vitesses verticales



3 instruments déployés → 4 mesures de w

Sentinel 5th beam, Sentinel 4 beams, L-ADCP, FF-ADCP



Données downcasts 0 – 150 m

$\mu \sim \text{mm/s}$

$\sigma \sim \text{cm/s}$

Meilleures précisions :

FF-ADCP & Sentinel 5th beam

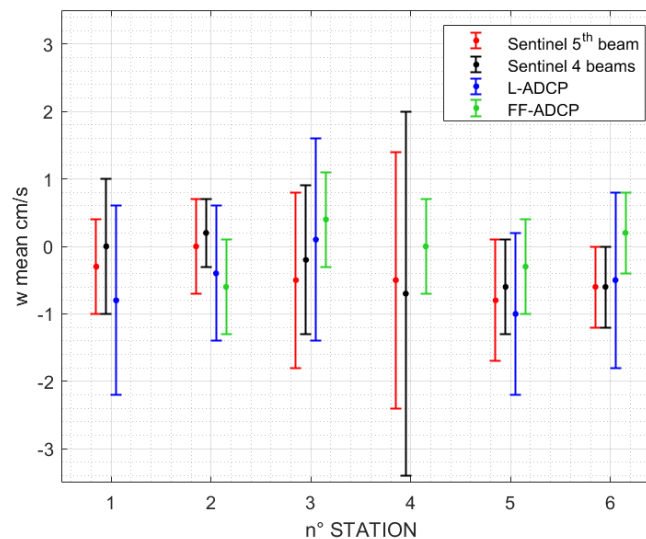
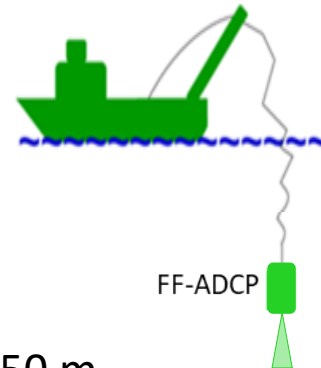
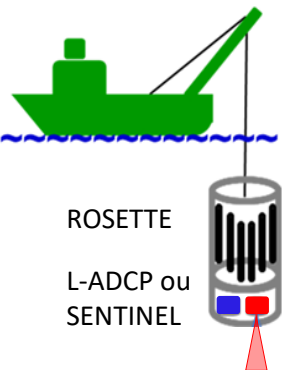
- 1) Technique **free-fall** très **peu sensible** aux conditions d'agitation
- 2) **Sentinel 5th beam** plus précis qu'un ADCP classique

→ Déploiement du Sentinel V en **free-fall** pour une mesure optimale des vitesses verticales

II. Comparaison des mesures de vitesses verticales

3 instruments déployés → 4 mesures de w

Sentinel 5th beam, Sentinel 4 beams, L-ADCP, FF-ADCP



Données downcasts 0 – 150 m

$\mu \sim \text{mm/s}$

$\sigma \sim \text{cm/s}$

Meilleures précisions :

FF-ADCP & **Sentinel 5th beam**

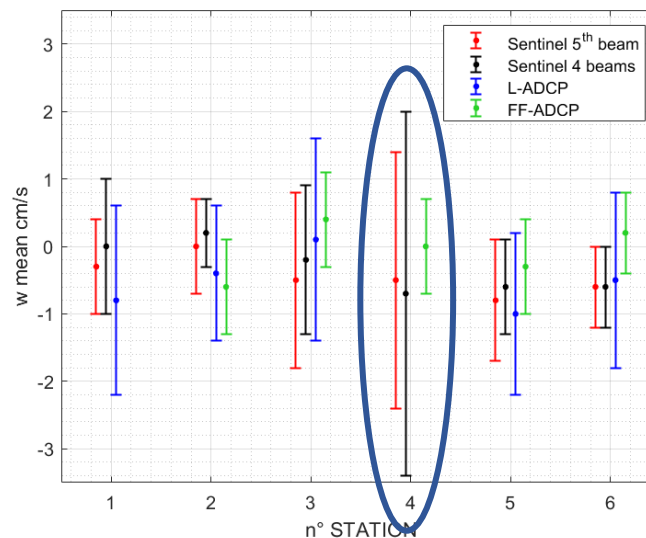
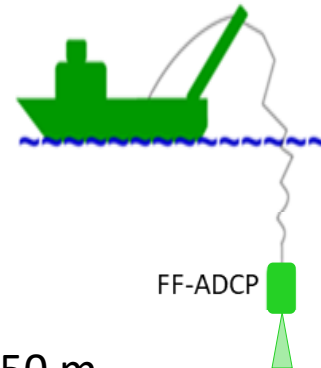
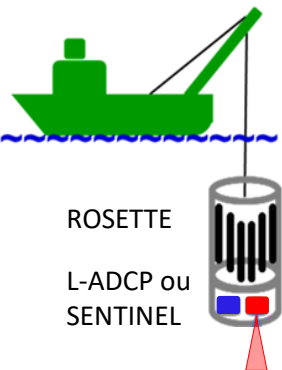
- 1) Technique **free-fall** très **peu sensible** aux conditions d'agitation
- 2) **Sentinel 5th beam** plus précis qu'un ADCP classique

→ Déploiement du Sentinel V en **free-fall** pour une mesure optimale des vitesses verticales

II. Comparaison des mesures de vitesses verticales

3 instruments déployés → 4 mesures de w

Sentinel 5th beam, Sentinel 4 beams, L-ADCP, FF-ADCP



Données downcasts 0 – 150 m

$\mu \sim \text{mm/s}$

$\sigma \sim \text{cm/s}$

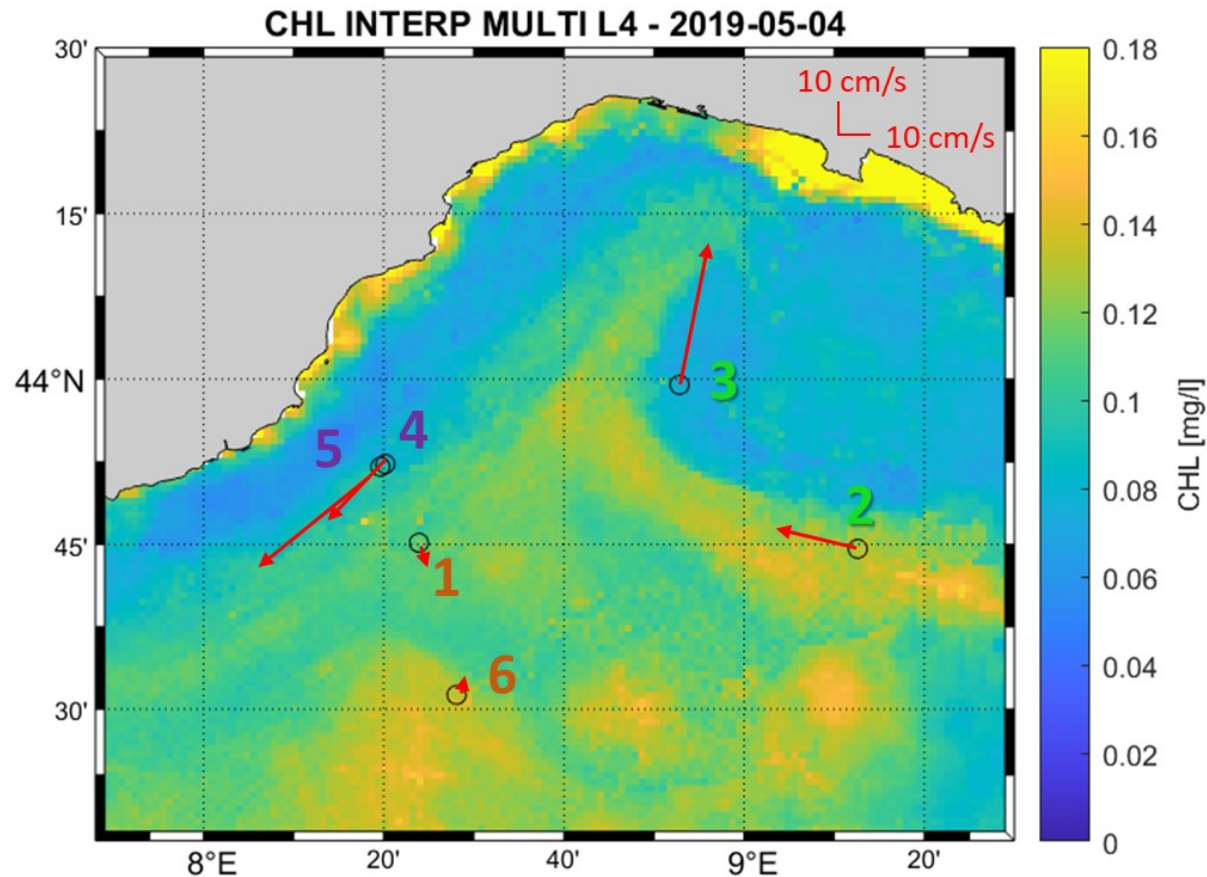
Meilleures précisions :

FF-ADCP & **Sentinel 5th beam**

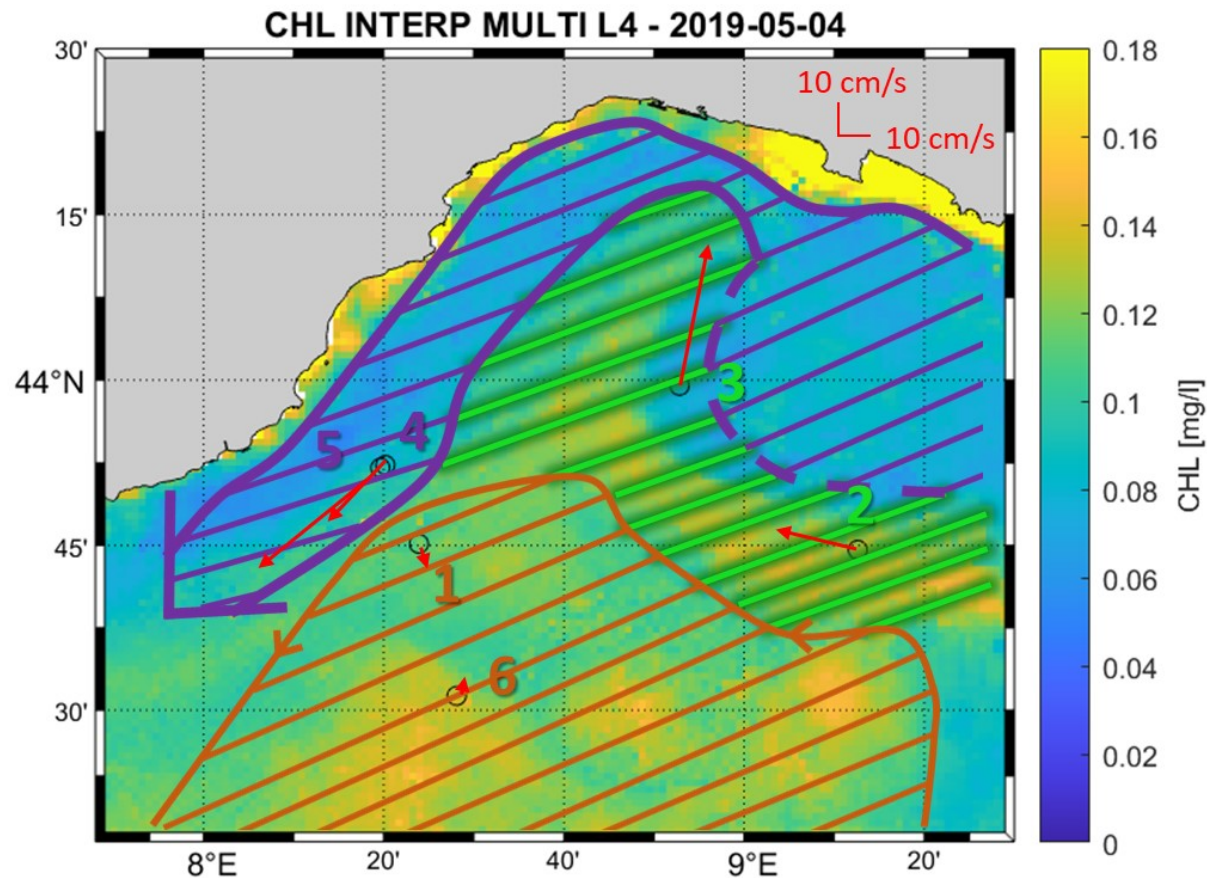
- 1) Technique **free-fall** très **peu sensible** aux conditions d'agitation
- 2) **Sentinel 5th beam** plus précis qu'un ADCP classique

→ Déploiement du Sentinel V en **free-fall** pour une mesure optimale des vitesses verticales

III. Dynamique 3D dans la zone d'étude FUMSECK



III. Dynamique 3D dans la zone d'étude FUMSECK



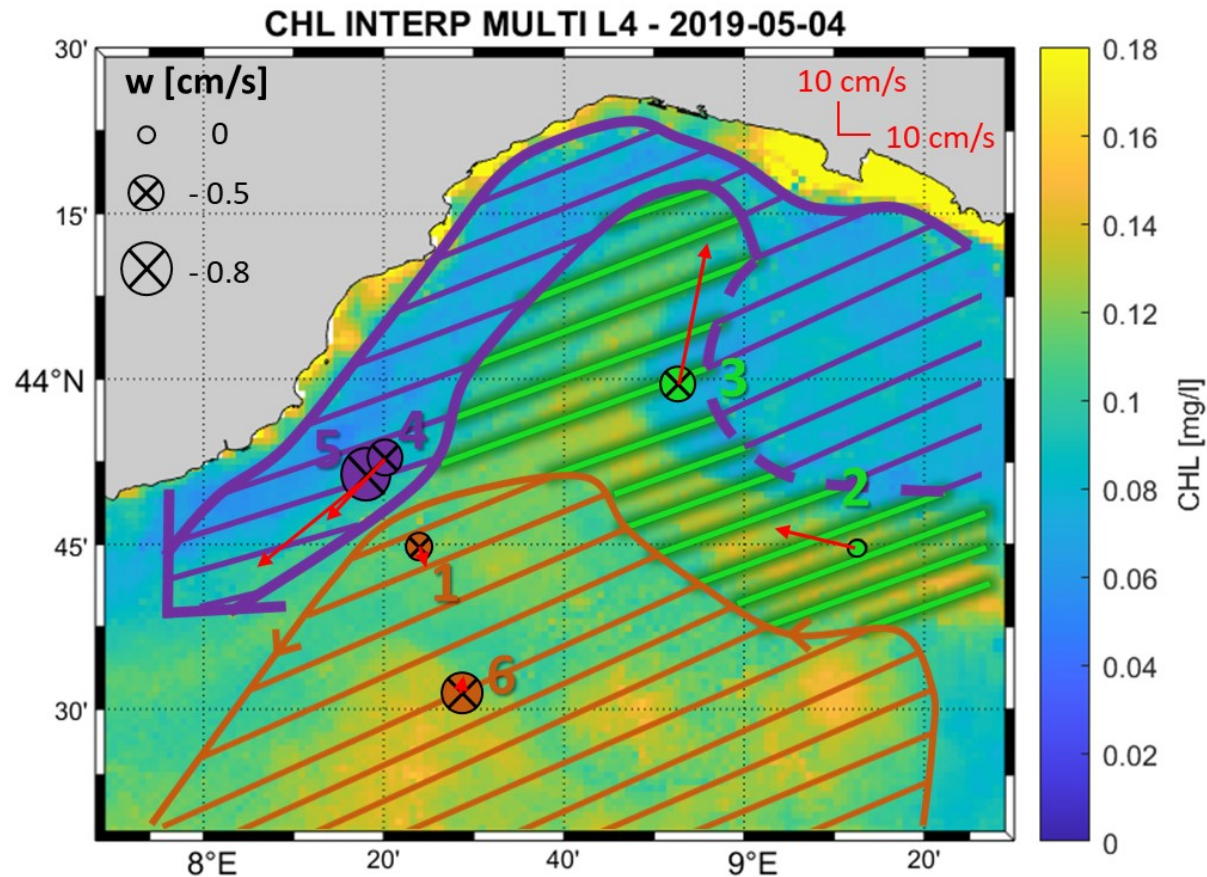
- Distinction de plusieurs zones :

Courant Nord (liguro-provençal)

Recirculation cyclonique

Zone intermédiaire

III. Dynamique 3D dans la zone d'étude FUMSECK



- Distinction de plusieurs zones :

Courant Nord (liguro-provençal)

Recirculation cyclonique

Zone intermédiaire

- Impact sur les vitesses verticales
Intensification des vitesses en bordure
de courant Nord

Questions scientifiques

Comment **mesurer** la vitesse verticale *in situ* ?

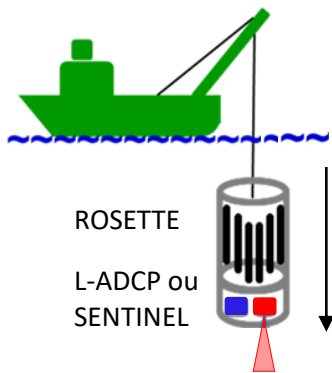
Quelles **avancées** dans la **connaissance** de la dynamique océanique de **fine échelle** seront permises par la mesure directe des vitesses verticales ?

La **mesure directe *in situ*** des **vitesses verticales** pourra-t-elle permettre **l'amélioration** des prévisions du changement climatique et de la **compréhension des échanges verticaux** ?

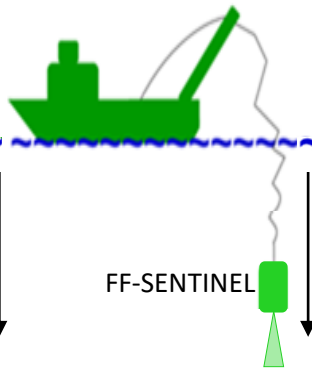
Méthodologies et instrumentation

Mesures *in situ*

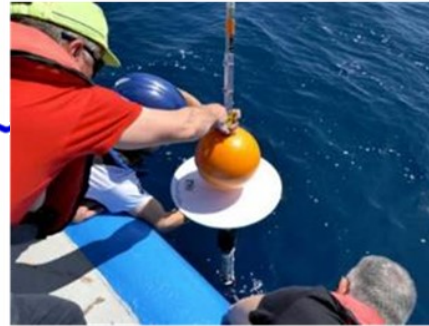
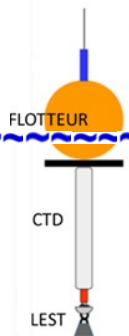
Bathysonde



Free-fall



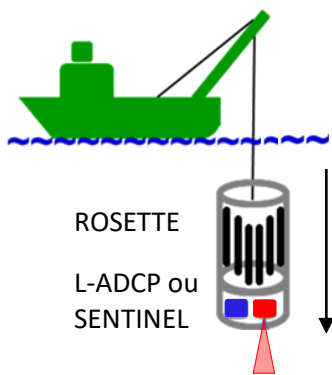
VVP



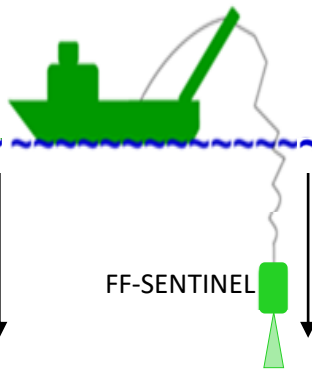
Méthodologies et instrumentation

Mesures *in situ*

Bathysonde



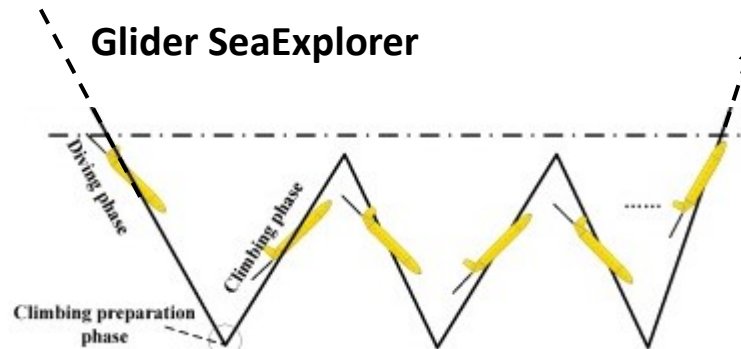
Free-fall



VVP



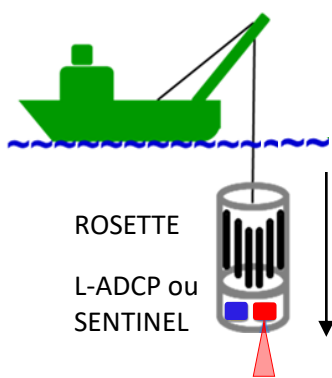
Glider SeaExplorer



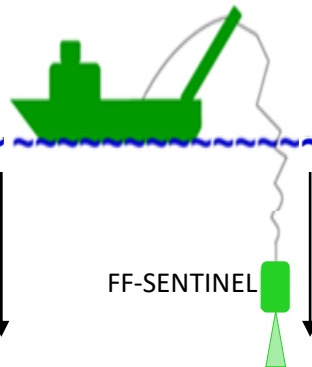
Méthodologies et instrumentation

Mesures *in situ*

Bathysonde



Free-fall



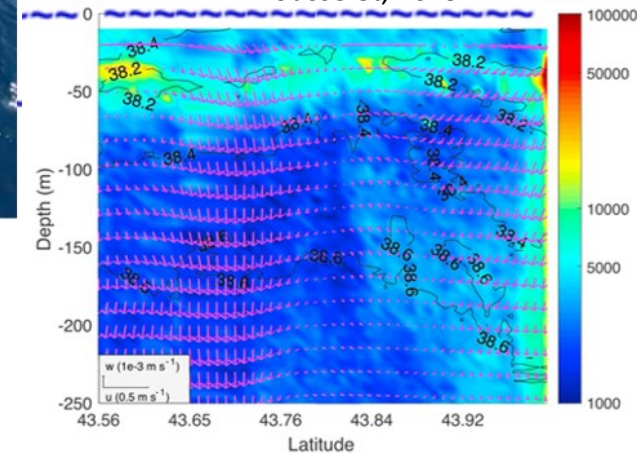
VVP



Estimations indirectes

Résolution de l'équation- ω

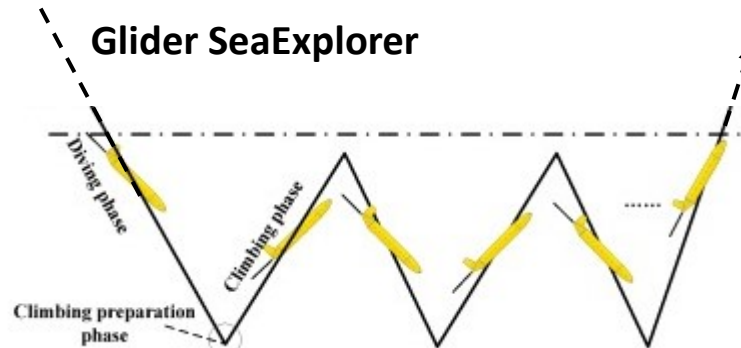
L. Rousselet, 2019



+

Comparaison modèles de circulation non hydrostatiques

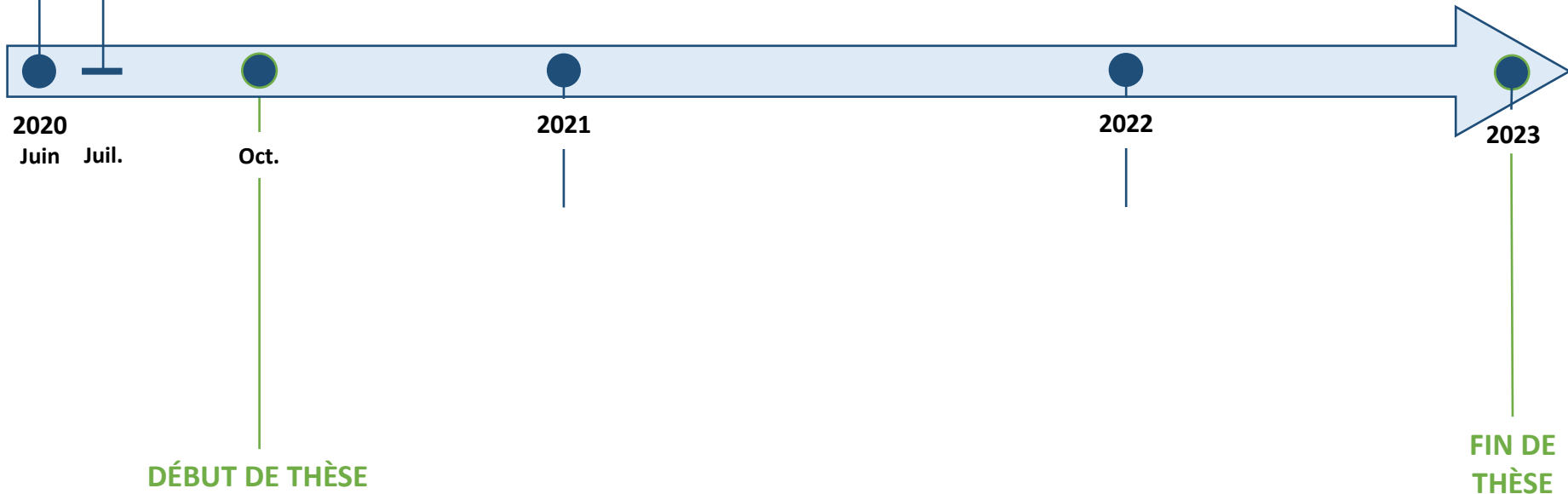
Glider SeaExplorer



Planning de thèse

Fin stage M2 : résultats encourageants sur la méthodologie de mesure *in situ* des vitesses verticales

Article méthodologique
JAOT



Planning de thèse

Fin stage M2 : résultats encourageants sur la méthodologie de mesure *in situ* des vitesses verticales

Article méthodologique
JAOT

Analyse données Glider
FUMSECK (2019)



VVPTest
PROTEVS-Gibraltar



DÉBUT DE THÈSE

ANALYSES PHYSIQUES : vitesses verticales

FIN DE THÈSE

Planning de thèse

Fin stage M2 : résultats encourageants sur la méthodologie de mesure *in situ* des vitesses verticales

Article méthodologique
JAOT

Analyse données Glider
FUMSECK (2019)

Estimations indirectes
Équation- ω

2020

Juin

Juil.

Sept.-Oct.

2021

2022

2023

VVPTest
PROTEVS-Gibraltar



CALYPSO

Analyse
méthodologie
FF-Sentinel

DÉBUT DE THÈSE

ANALYSES PHYSIQUES : vitesses verticales

FIN DE
THÈSE

Planning de thèse

Fin stage M2 : résultats encourageants sur la méthodologie de mesure *in situ* des vitesses verticales

Article méthodologique
JAOT

Analyse données Glider
FUMSECK (2019)

Estimations indirectes
Équation- ω

Comparaison des données
in situ vs. modèles

2020

Juin

Juil.

Sept.-Oct.

2021

2022

2023

VVPTest
PROTEVS-Gibraltar



DÉBUT DE THÈSE

CALYPSO

Analyse
méthodologie
FF-Sentinel

PROTEVS-BIOSWOTMed

ANALYSES PHYSIQUES : vitesses verticales

FIN DE
THÈSE

Conclusion

Objectif final

Parvenir à effectuer ces **estimations directes** de **vitesse verticales** en présence de **dynamique de fine échelle**

Motivation personnelle

- **Très bon** encadrement Stage M2 → futures directrices de thèse
- Projet de thèse qui s'intègre dans un **contexte financé**
- **Collaborations** nationales et internationales
- Questionnement scientifique dans l'**ère du temps**



Merci pour votre attention !



ANNEXES

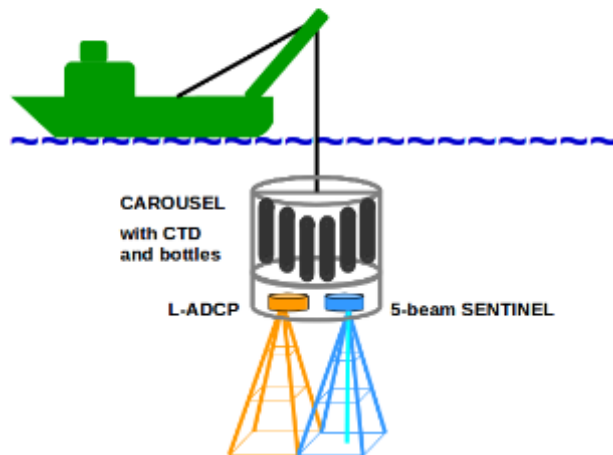
Technique de déploiement : *lowered* – Sentinel V (5-beam ADCP)

Déploiement

The

Five Beam ADCP

Five Beam Acoustic Doppler Current Profiler



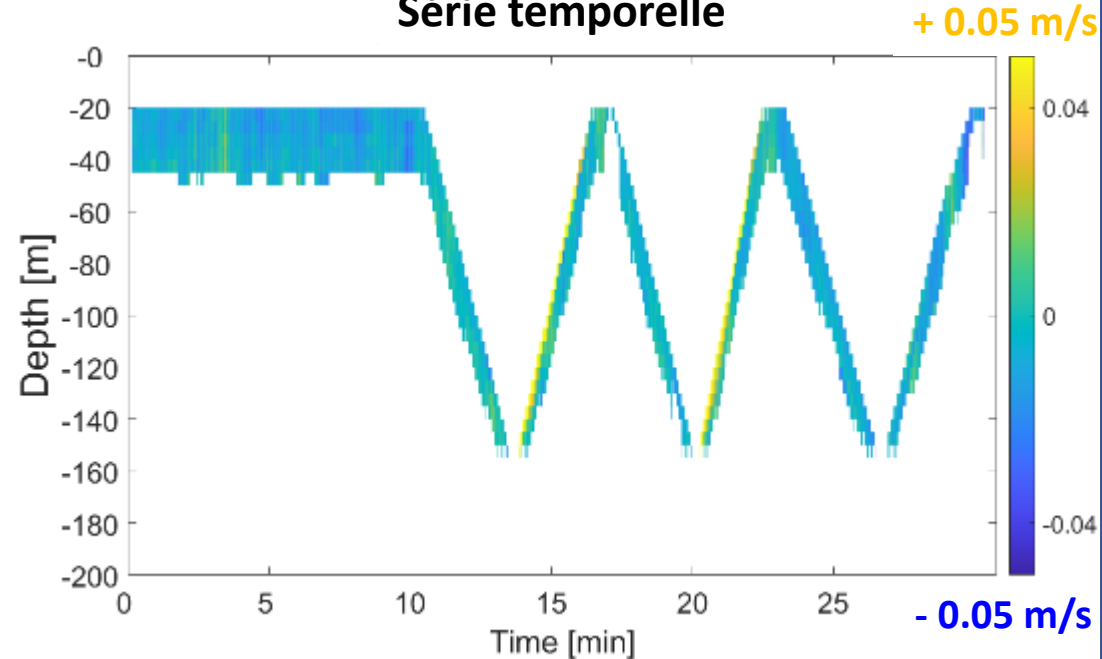
andrea.doglioli@univ-amu.fr



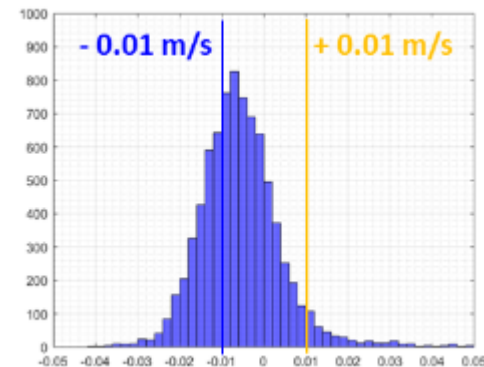
<https://people.mio.osupytheas.fr/~doglioli>

Résultats – STATION 6

Série temporelle



Histogramme



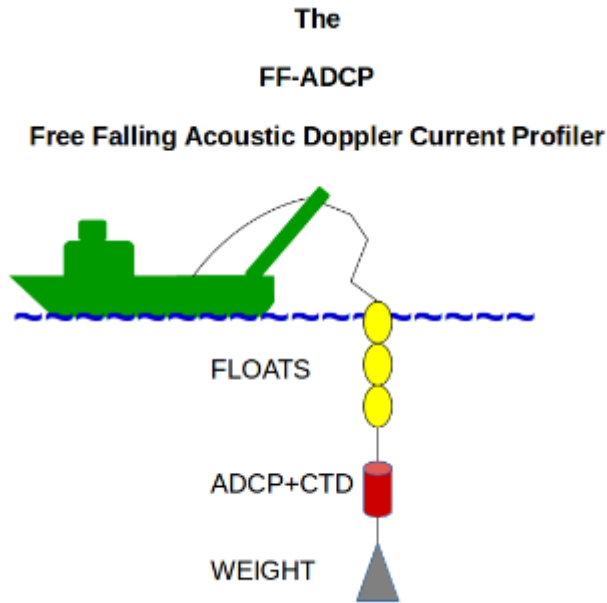
Traitement des données

Chaine d'analyse des
vitesses verticales

C. Comby, 2020

Technique de déploiement : *free-fall*

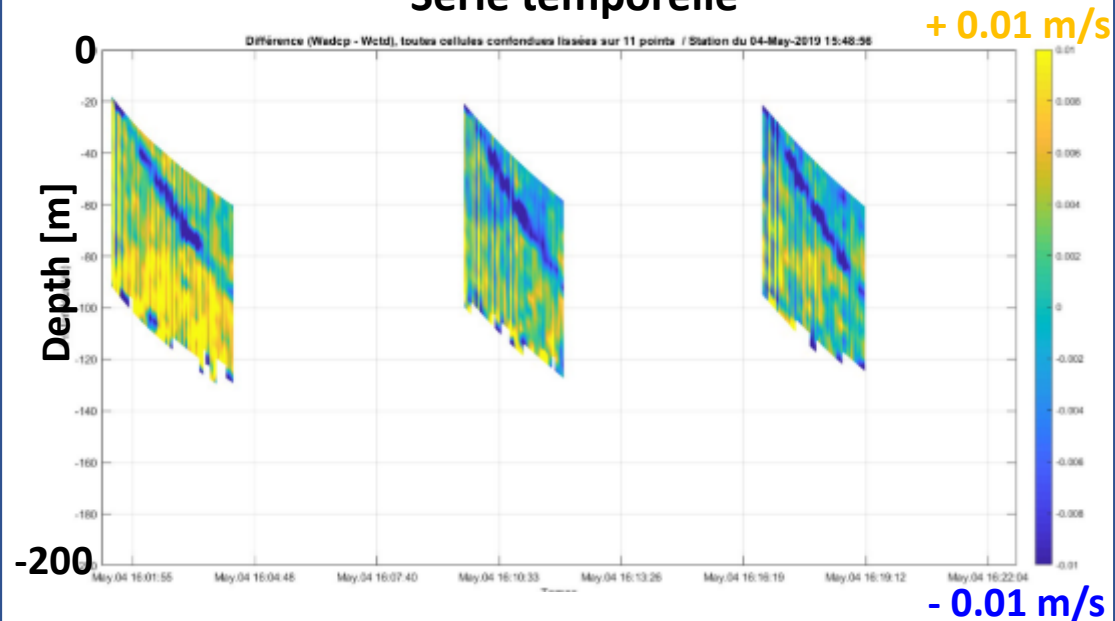
Déploiement



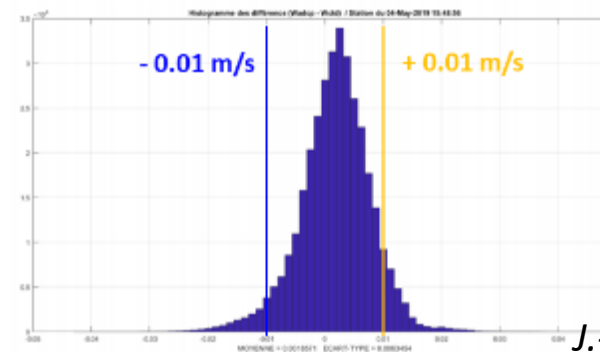
andrea.doglioli@univ-amu.fr  <https://people.mio.osupytheas.fr/~doglioli>

Résultats – STATION 6

Série temporelle



Histogramme



Traitement des données

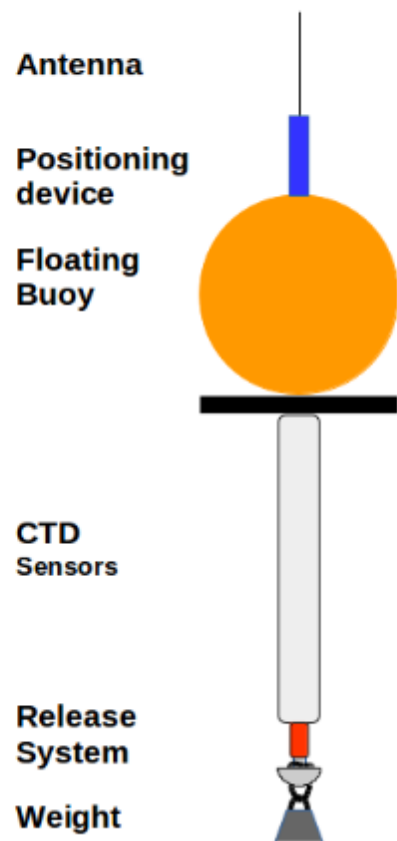
$$W = W_{ADCP} - W_{CTD}$$

J.-L. Fuda, 2019

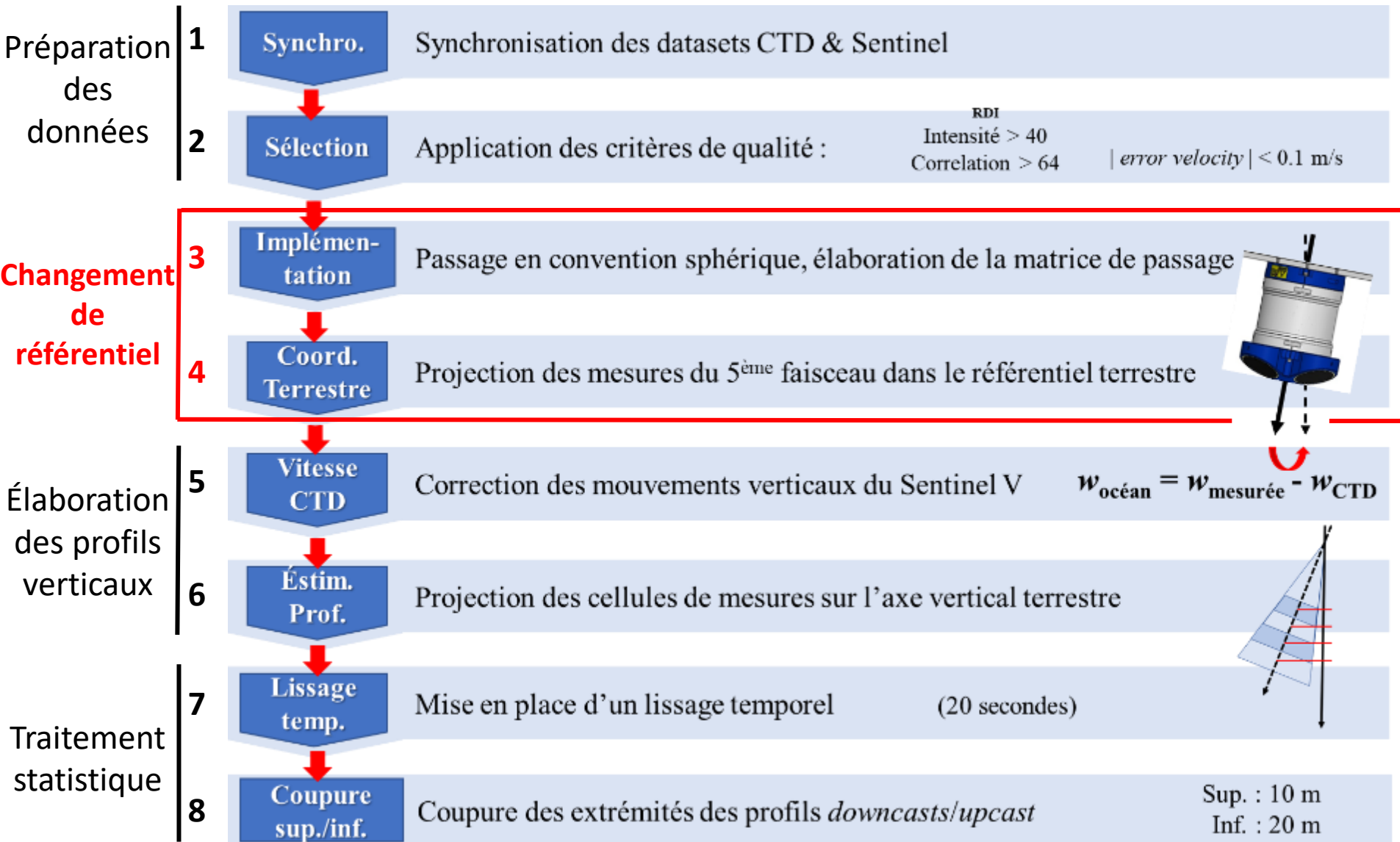
J.-L. Fuda, 2019

Nouveau prototype : profileur de vitesse verticale

The VVP – Vertical Velocity Profiler



Chaine d'analyse des mesures de vitesses verticales



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

Mesures des composantes u et v par **ADCP de coque**

→ Moyenne temporelle : 20 min avant arrivée sur station

profondeurs

0 – 50 m

50 – 100 m

100 – 150 m

Sentinel

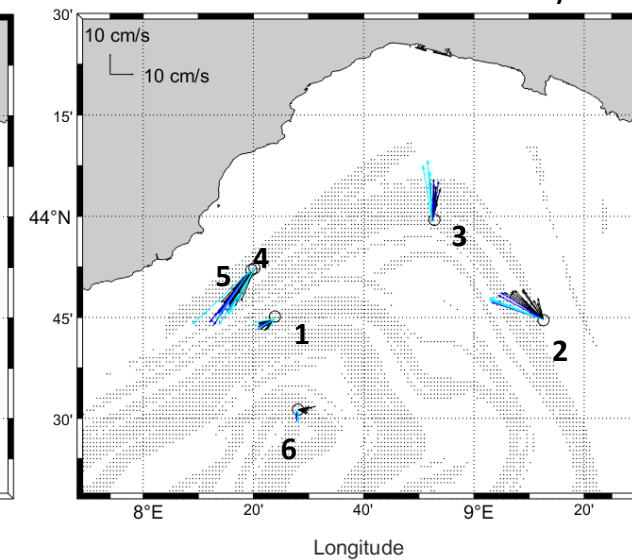
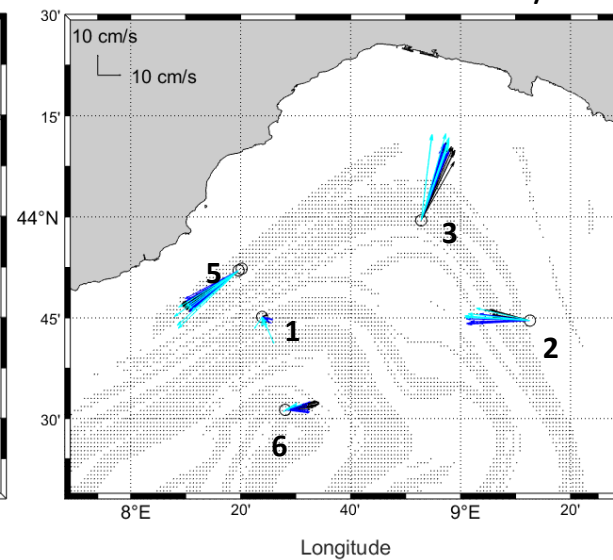
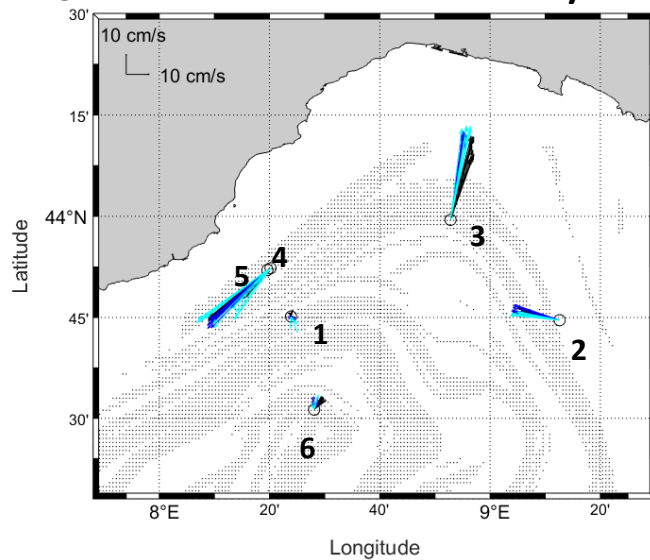
$\sigma = \text{mesure} \times 0.3 \% \pm 0.3 \text{ cm/s}$

L-ADCP

$\text{mesure} \times 0.5 \% \pm 0.5 \text{ cm/s}$

ADCP de coque

$\text{mesure} \times 1.0 \% \pm 0.5 \text{ cm/s}$



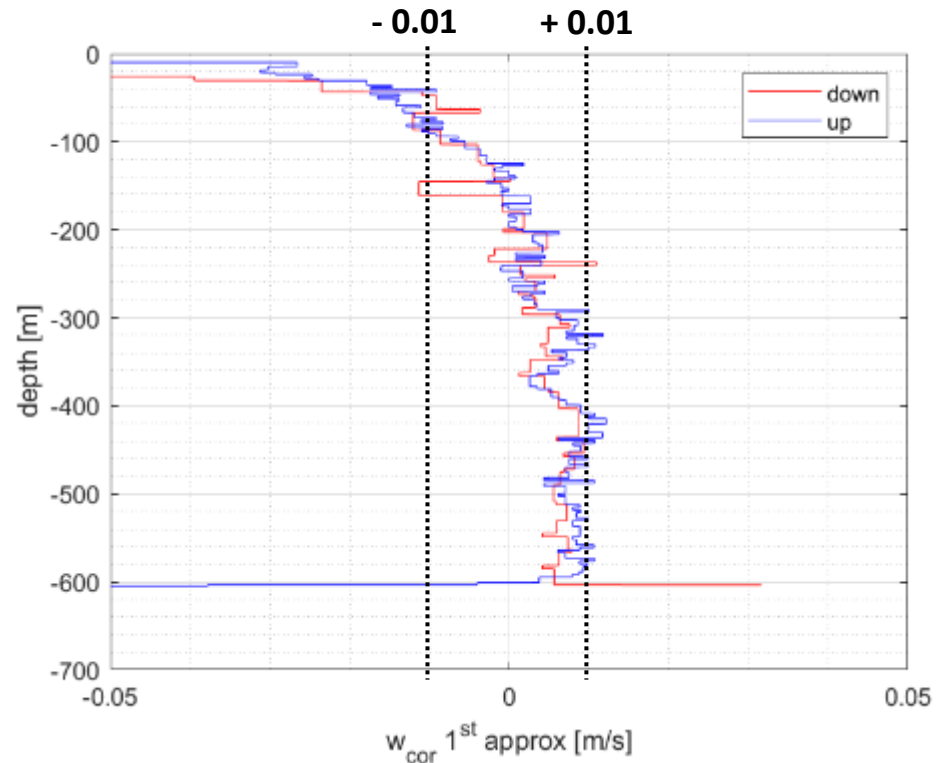
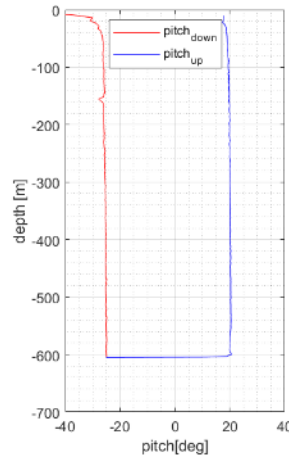
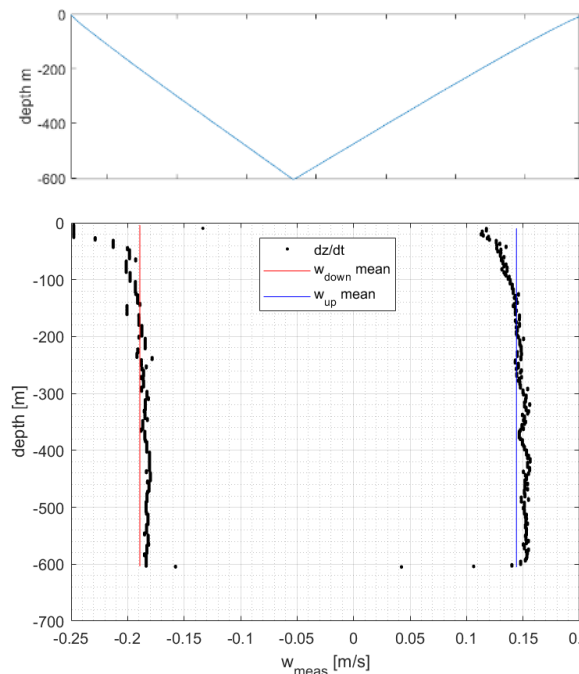
- Concordance u et v entre chaque instrument & dynamique attendue dans la zone
- Confiance dans l'acquisition de w par le **Sentinel 5th beam**

Traitement des données glider SeaExplorer

Étude préliminaire

Deux grandes étapes :

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



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

Échelles d'étude caractéristiques de la dynamique océanique

PLANÉTAIRE	MÉSO-	SOUSMÉSO-	MICRO-	ÉCHELLE
				
> 100 km	50 – 100 km	0.1 – 10 km	< 0.1 km	OBSERVATION
>> mois, années	qlq semaines - mois	qlq jours - semaine	< journée	
Ro << 1	Ro < 1	Ro ~ 1	Ro >> 1	NUMÉRIQUE

Nombre de Rossby

Équilibre : termes non linéaires – vorticité planétaire

$$Ro = \frac{u \partial u / \partial x}{fv} \equiv \frac{U}{fL}$$

Rayon interne de déformation

Rayon de déformation barocline de rossby

$$L_D = \frac{NH}{f}$$

N : fréquence de Brunt-Väisälä
H : profondeur thermocline
f : vorticité planétaire

P les ~ 10 km

Tropiques ~ 100 km

SPASSO

Software Package for an Adaptive Satellite-based Sampling for Oceanographic cruises

Logiciel de soutien pour les campagnes océanographiques visant à échantillonner les structures de (sous)méso-échelle

→ Traitement des acquisitions NRT d'altimétrie satellite, de couleur de l'océan et de modèles prédictifs.

Produits SPASSO : cartographie

- Élévation de la surface libre
- Température de surface
- Abondance chlorophyllienne
- Champs de FSLE
- Champs d'advection
- Paramètre Okubo-Weiss

Détection de structures

Tourbillons
Filaments
Fronts

→ **Analyse couplée
physique – biogéochimie**

Finite Size Lyapunov Exponent

FSLE → outil numérique permettant la détection de structures lagrangiennes cohérentes :

répulsives (modélisation forward) ou **attractives** (modélisation backward)

- 1) Advection de paires de particules numériques dans le temps
- 2) Enregistrement des distances entre paires de particules
- 3) λ obtenu lorsque δ_τ atteint

$$\lambda(x, t, \delta_0, \delta_\tau) = \frac{1}{\tau} \log \frac{\delta_\tau}{\delta_0}$$

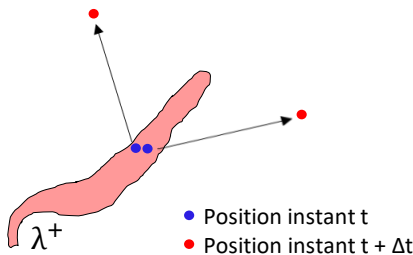
λ : FSLE (jour^{-1})

δ_0 : distance initiale

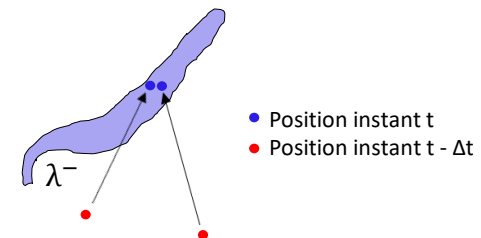
δ_τ : distance finale fixée

τ : période d'intégration (60 jours max)

FORWARD



BACKWARD



NB : Possibilité de calcul des *Finite Time Lyapunov Exponent*

Équation oméga (ω) forme Q-vector

$$N^2 \nabla_H^2 w + f^2 \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} = 2 \nabla_H \cdot \mathbf{Q}$$

Hypothèses de travail

- Approximation de Boussinesq
- Hyp. écoulement quasi-géostrophique
- Équilibre hydrostatique
- Équation de continuité (hyp. fluide incomp.) pour V_g

$$\mathbf{Q} : \text{Q-vector} \begin{pmatrix} Q1 \\ Q2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial V_g}{\partial x} \nabla \rho \\ \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial V_g}{\partial y} \nabla \rho \end{pmatrix}$$

V_g : composantes de la vitesse géostrophique $(u_g, v_g, 0)$

N : fréquence de Brunt Väisälä

f : vorticité planétaire (force de Coriolis)

Solution obtenue par méthode itérative, en utilisant l'opérateur L selon :

$$Lw = 2 \nabla_H \cdot \mathbf{Q}$$

$$\Rightarrow \mathbf{w} = 2 \mathbf{L}^{-1} \nabla_H \cdot \mathbf{Q}$$

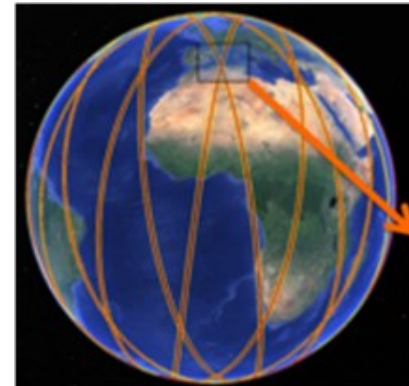
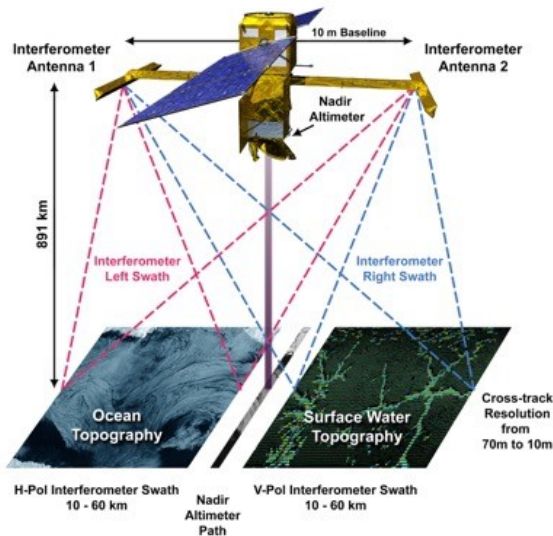
NB : Nécessite de poser comme condition aux frontières $w = 0 \rightarrow$ problème ouvert

Altimétrie satellite révolutionnaire
mesure 2D : *Sea Surface Height*

→ **Mesure à haute résolution spatiale**
Large fauchée & précision l'ordre $\approx$ cm

Phase de *Fast Sampling*
(premiers mois post-lancement)

→ **Mesure à haute résolution temporelle**
1 à 2 passages journaliers
par point de croisement



**Campagne
BioSWOT
(prévision 2022)**



Projet SWOT → occasion exceptionnelle pour l'observation globale des structures de fine échelle

→ Financement participant à la réalisation du sujet de thèse