

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

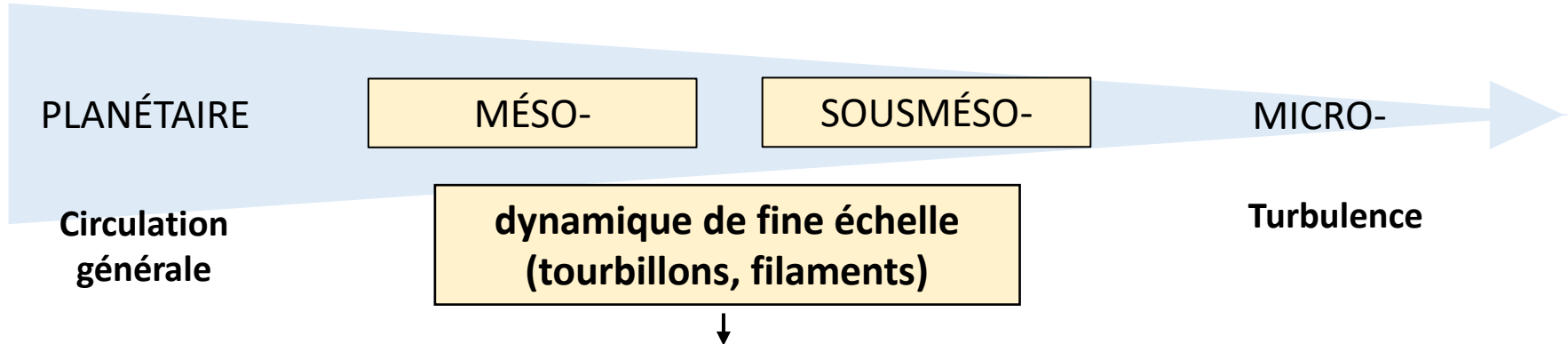
Caroline COMBY

Stage M2 Océanographie Physique et Biogéochimique – OSU Pythéas

06/01/2020 – 05/06/2020

Encadrement : Barrillon, S. & Petrenko, A.

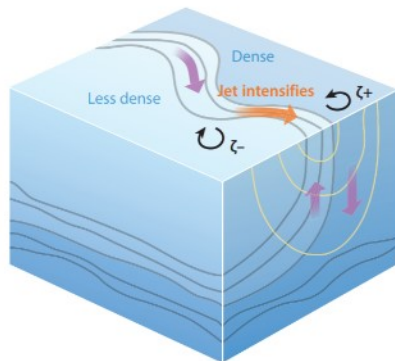
# Échelles typiques d'étude de la dynamique océanique



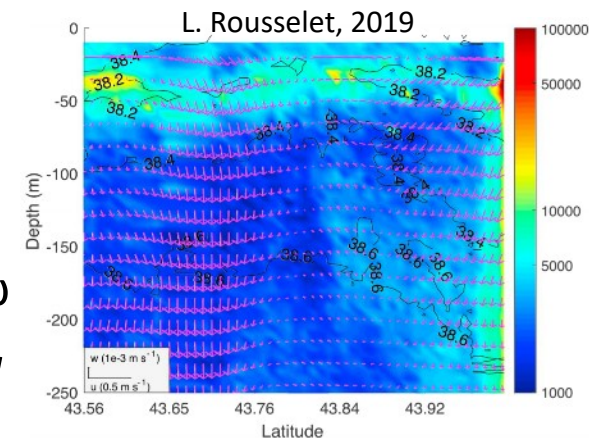
Rôle clé dans l'équilibre océanique global impliquant une dynamique agéostrophique et tridimensionnelle

## Étude des vitesses verticales :

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

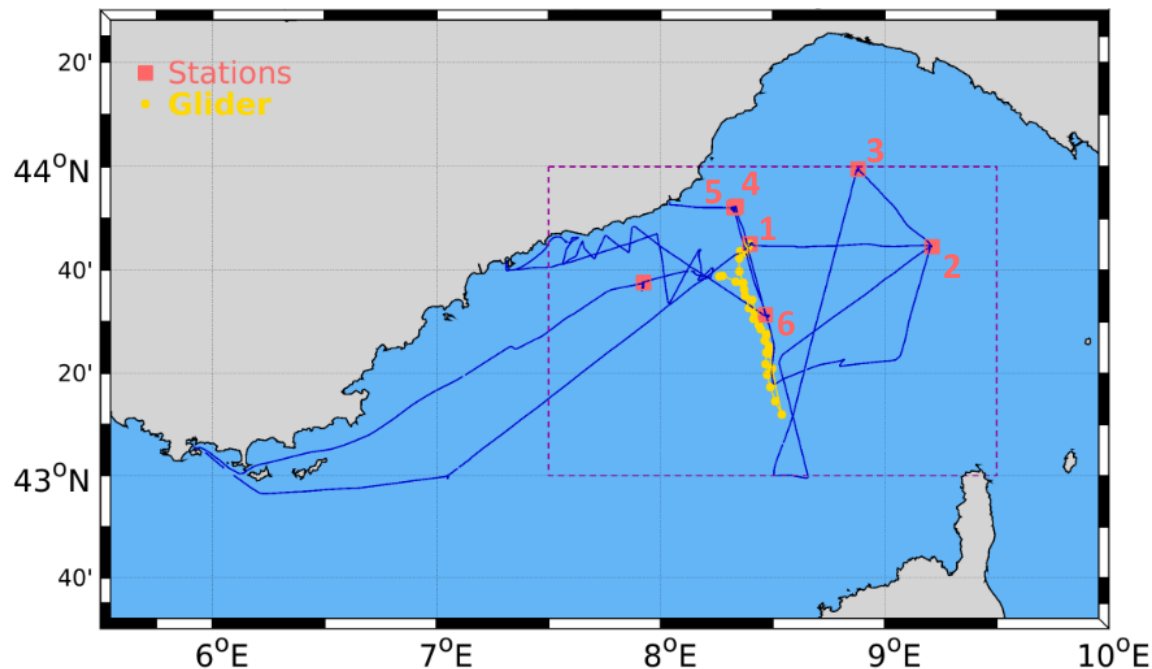


A. Mahadevan, 2016



Importance des vitesses verticales : physique, biologie, biogéochimie

## 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

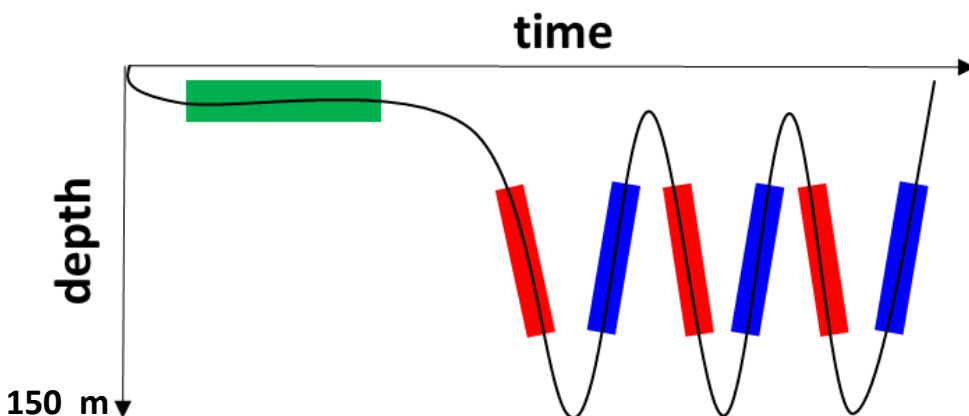


3 phases d'acquisition

immersion fixe (10 m)

downcast (x3)

upcast (x3)



## Sentinel V50 (Teledyne RDI\*)

### ***Acoustic Doppler Current Profiler*** nouvelle génération

ADCP 500 kHz → portée de la mesure ~50 m

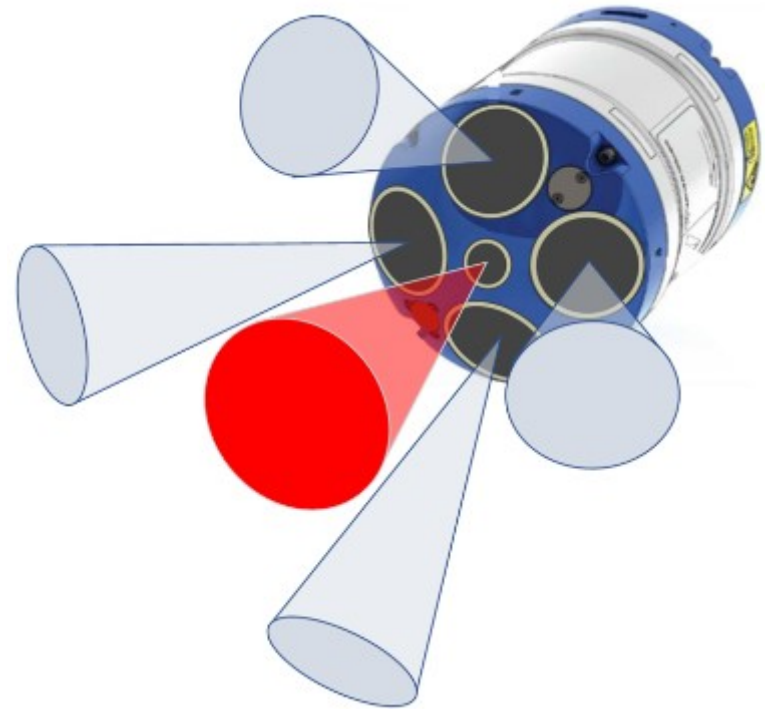
Acquisition basse fréquence [1 Hz]

#### **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***

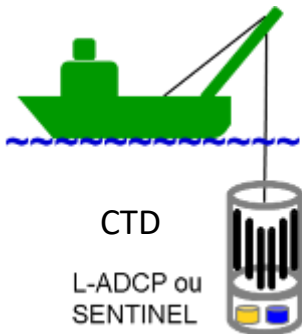


**Mesure directe de  $w$  en milieu hauturier**

\* RDI : Research & Development Instruments

## Objectifs

- I. Détermination de  $w$  mesurée directement par le Sentinel 5<sup>th</sup> beam
- II. Comparaison aux mesures indirectes : Sentinel 4 Beams, L-ADCP, FF-ADCP



### Mesures effectuées :

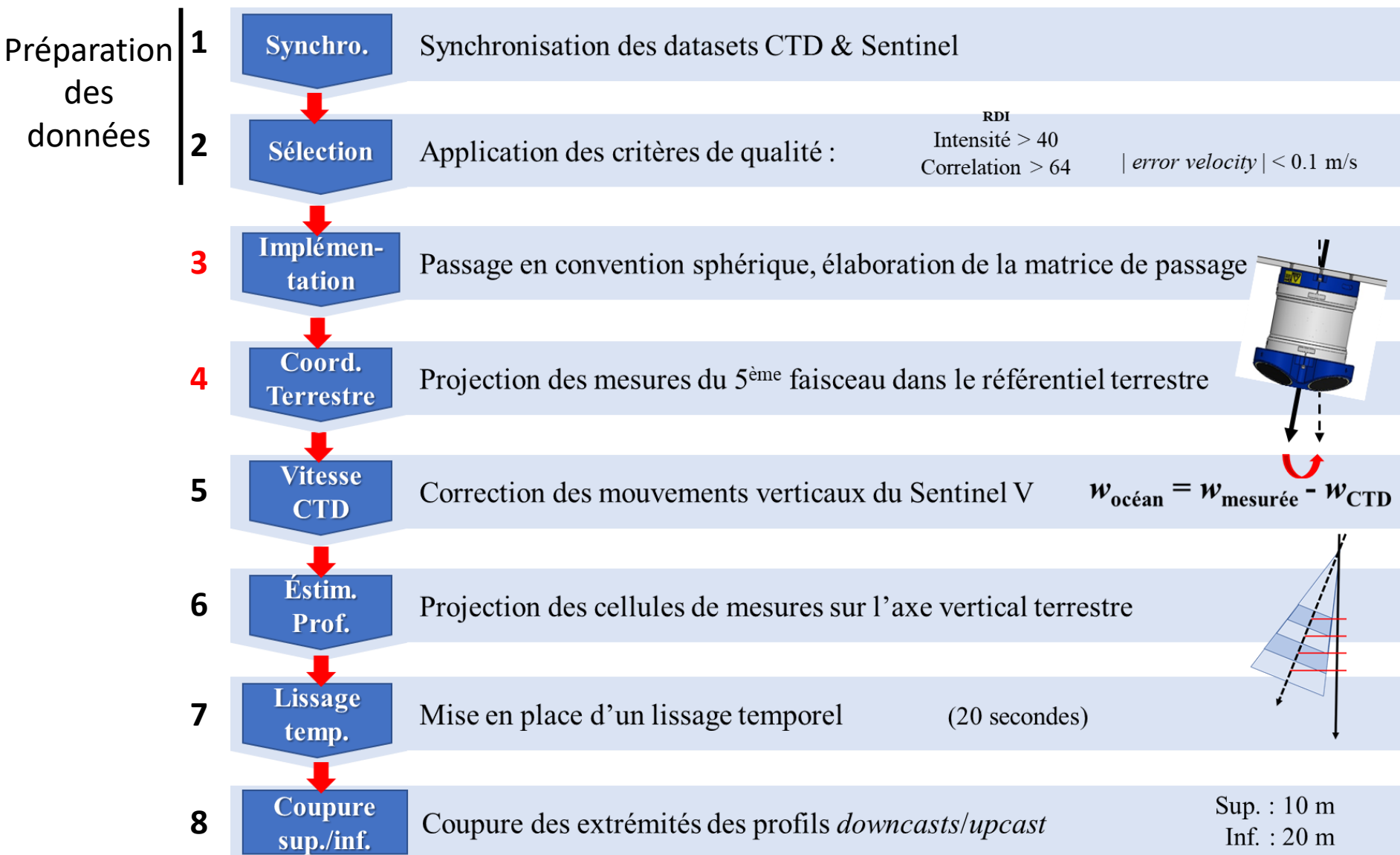
- ✓ Mesures du Sentinel :  $u$ ,  $v$ ,  $w_s$ , attitude, cap
- ✓  $w_{\text{CTD}}$  dérivée de  $\frac{1}{\rho g} \frac{\partial p}{\partial t}$  (approximation hydrostatique)

### Défis :

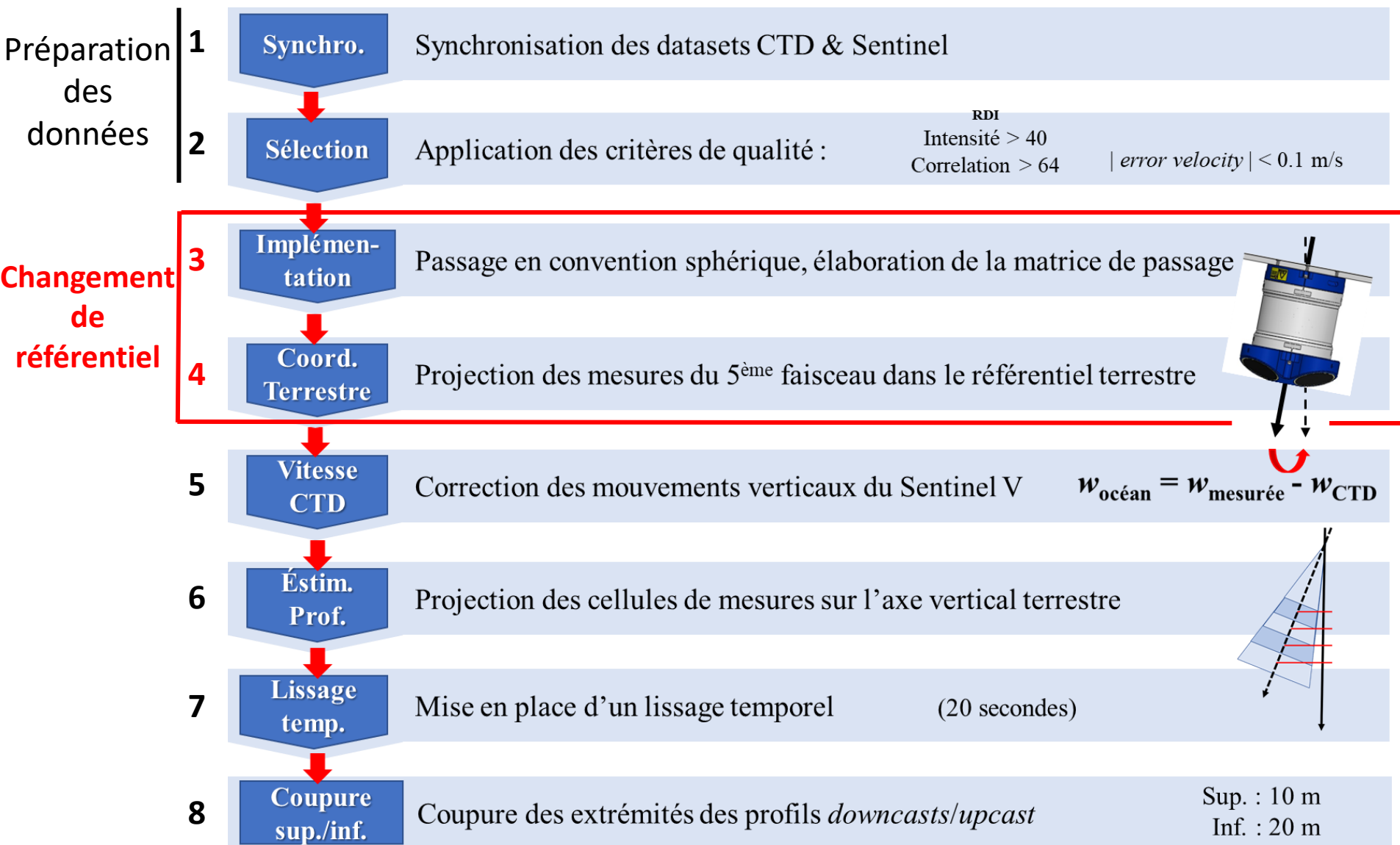


- Nouveauté de l'instrument, utilisation innovante
- Méthode de traitement développée *ex nihilo*
- Généralisation des conventions → extension à d'autres instruments

# Méthode de traitement des mesures de $w$

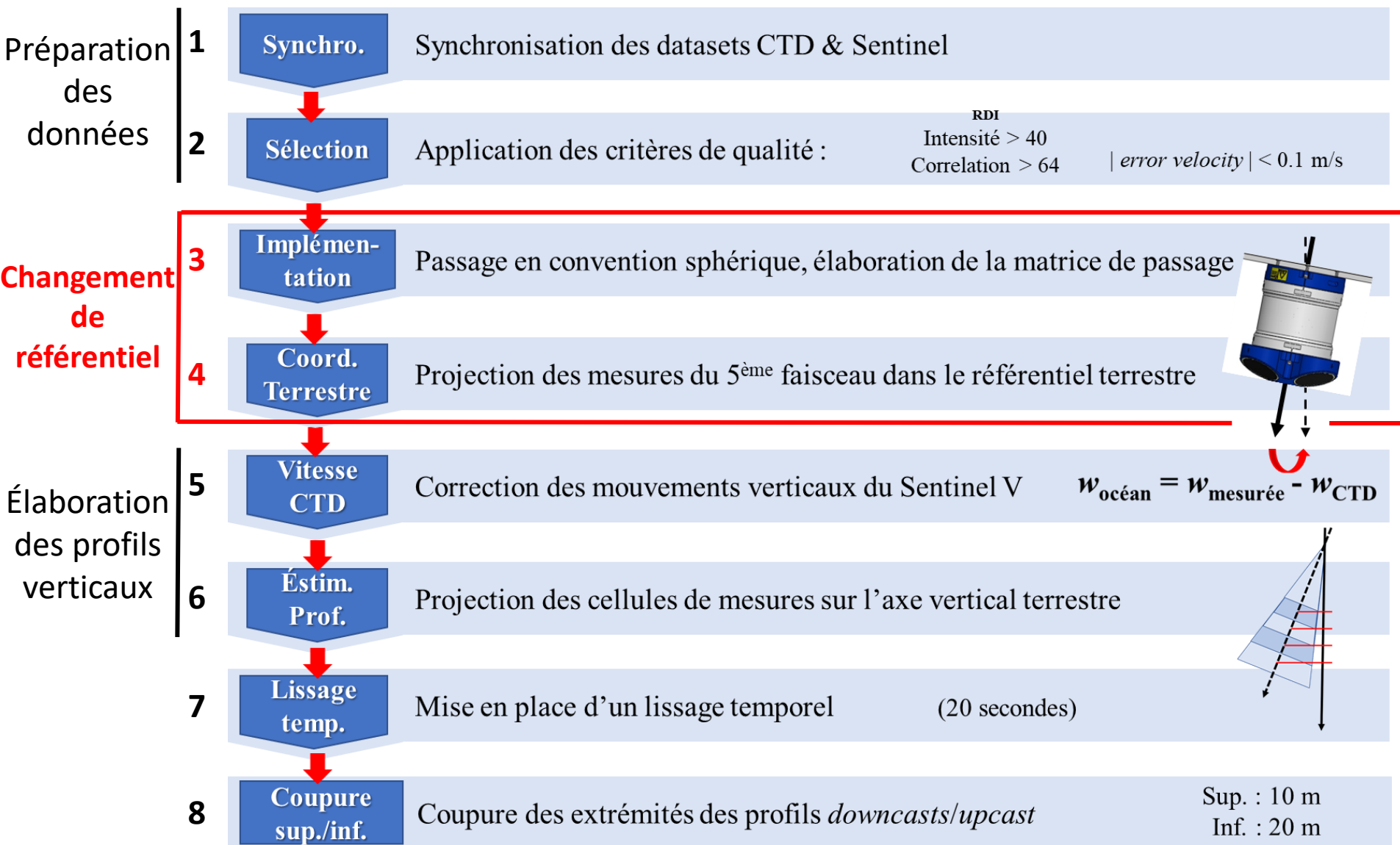


# Méthode de traitement des mesures de $w$



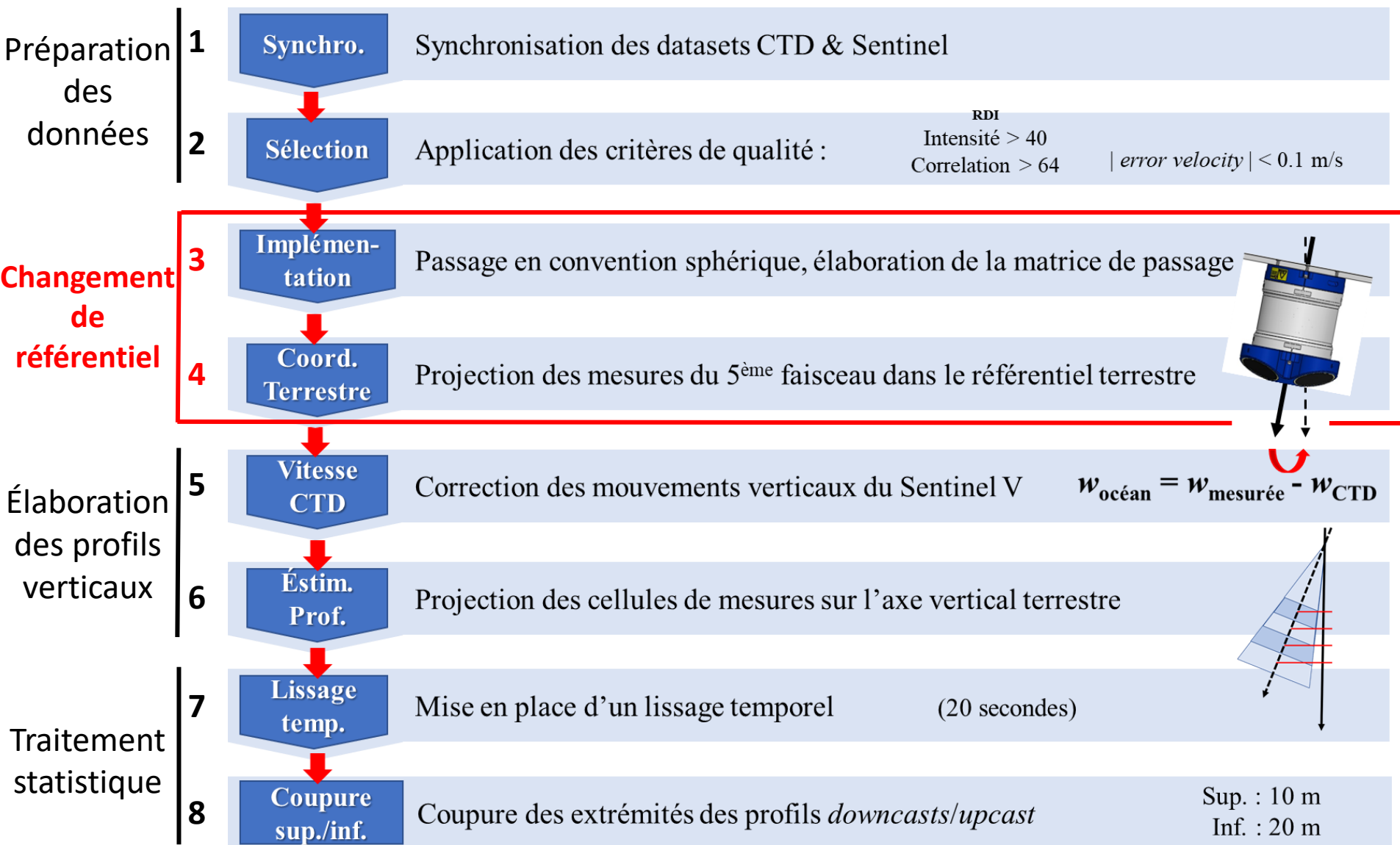


# Méthode de traitement des mesures de $w$



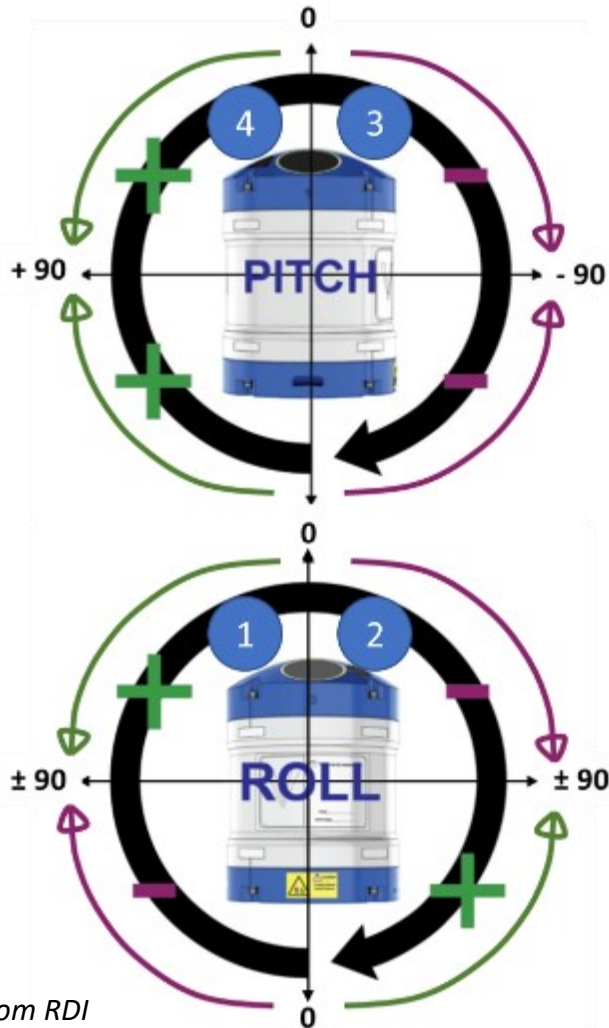


# Méthode de traitement des mesures de $w$

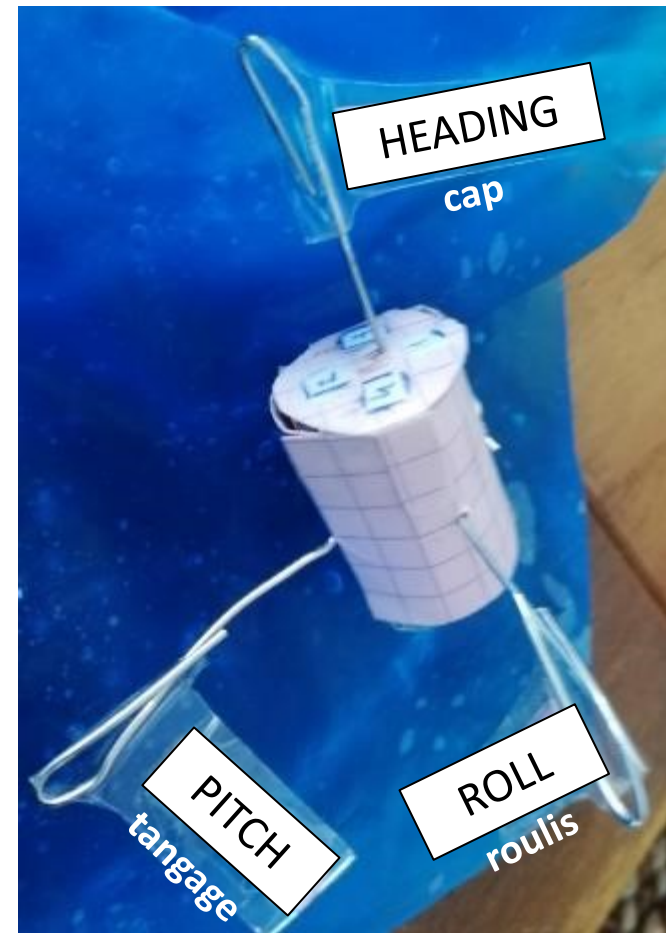


### 3. Généralisation de la convention des angles d'attitude

#### Convention RDI

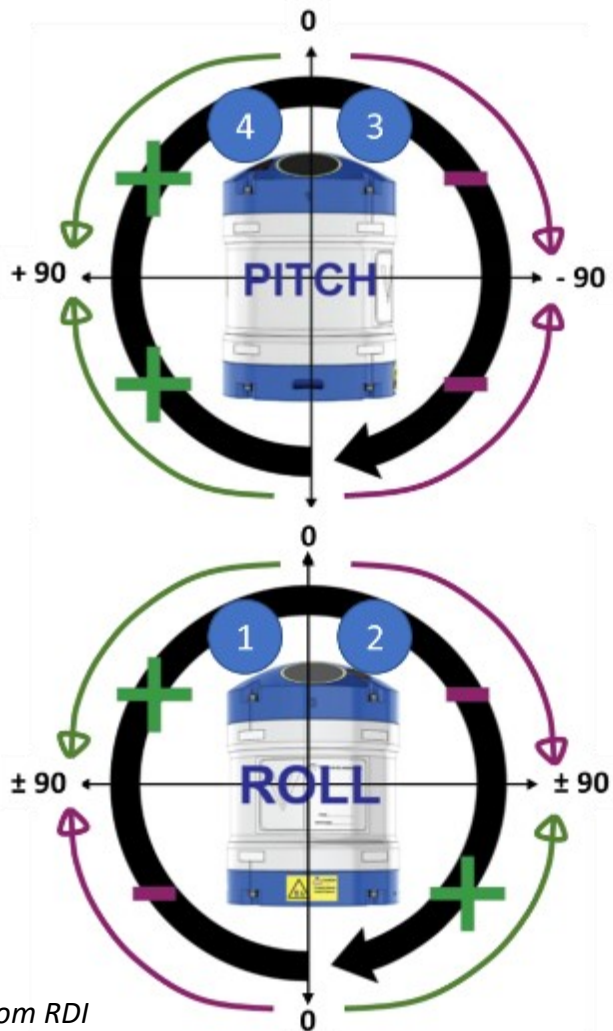


Adapted from RDI



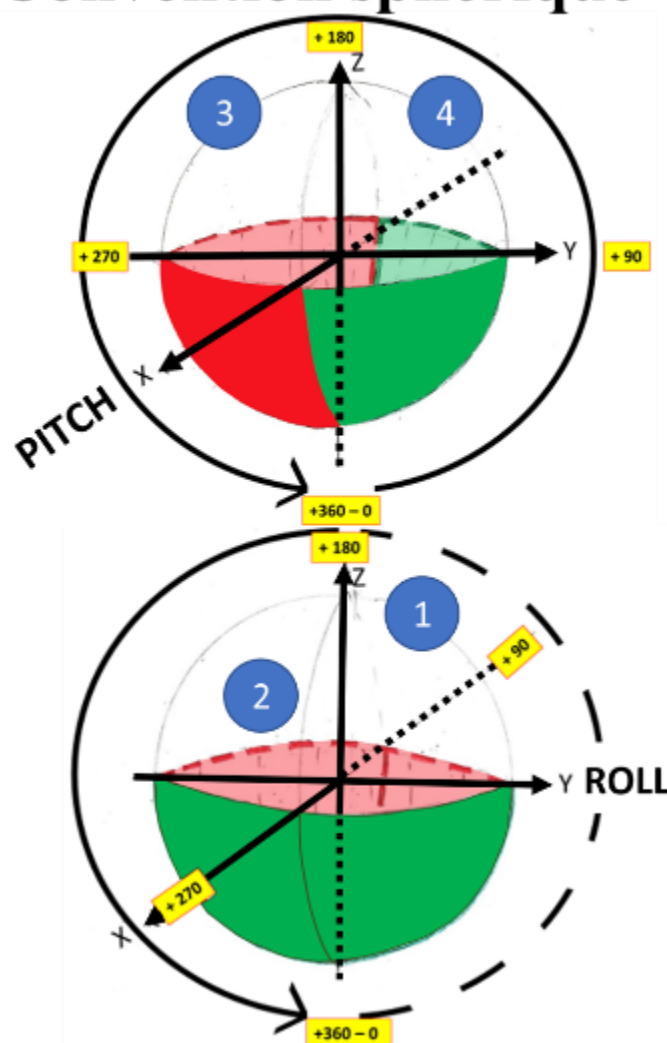
### 3. Généralisation de la convention des angles d'attitude

#### Convention RDI

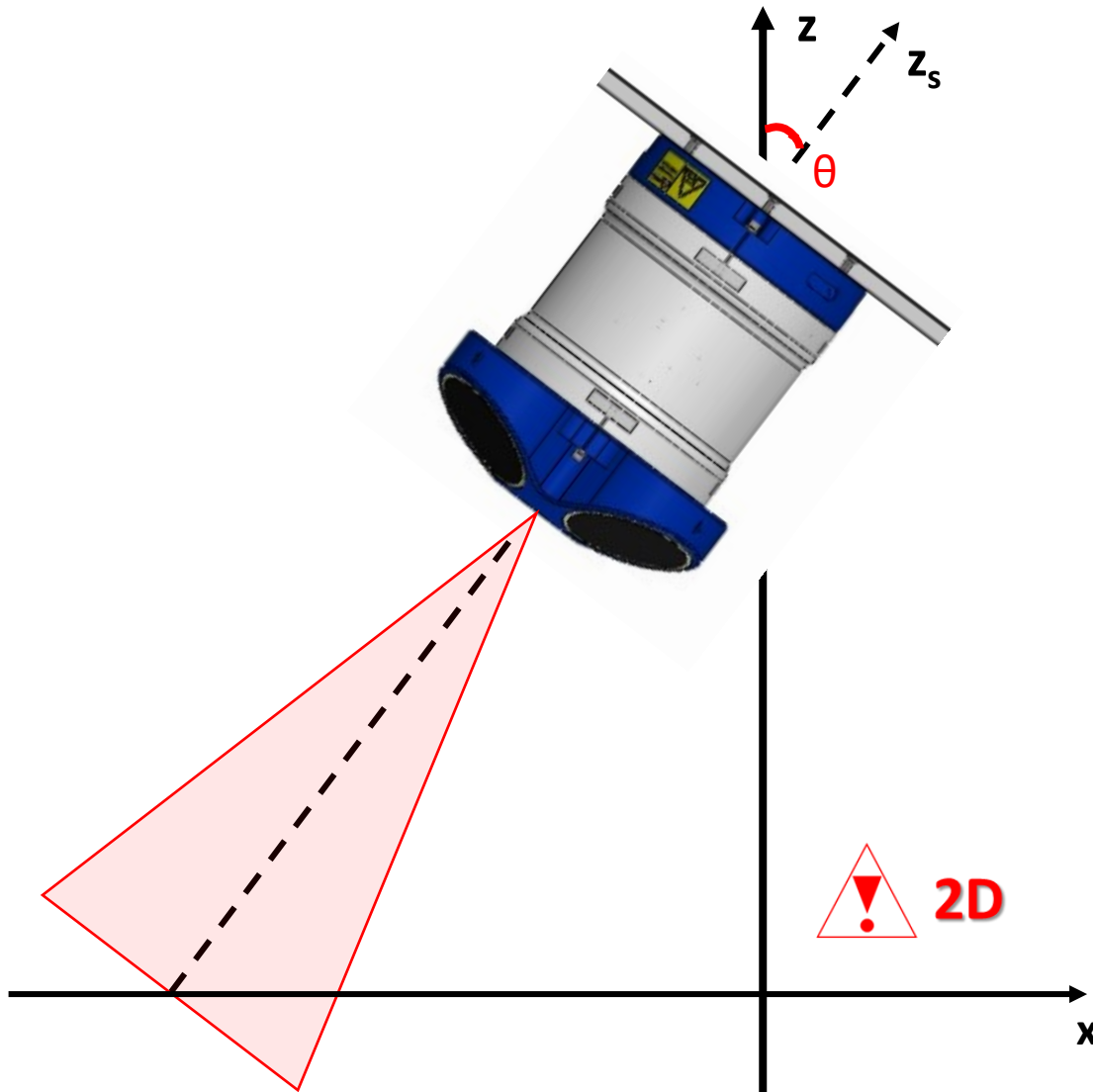


Adapted from RDI

#### Convention sphérique

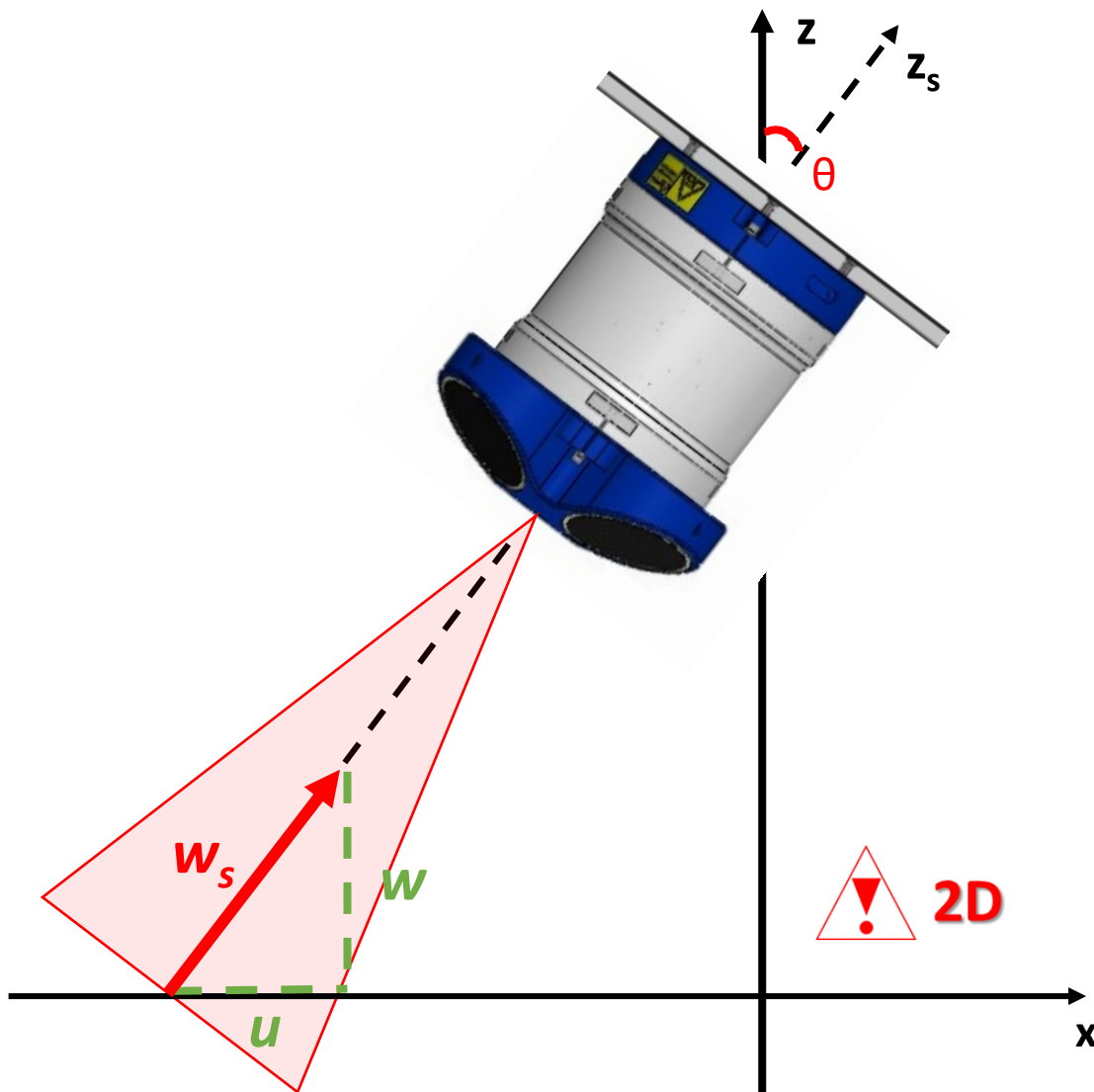


## 4. Changement de référentiel Sentinel → Terre



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

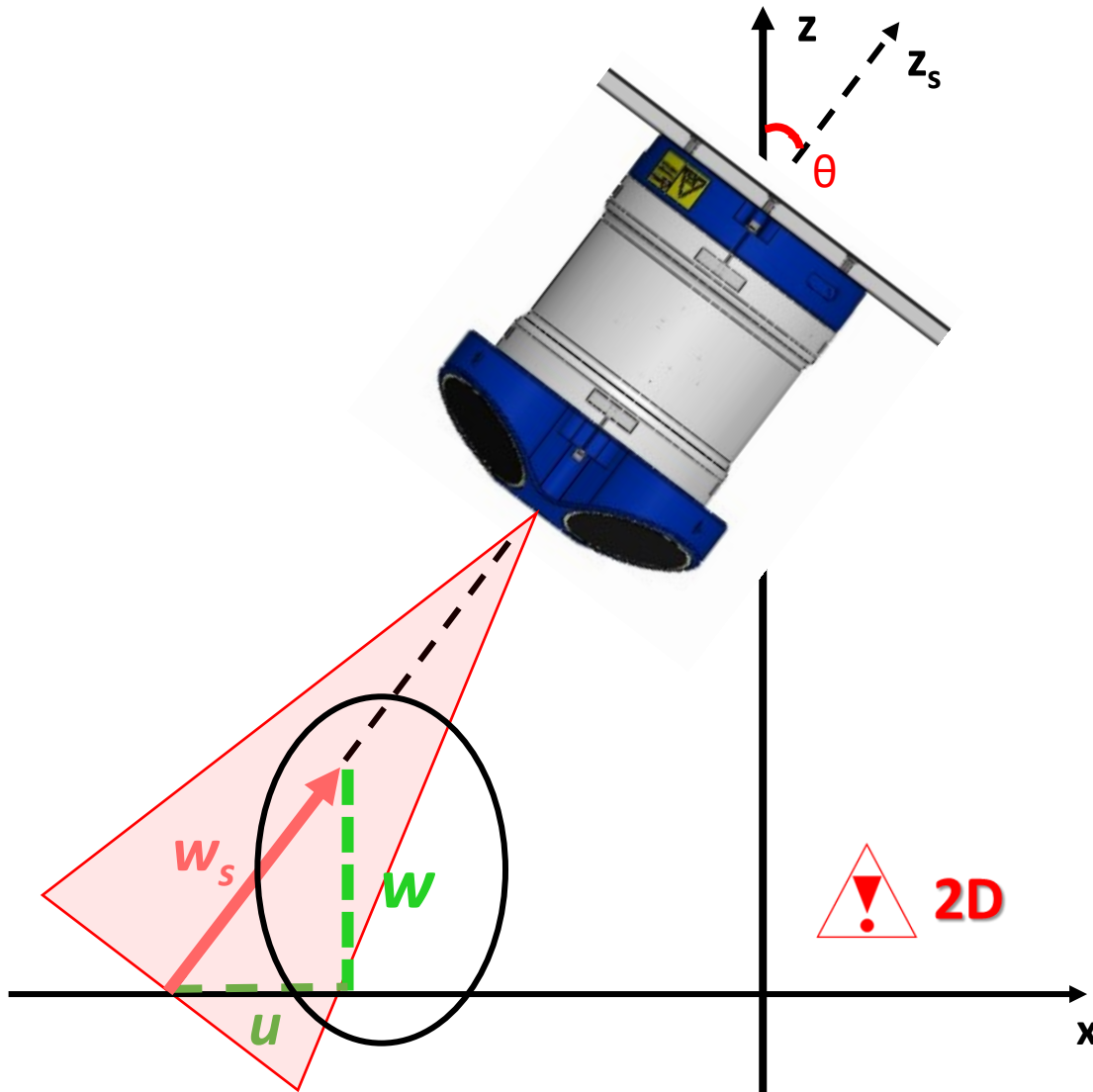
## 4. Changement de référentiel Sentinel → Terre



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

Mesure par le faisceau vertical  $w_s$  → plusieurs composantes  $u, v, w$

## 4. Changement de référentiel Sentinel → Terre



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

Mesure par le faisceau vertical  $w_s$  → plusieurs composantes  $u, v, w$

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

## 4. Changement de référentiel Sentinel → Terre



Compas magnétique

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

Transducteur acoustique

- Composantes de vitesse :  $w_s$ ,  $u$ ,  $v$

Mise en place d'une matrice de passage

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

Terrestre ← Sentinel  
NB : M inversible

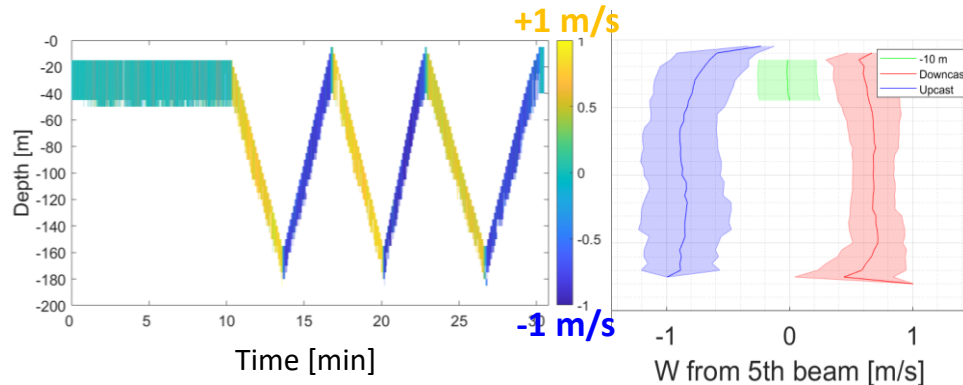
$$M = \begin{bmatrix} \cos H * \cos R - \sin H * \sin P * \sin R & \sin H * \cos P & -\cos H * \sin R - \sin H * \sin P * \cos R \\ -\sin H * \cos R - \cos H * \sin P * \sin R & \cos H * \cos P & \sin H * \sin R - \cos H * \sin P * \cos R \\ \cos P * \sin R & \sin P & \cos P * \cos R \end{bmatrix}$$

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

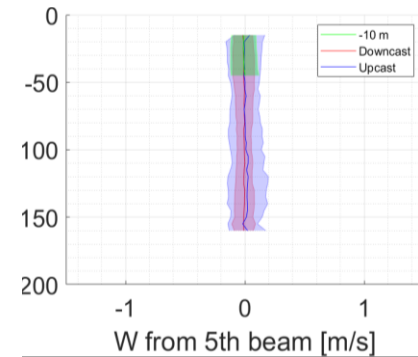


# I. Traitement des données : Sentinel 5<sup>th</sup> beam – STATION 6

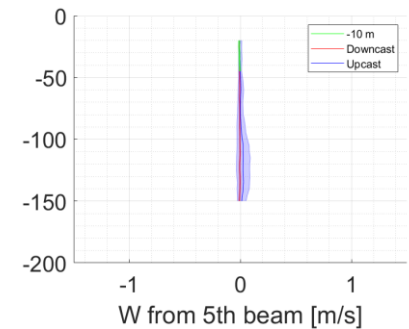
Données brutes



Milieu de traitement



Profils finaux



**Upcasts : tension du câble + résonance → choix des profils downcasts**

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

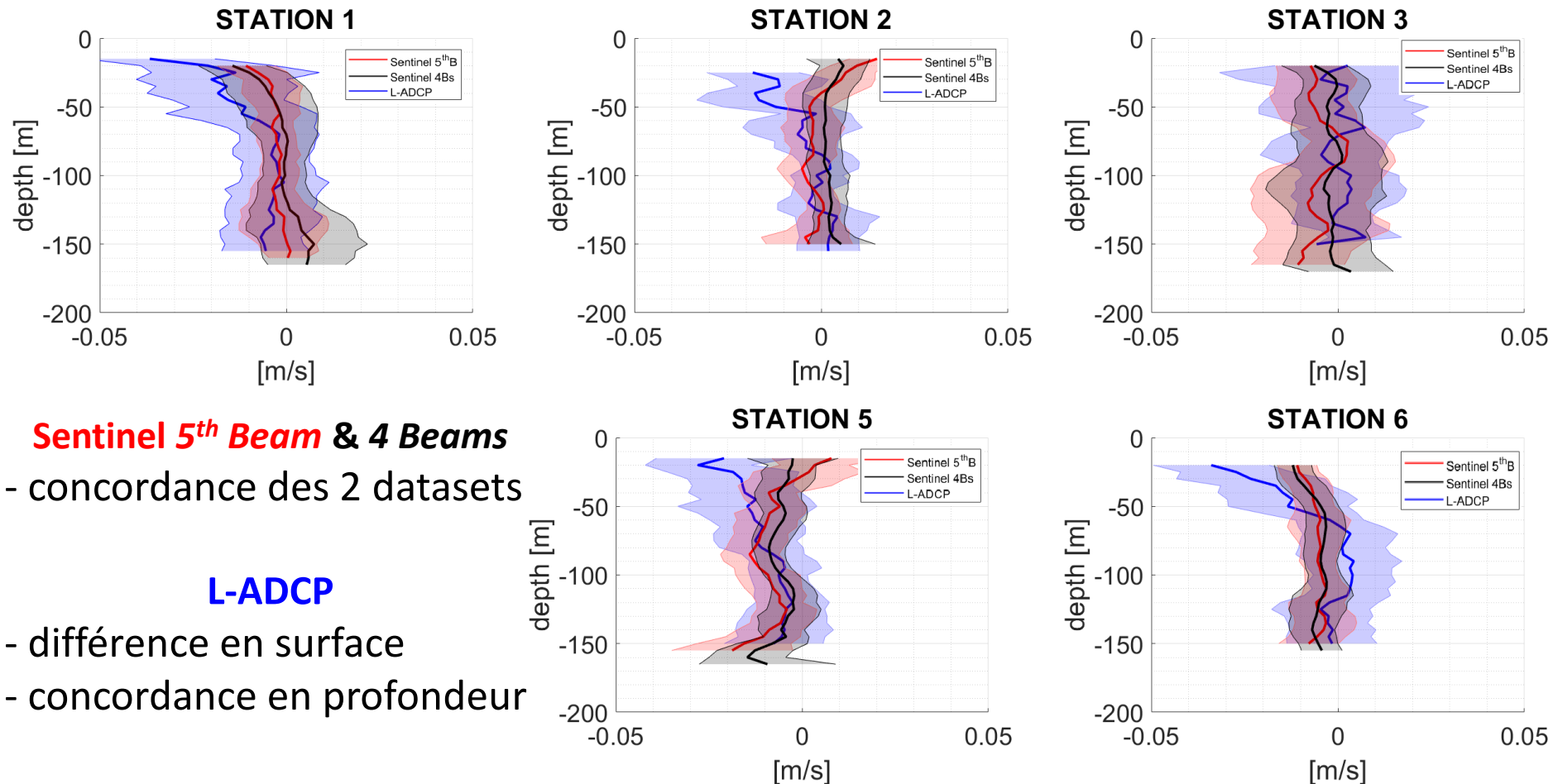
**Incertitude limite intrinsèque ~ 3mm/s**

**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

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

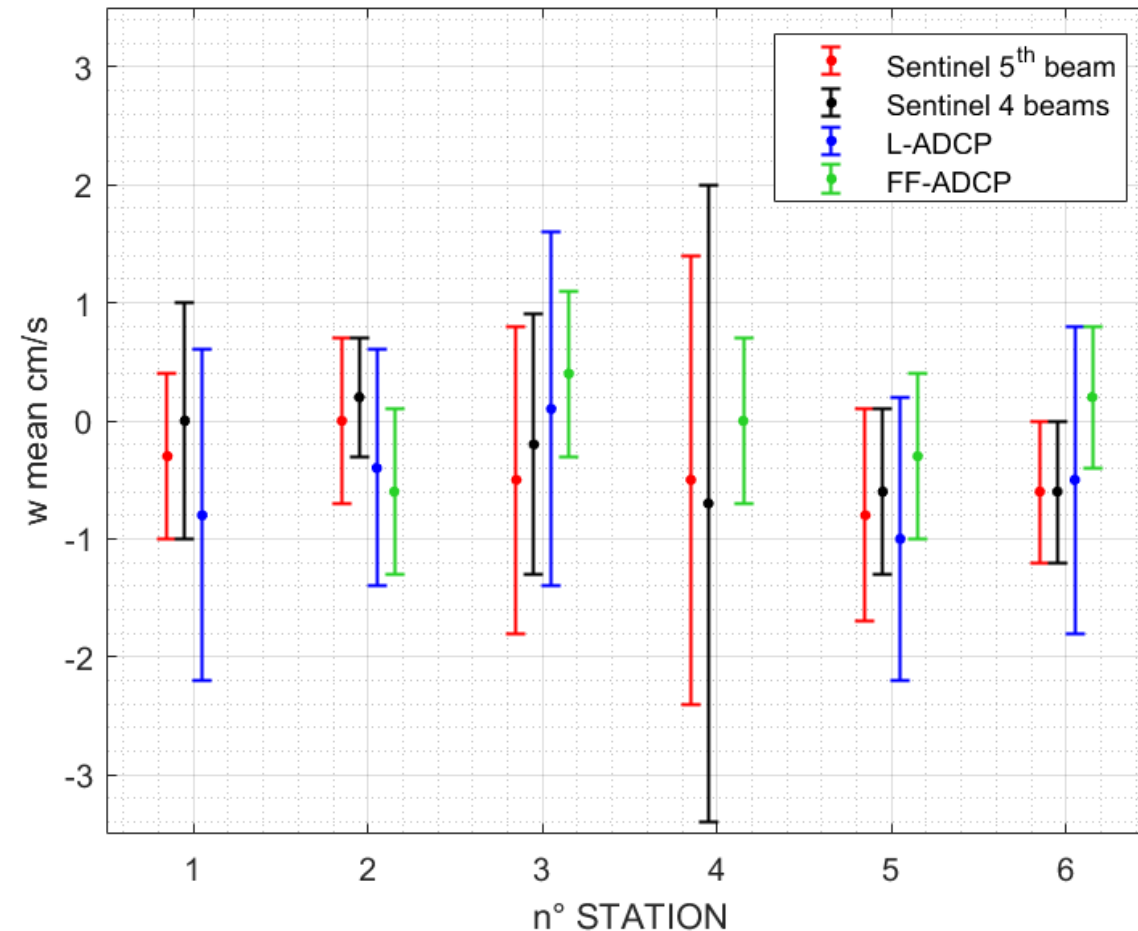


→ Généralisation de la méthode de traitement au L-ADCP  
→  $\sigma$  meilleurs pour les données issues du Sentinel

## 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**



Données downcasts 0 – 150 m

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

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

Meilleures précisions avec

**Sentinel 5<sup>th</sup> beam** & **FF-ADCP**

ST n°4 : forte agitation du milieu

→ Technique *free-fall* très peu sensible aux conditions d'agitation

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

### 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

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

→ Moyenne temporelle : 20 min avant arrivée sur station

profondeurs

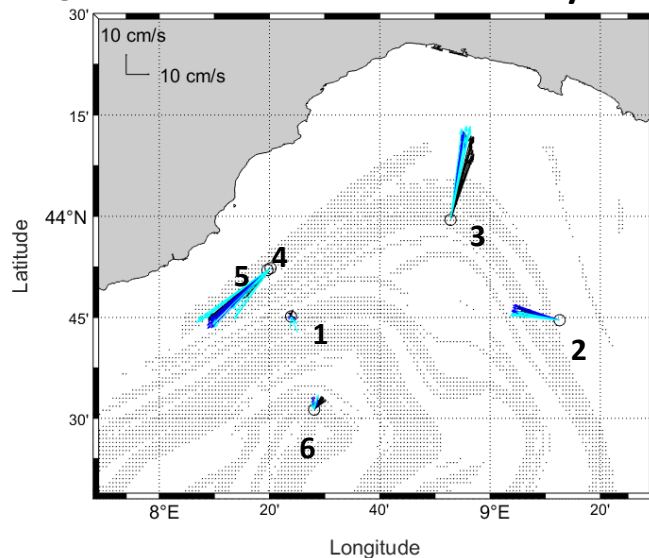
0 – 50 m

50 – 100 m

100 – 150 m

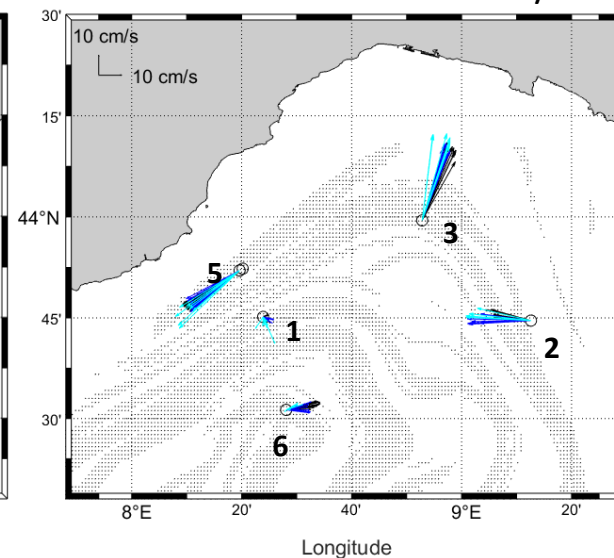
**Sentinel**

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



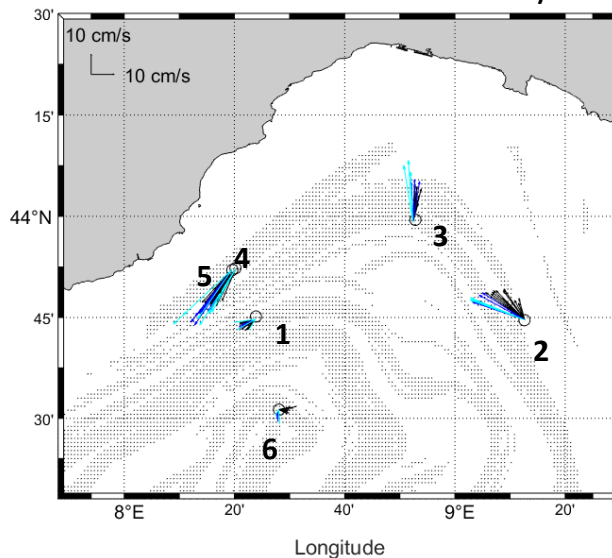
**L-ADCP**

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



**ADCP de coque**

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



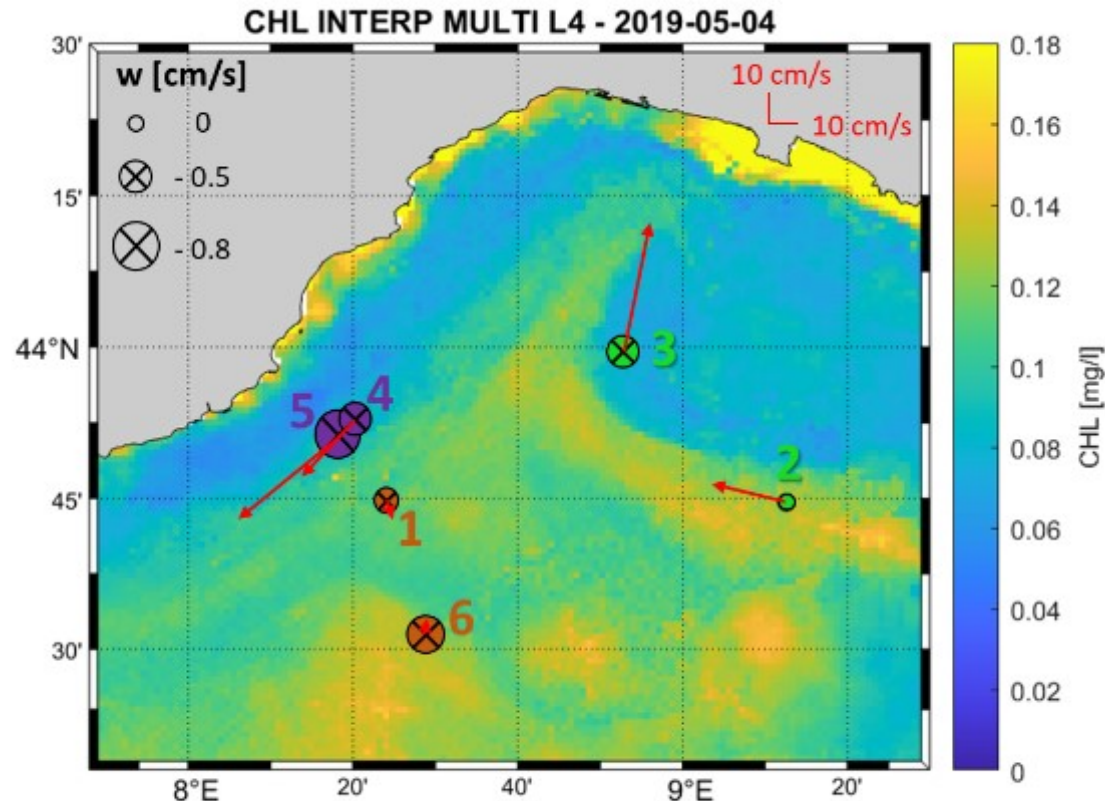
- Concordance  $u$  et  $v$  entre chaque instrument & dynamique attendue dans la zone
- Confiance dans l'acquisition de  $w$  par le **Sentinel 5<sup>th</sup> beam**

## 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





## 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

- Distinction de plusieurs zones :

**Courant Nord (liguro-provençal)**

**Recirculation cyclonique**

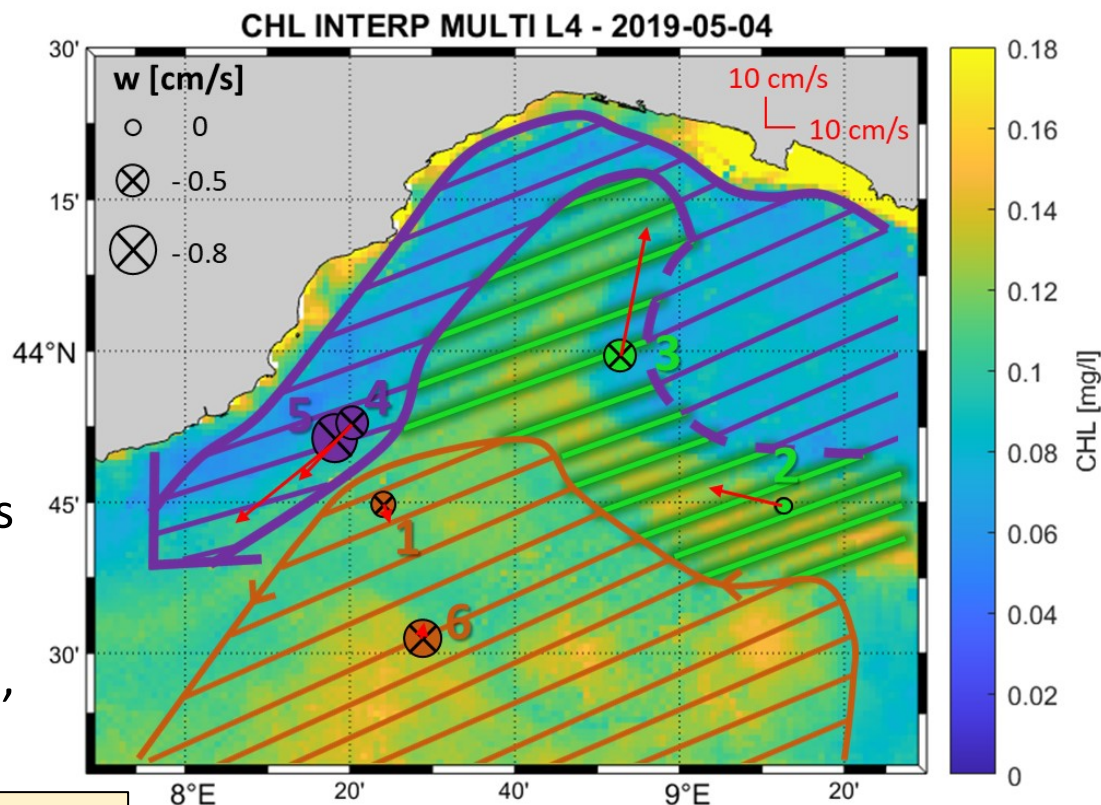
**Zone intermédiaire**

→ Différences géographiques

- Impact sur les vitesses verticales (Sentinel – *downcasts*) :

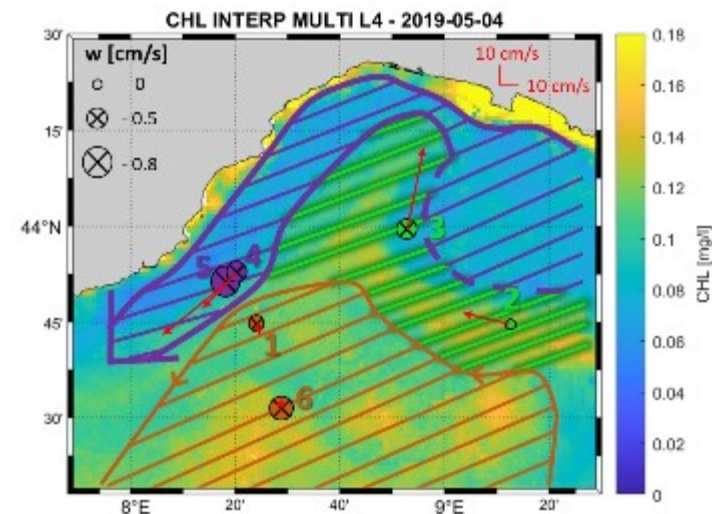
Faible contraste des  $w$  dans la zone,  $w$  faiblement  $< 0$

→ Différents processus de fine échelle



## Conclusions

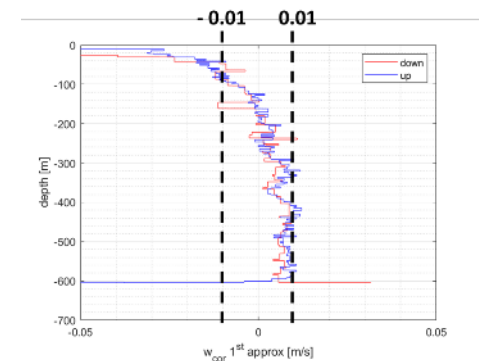
- **Méthode innovante** de traitement des vitesses verticales **généralisée** pour différents instruments  
→ ordres de grandeurs attendus : **quelques mm/s au cm/s**.
- 4 jeux de données à disposition → **bonne concordance** sur les moyennes, quelques variations dans les écarts-types selon les instruments.
- 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)
  - Étude de  $w_{\text{glider}}$  sur l'ensemble du transect
  
- Développement du système ***free-fall Sentinel V***
  - Futures campagnes du projet BIOSWOT  
VVPTTest, Gibraltar, etc.  
pour tester la méthodologie



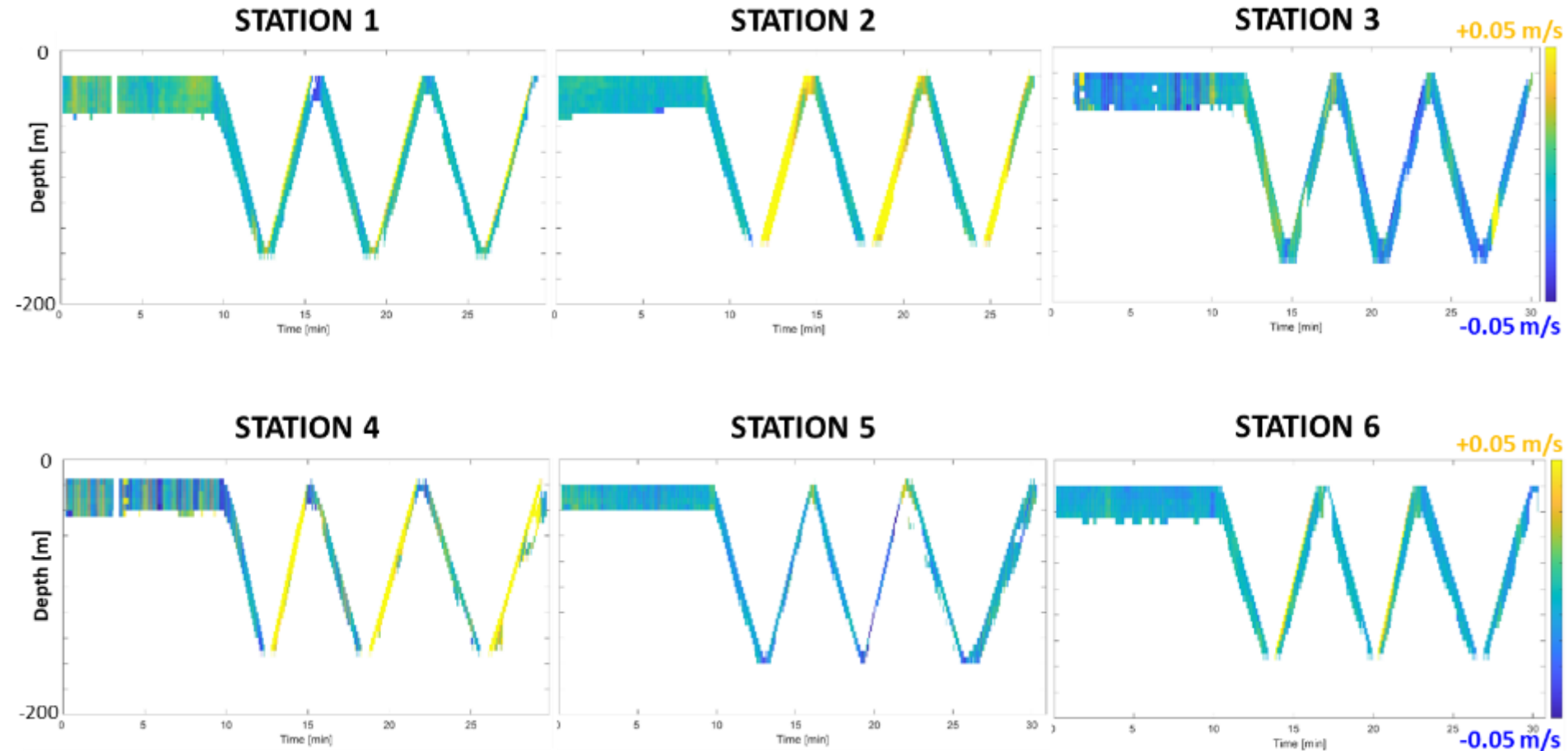


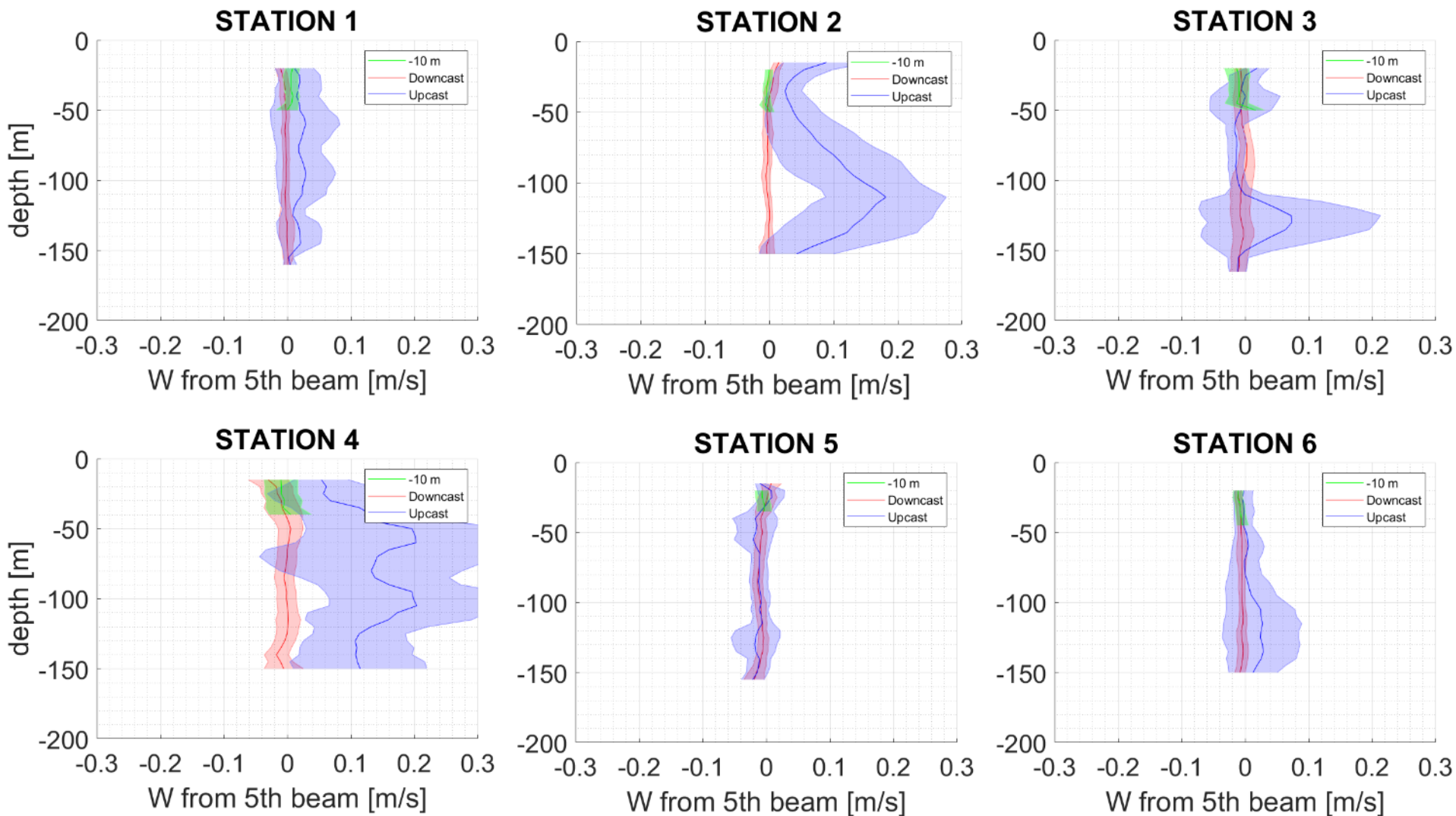
**Merci pour votre attention**



# **Annexes**

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

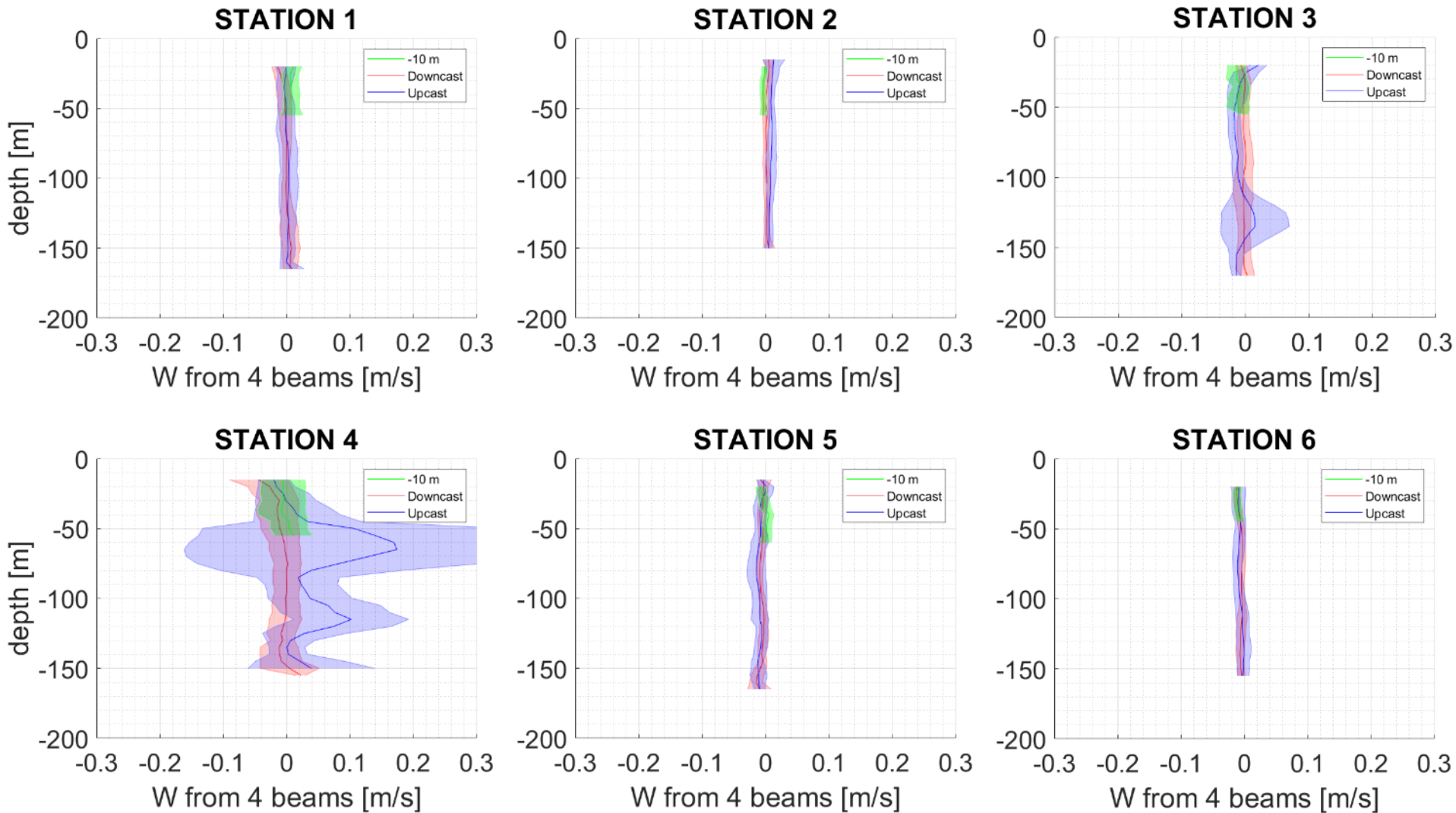




#### downcasts

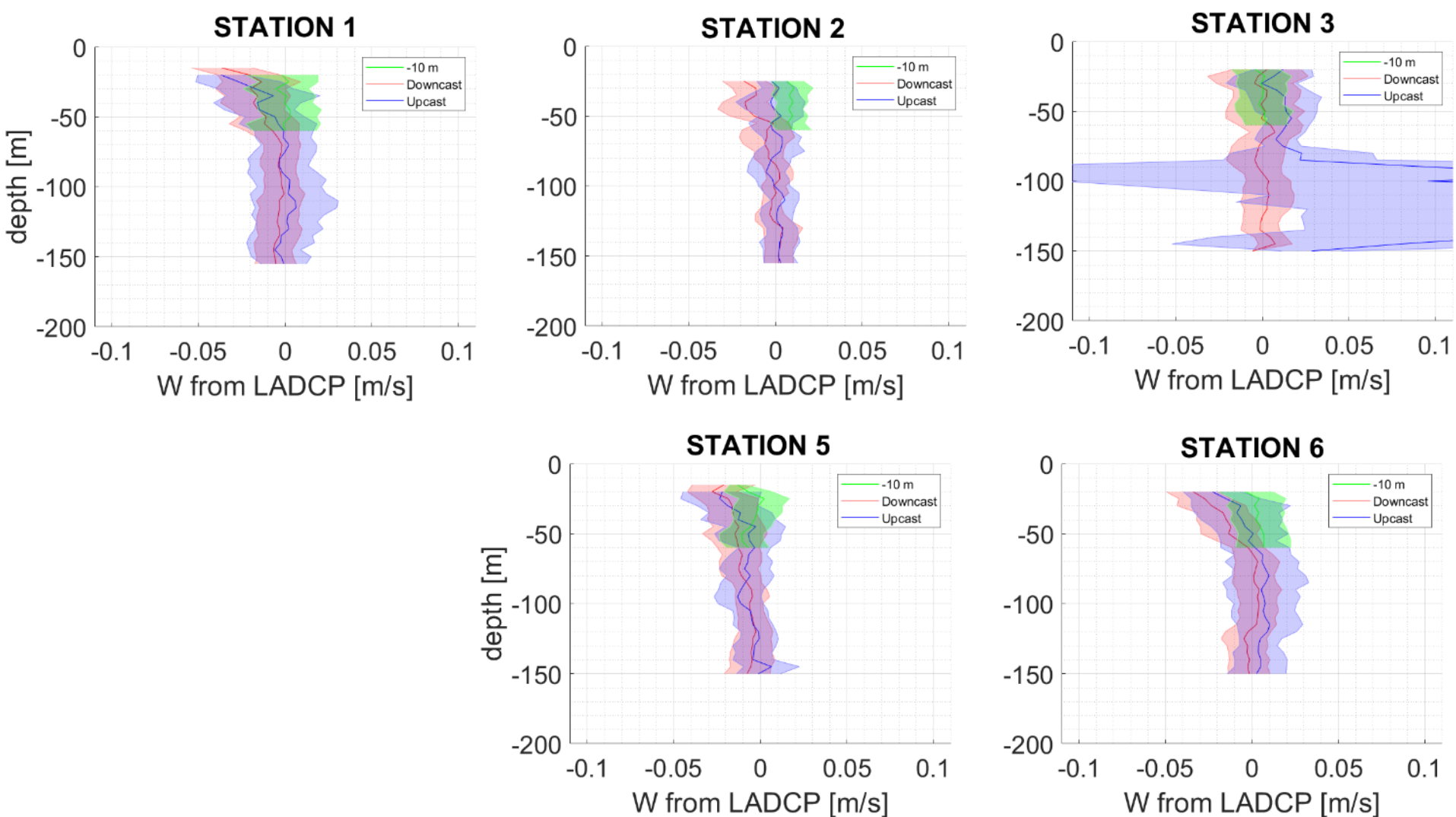
STATION	1	2	3	4	5	6
$\mu$ [ $10^{-2}$ m/s]	-0.3	-0.0	-0.5	-0.5	-0.8	-0.6
$\sigma$ [ $10^{-2}$ m/s]	0.7	0.7	1.3	1.9	0.9	0.6





#### downcasts

STATION	1	2	3	4	5	6
$\mu$ [ $10^{-2}$ m/s]	-0.0	0.2	-0.2	-0.7	-0.6	-0.6
$\sigma$ [ $10^{-2}$ m/s]	1.0	0.5	1.1	2.7	0.7	0.6



### downcasts

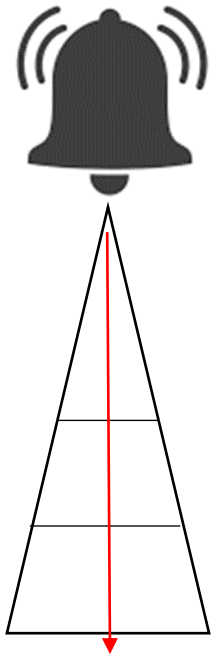
STATION	1	2	3	4	5	6
$\mu$ [ $10^{-2}$ m/s]	-0.8	-0.4	0.1	N. A.	-1.0	-0.5
$\sigma$ [ $10^{-2}$ m/s]	1.4	1.0	1.5	N. A.	1.2	1.3



# Phénomène de résonance – ou *ringing*

## 1. Pulse acoustique :

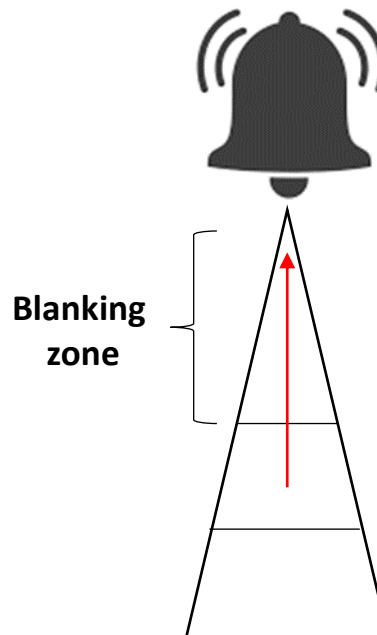
- envoi du **signal**
- vibration de la dalle



## 2. Écoute écho cellules proches :

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

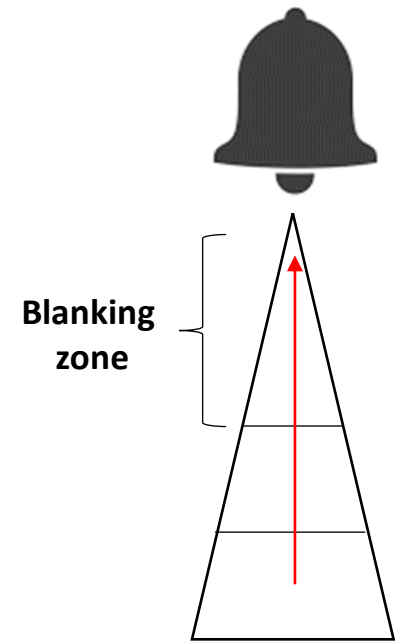
Effet Doppler  $\rightarrow 0$



## 3. Écoute écho cellules éloignées :

- aucune vibration
- **écho du signal** non perturbé

Effet Doppler

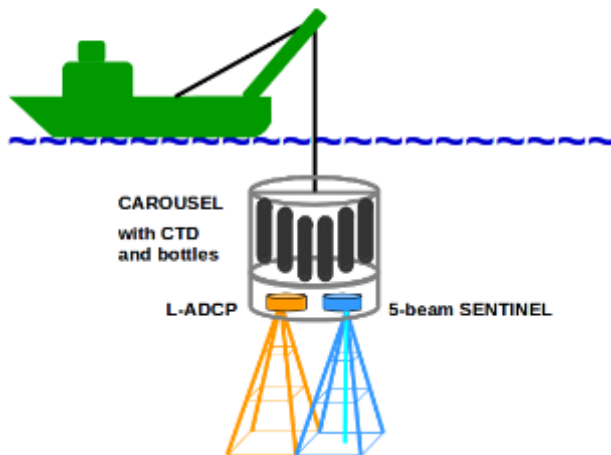


# Sentinel V : 5-beam ADCP

## Déploiement

### The Five Beam ADCP

Five Beam Acoustic Doppler Current Profiler



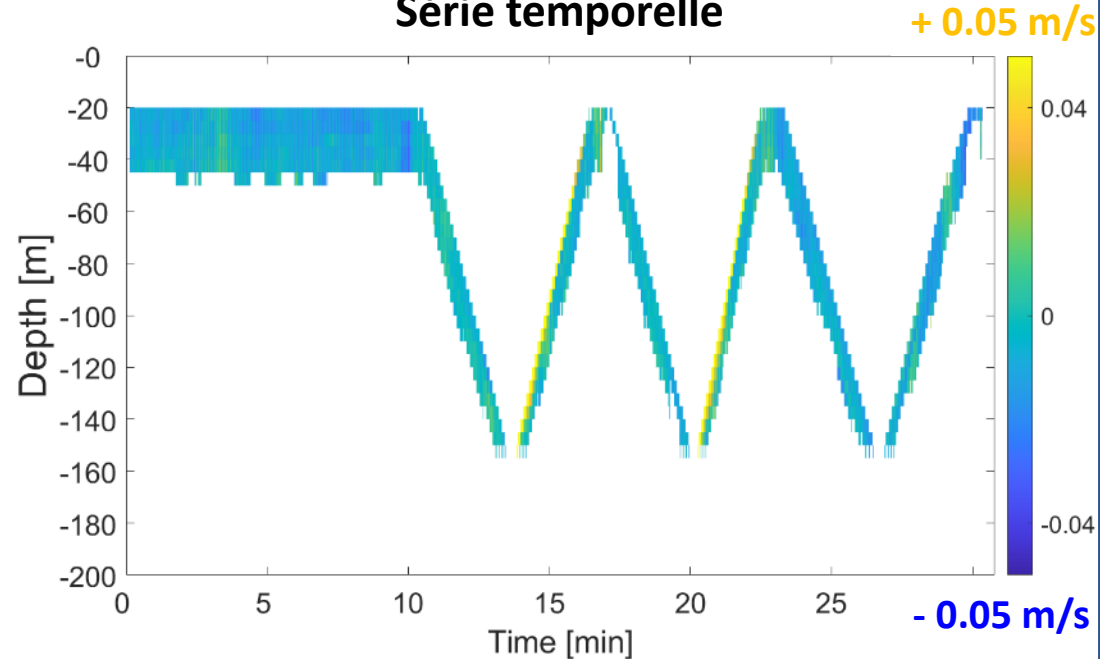
[andrea.doglioli@univ-amu.fr](mailto:andrea.doglioli@univ-amu.fr)



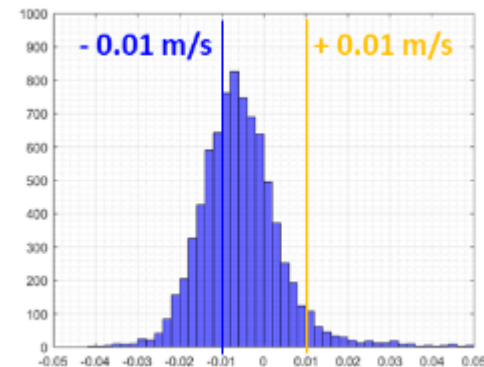
<https://people.mio.osupytheas.fr/~doglioli>

## Résultats – STATION 6

### Série temporelle



### Histogramme



downcasts

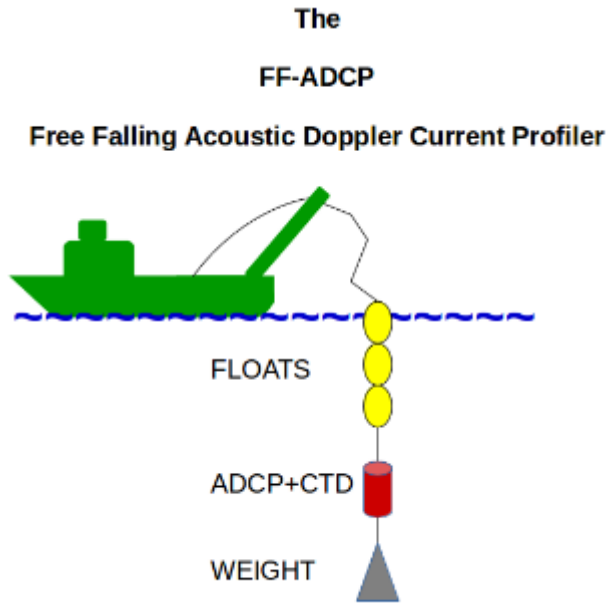
## Traitement des données

Chaine d'analyse des  
vitesses verticales

*C. Comby, 2020*

# FF-ADCP

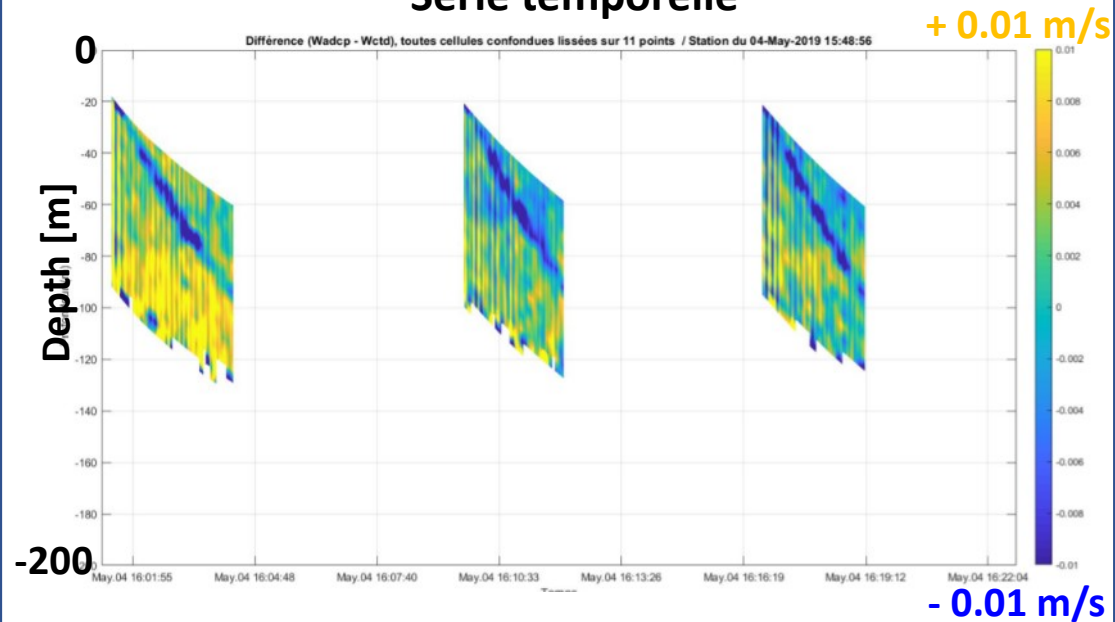
## Déploiement



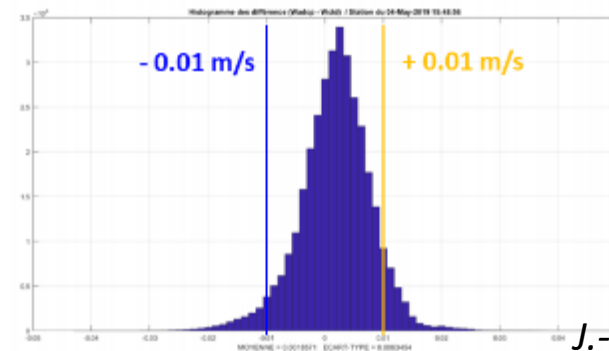
andrea.doglioli@univ-amu.fr  <https://people.mio.osupytheas.fr/~doglioli>

## Résultats – STATION 6

### Série temporelle



### Histogramme



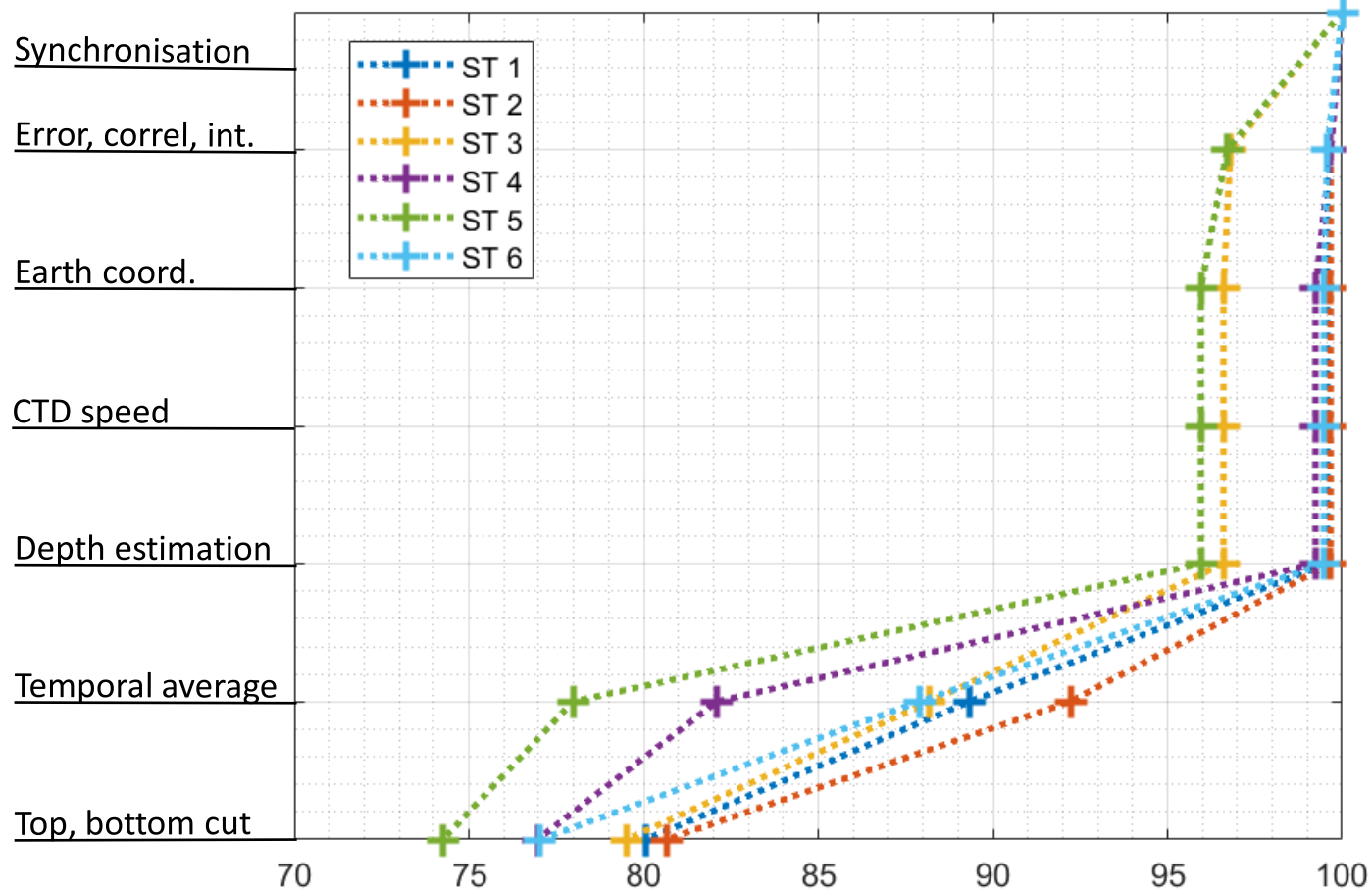
## Traitement des données

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

J.-L. Fuda, 2019

J.-L. Fuda, 2019

## % données conservées SENTINEL 5th beam

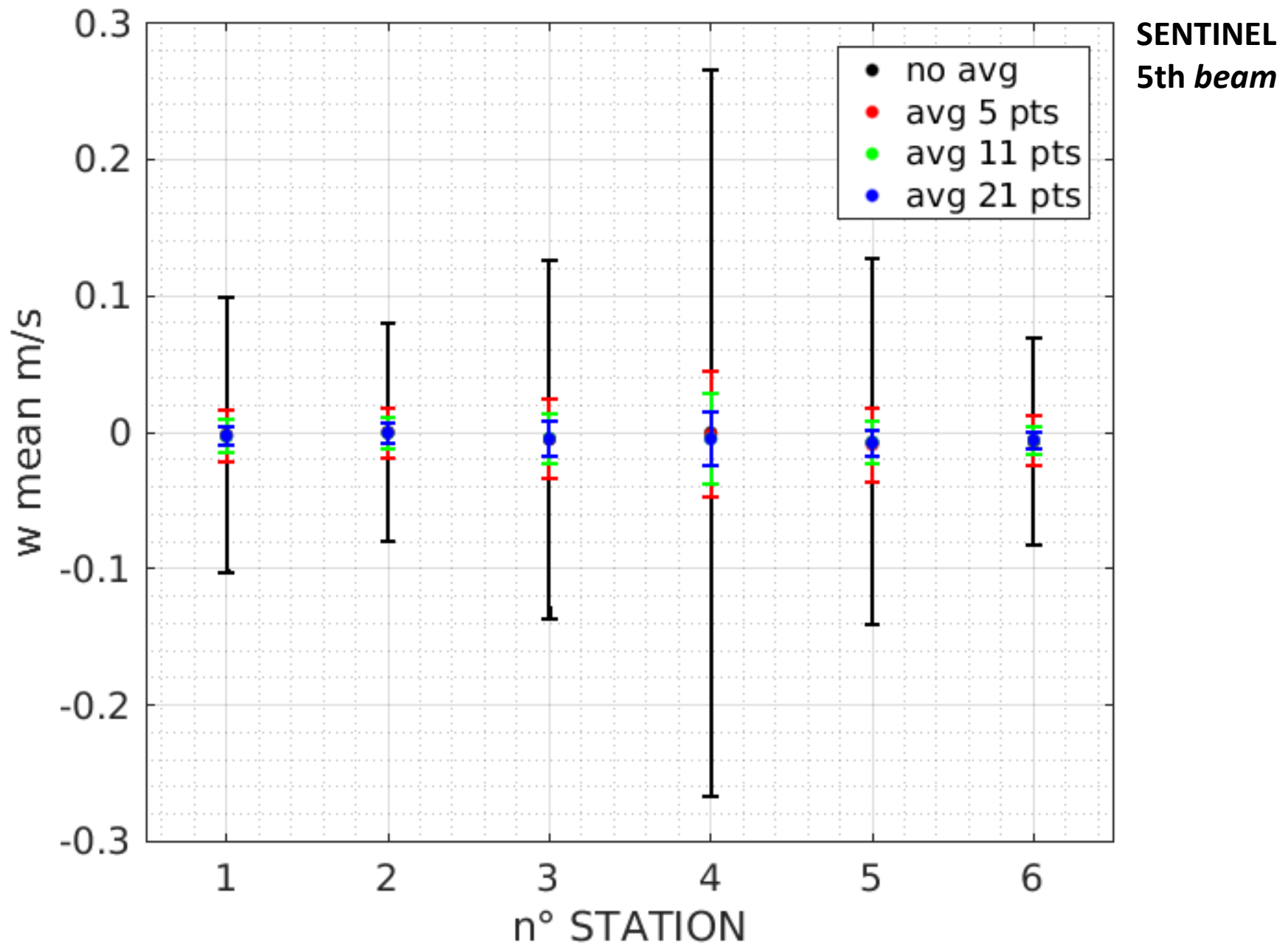


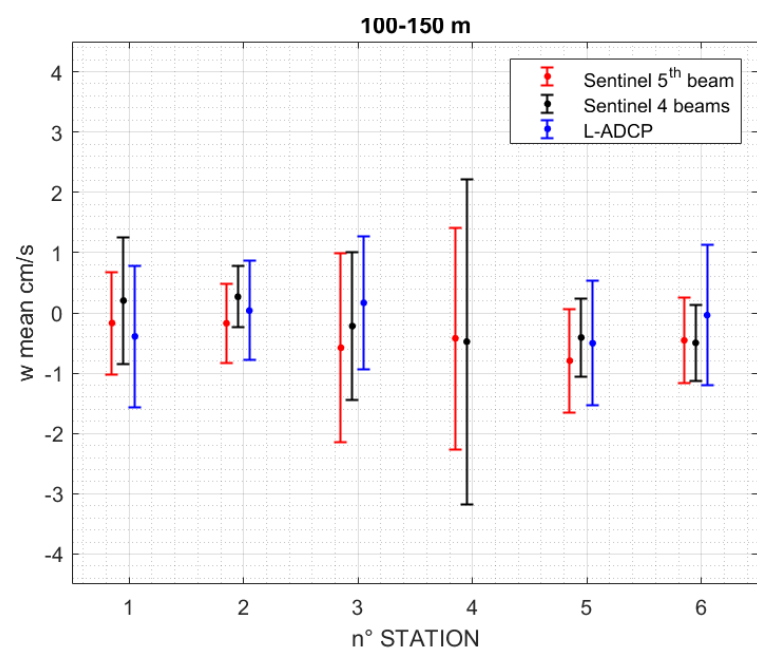
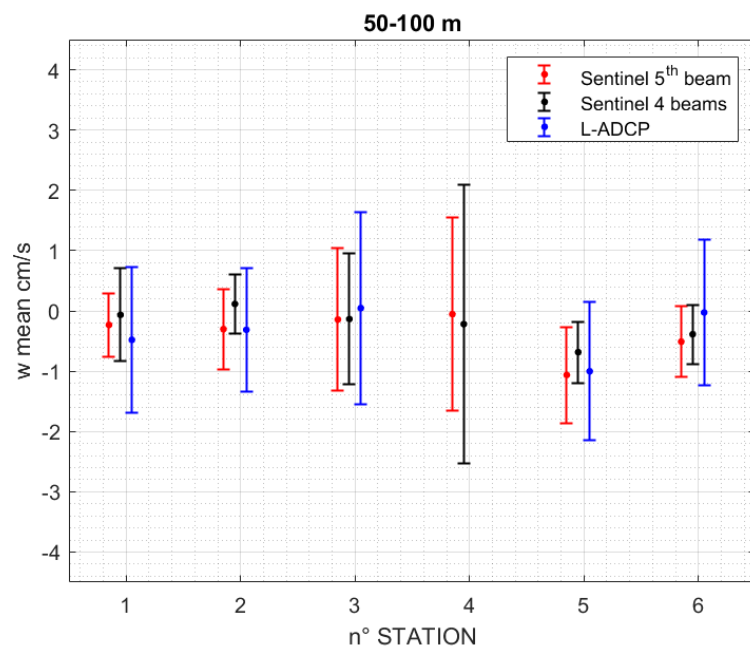
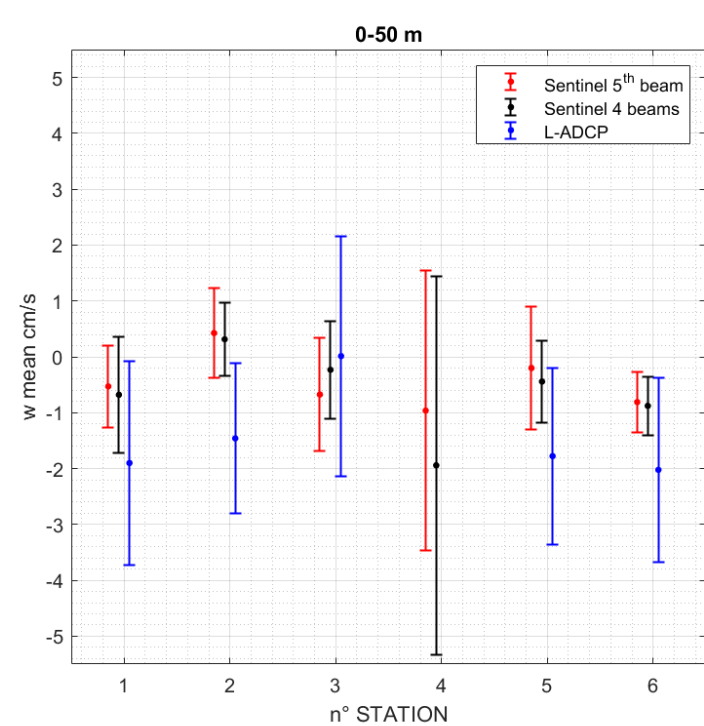
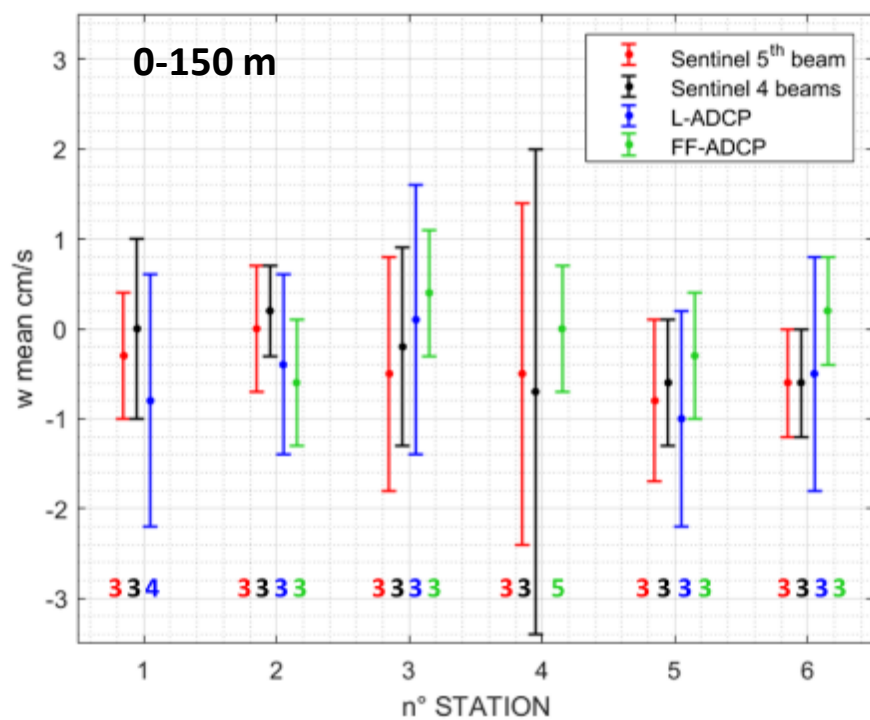
**Diminution progressive** du nombre de valeur numérique de  $w$  (i.e. NaN augmente)

Réduction principale : ***temporal average***

**$\geq 70\%$**  pour l'ensemble des stations

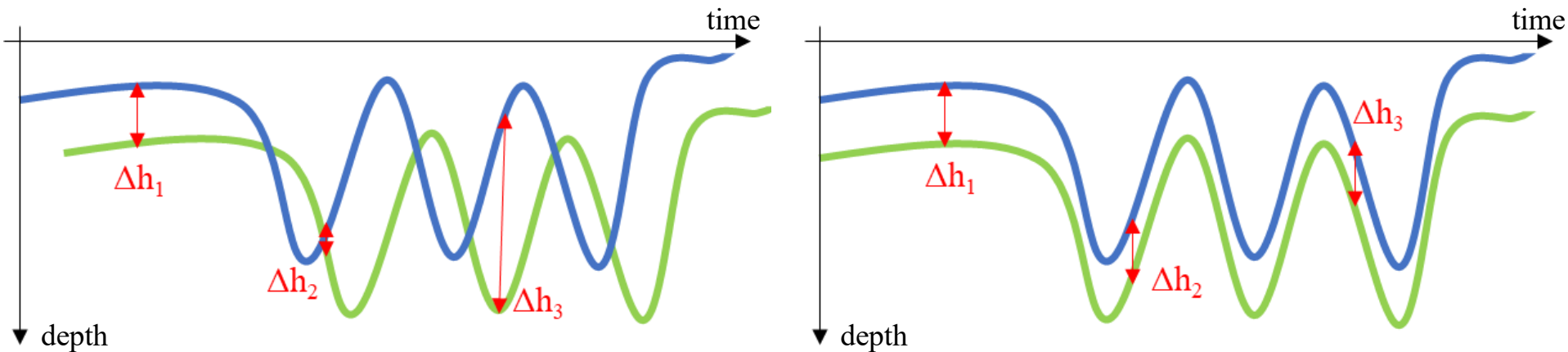
# Comparaison des fenêtres de lissage pour $\mu$ & $\sigma$ *downcasts*



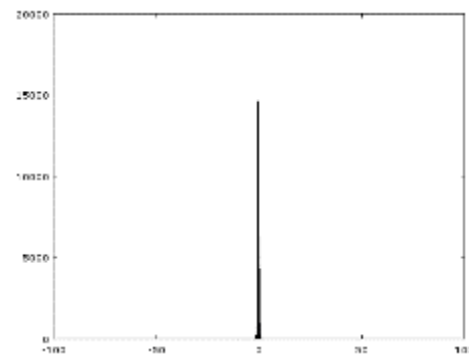
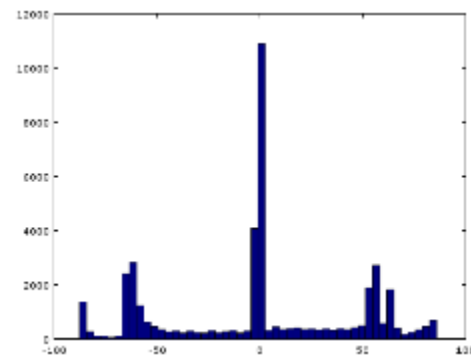




# Ajustement automatique des datasets

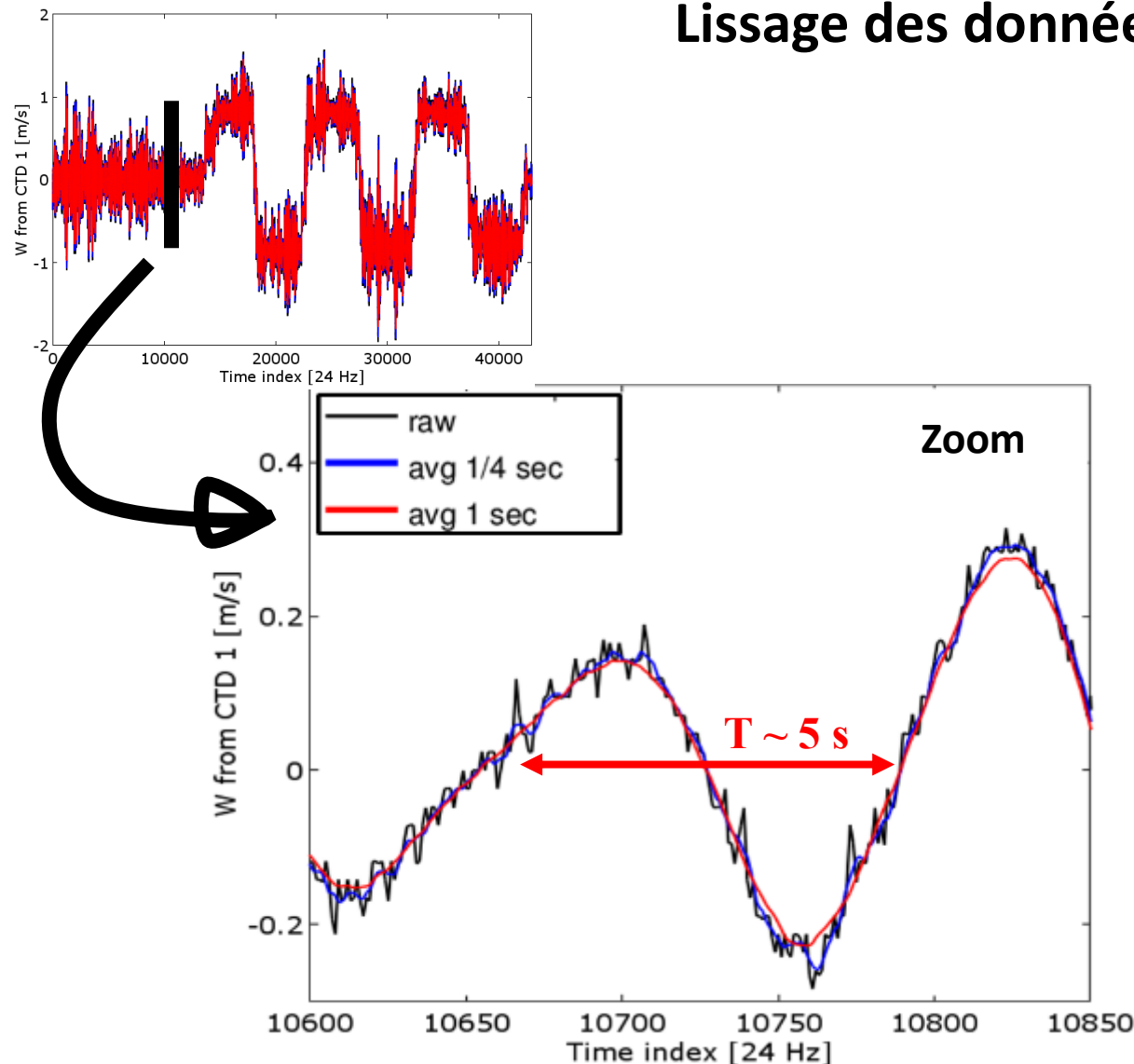


- Séquence **CTD** balayée par la séquence **SENTINEL**
- Différence de hauteur ( $\Delta h$ ) pour chaque indice de temps
- Calcul : moyenne ( $\mu$ ) et écart-type ( $\sigma$ ) de l'échantillon



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

# Lissage des données haute fréquence



**Raw data** : échantillonnage 24 Hz  
+ oscillation périodique + bruit

Principe du lissage appliqué :  
moyenne mobile sur une fenêtre  
de durée

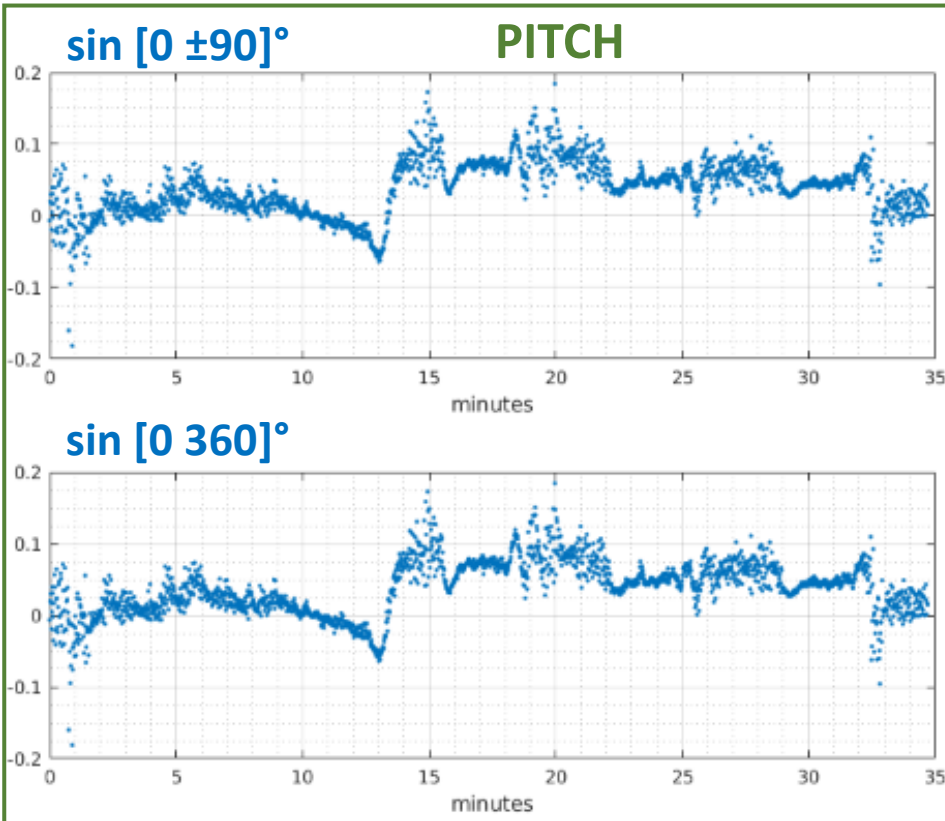
→ **¼ sec** : amplitude & bruit  
conservés

→ **1 sec** : amplitude & bruit  
réduits

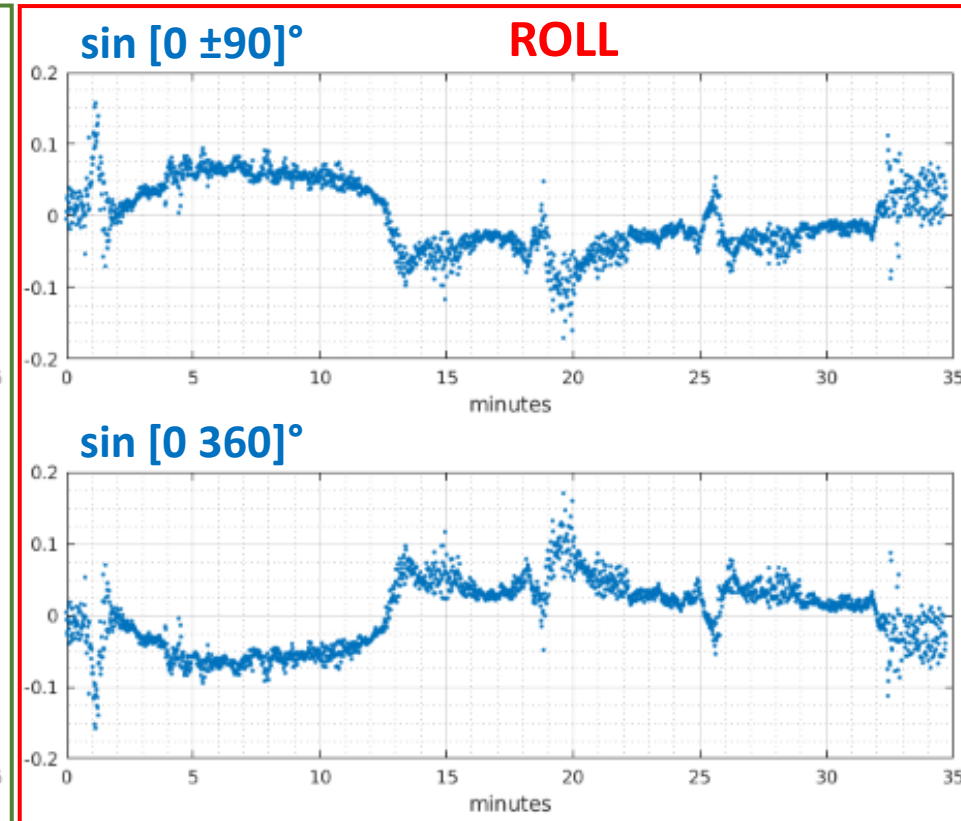
**Choix de la fenêtre sur 1 seconde :**  
Échantillonnage 24 Hz **conservé** + Bruit en grande partie **éliminé**

# Impact du changement de convention

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



→ Résultats identiques



→ Inversion du signe

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

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

## Utilisation des datasets Sentinel & CTD

Principe de base :  $w_{\text{ocean}} = w_{\text{mesurée}} - w_{\text{CTD}}$

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

Les **vitesse 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) :

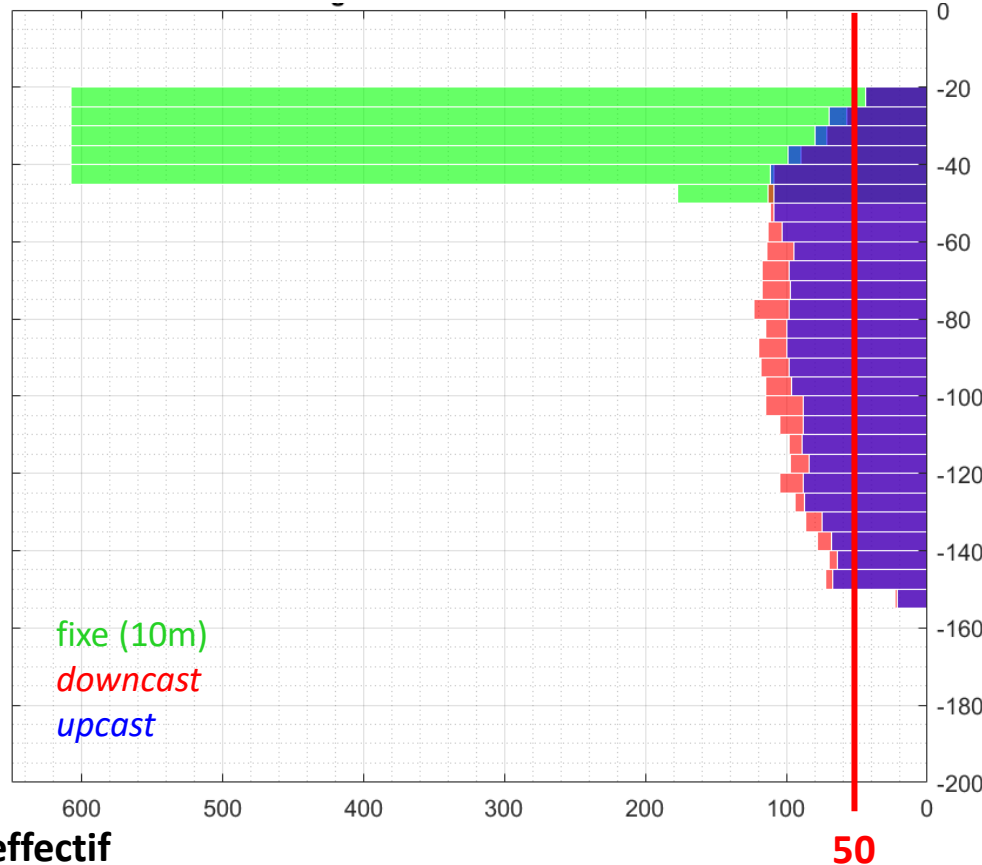
$$w_{\text{CTD}} = \frac{1}{\rho g} \frac{\partial p}{\partial t}$$

# Étape de coupure des extrémités sup./inf.

Approche statistique de la mesure  
→ nécessité d'analyser des données avec des effectifs élevés

STATION 6

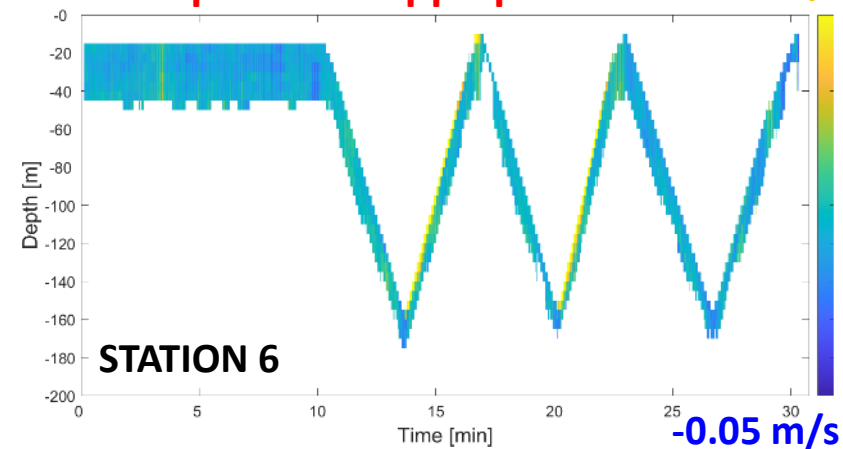
profondeur



50

Coupure non appliquée

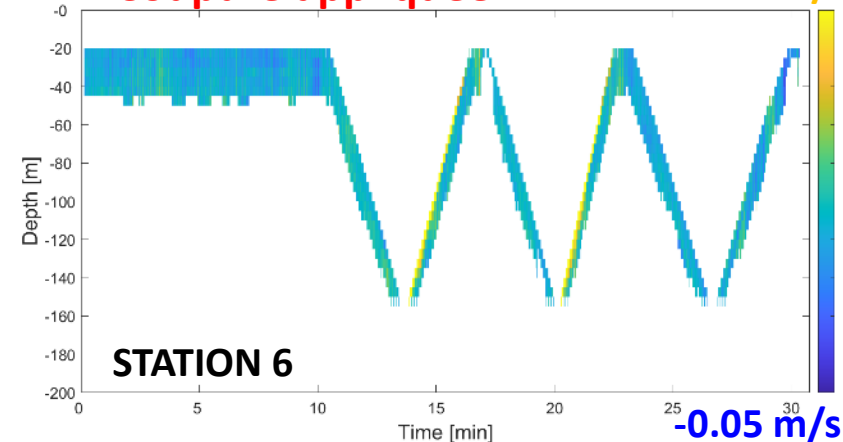
+0.05 m/s



STATION 6

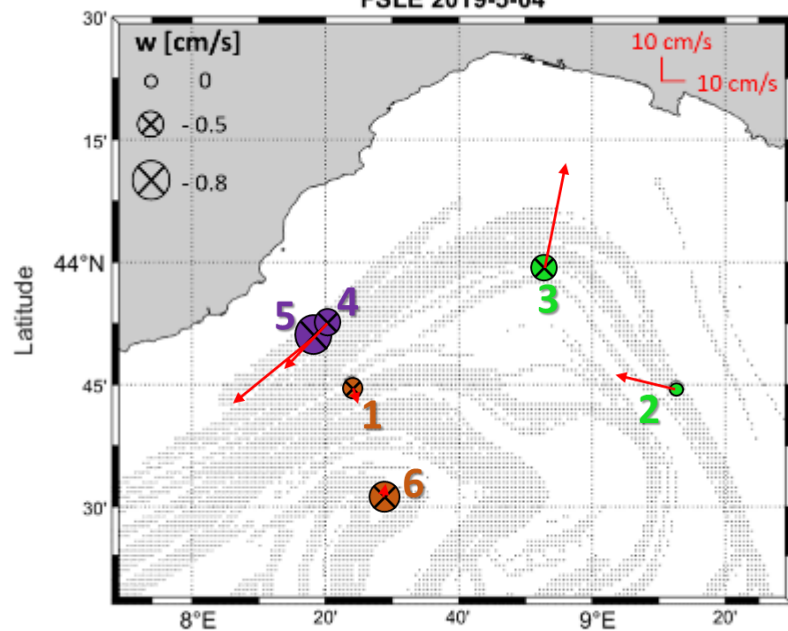
Coupure appliquée

+0.05 m/s

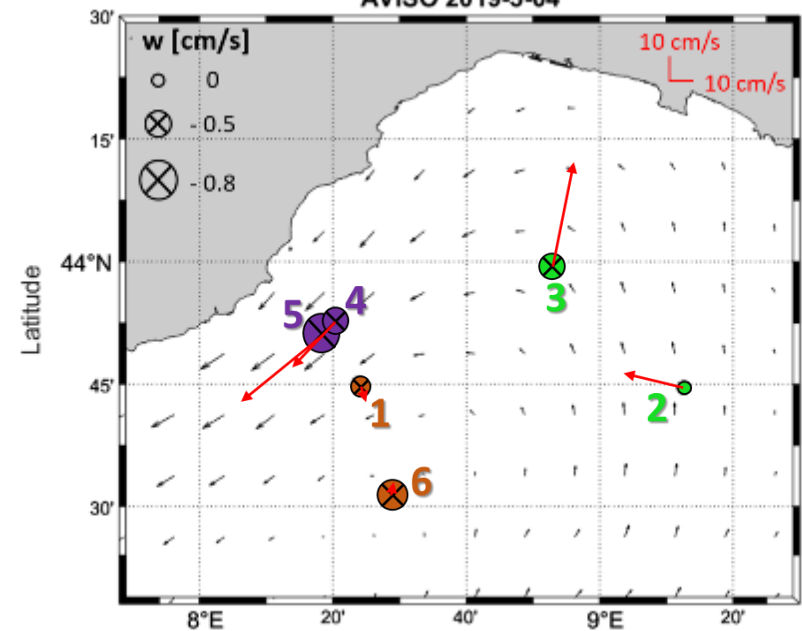


STATION 6

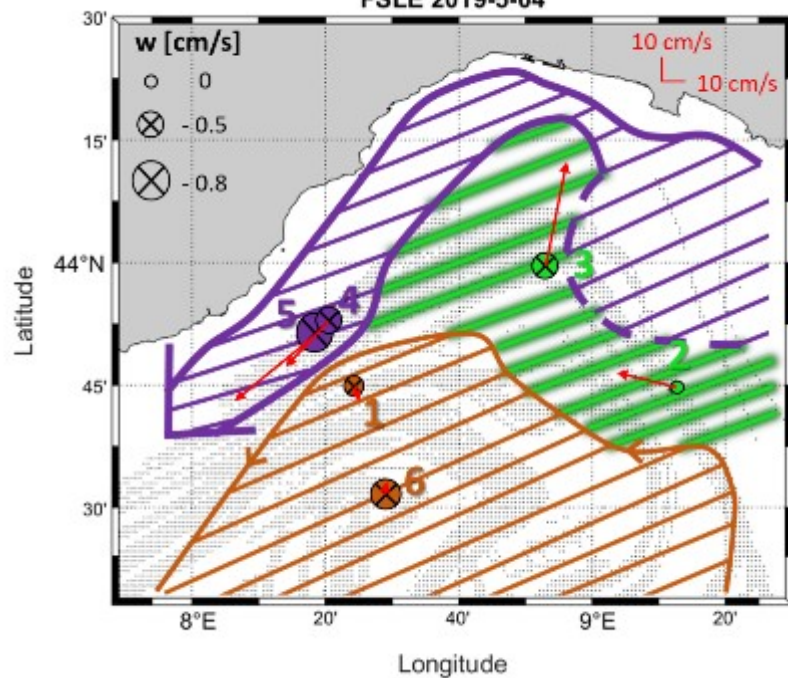
FSLE 2019-5-04



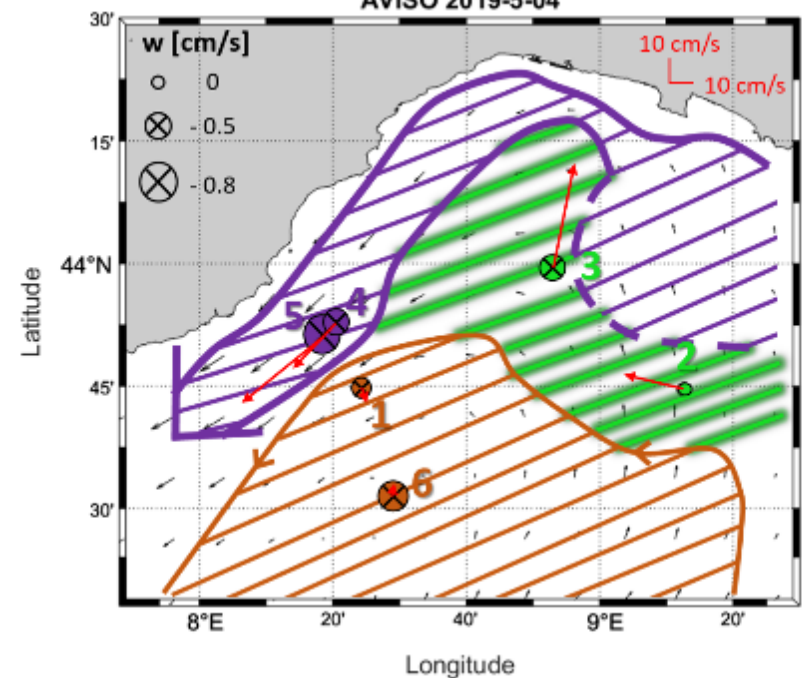
AVISO 2019-5-04



FSLE 2019-5-04



AVISO 2019-5-04





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

#### Données à disposition

#### Précision

- |  |         |                                  |
|--|---------|----------------------------------|
| ▪ <b>Sentinel</b> : <i>Sentinel V50</i>        | 500 kHz | <b>mesure x 0.3 % ± 0.3 cm/s</b> |
| ▪ <b>L-ADCP</b> : <i>Workhorse</i>             | 300 kHz | mesure x 0.5 % ± 0.5 cm/s        |
| ▪ <b>ADCP de coque</b> : <i>Ocean Surveyor</i> | 75 kHz  | 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

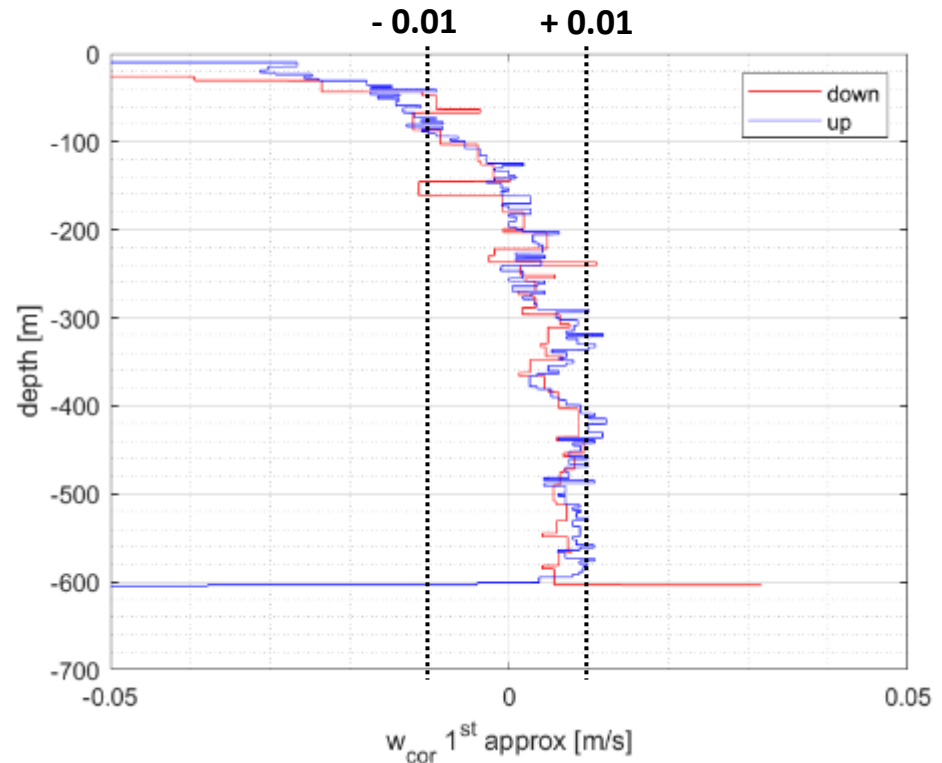
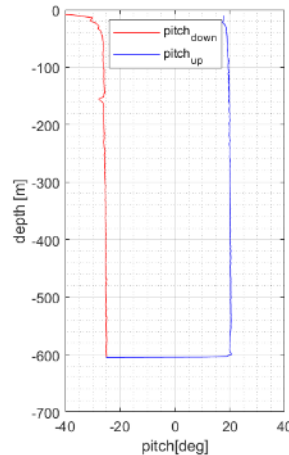
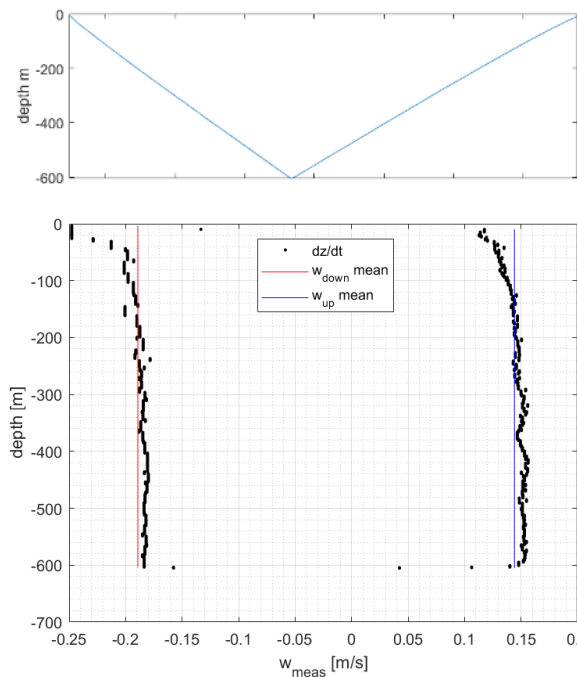
Confiance dans l'acquisition de  $w$  par le **Sentinel 5<sup>th</sup> beam**

# 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  $\sim cst$*



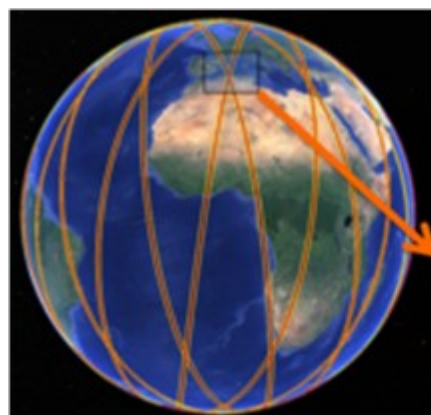
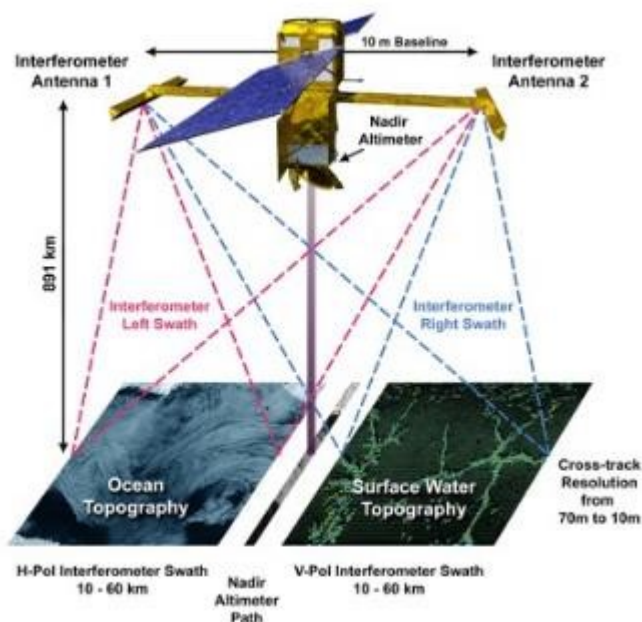
→ En première approximation on obtient des  $w$  de l'ordre de quelques mm/s

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

→ **Mesure à haute résolution spatiale**  
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**

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

- McGillicuddy, D.J.** 2016. Mechanisms of Physical-Biological-Biogeochemical Interaction at the Oceanic Mesoscale. *Annual Review of Marine Science*, **8**, 125–159.
- McWilliams, J.C.** 2016. Submesoscale currents in the ocean. *Proceedings of the Royal Society A*, **472**.
- 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 The Mediterranean Sea (Salot 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 three-dimensional 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.