

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

PLANÉTAIRE

MÉSO-

SOUSMÉSO-

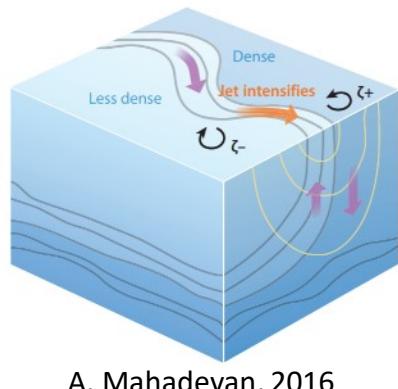
MICRO-

Circulation générale

dynamique de fine échelle
(tourbillons, filaments)

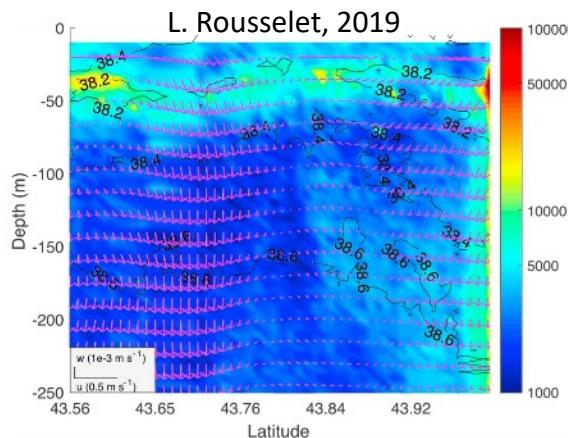
Turbulence

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



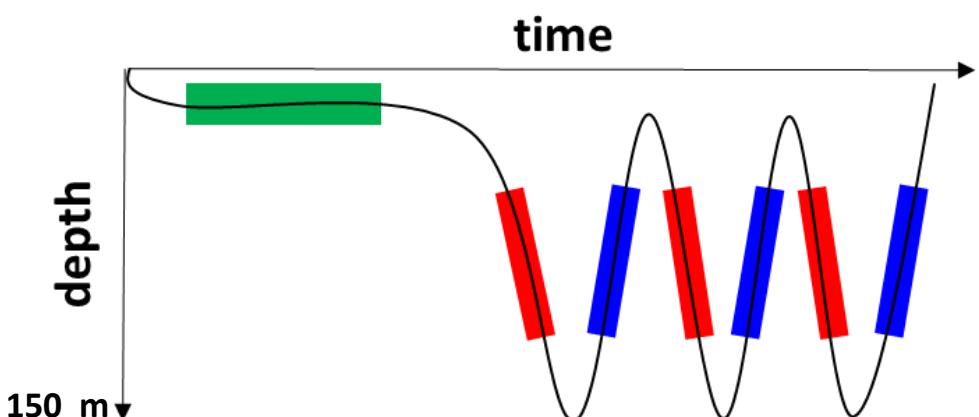
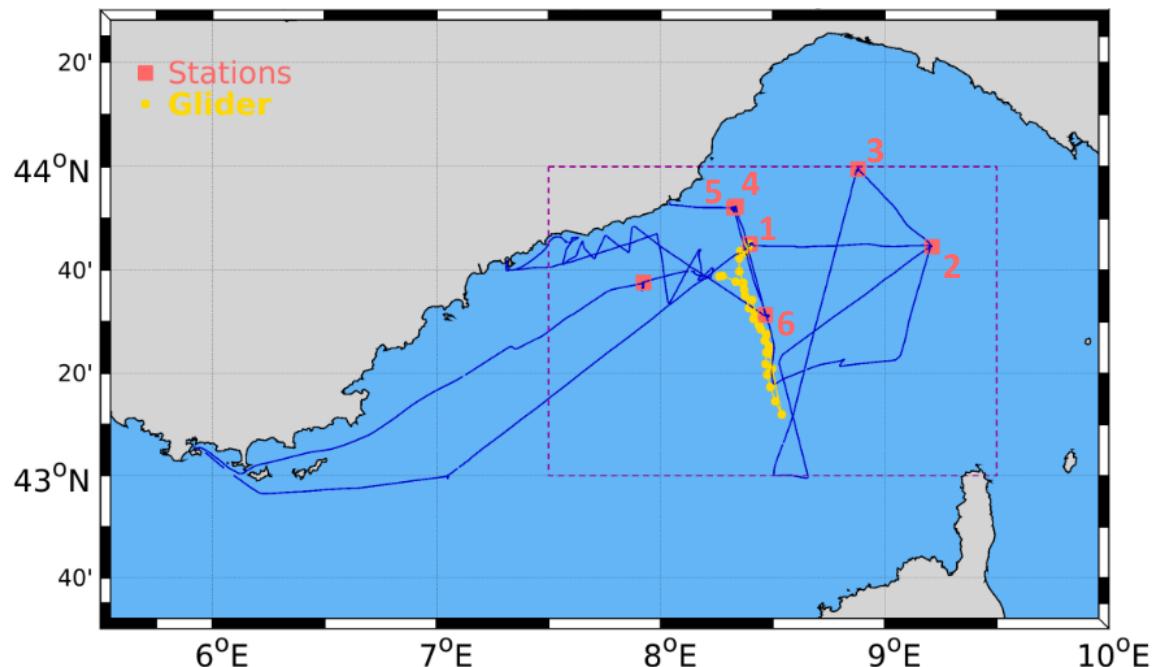
Étude des vitesses verticales :

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



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

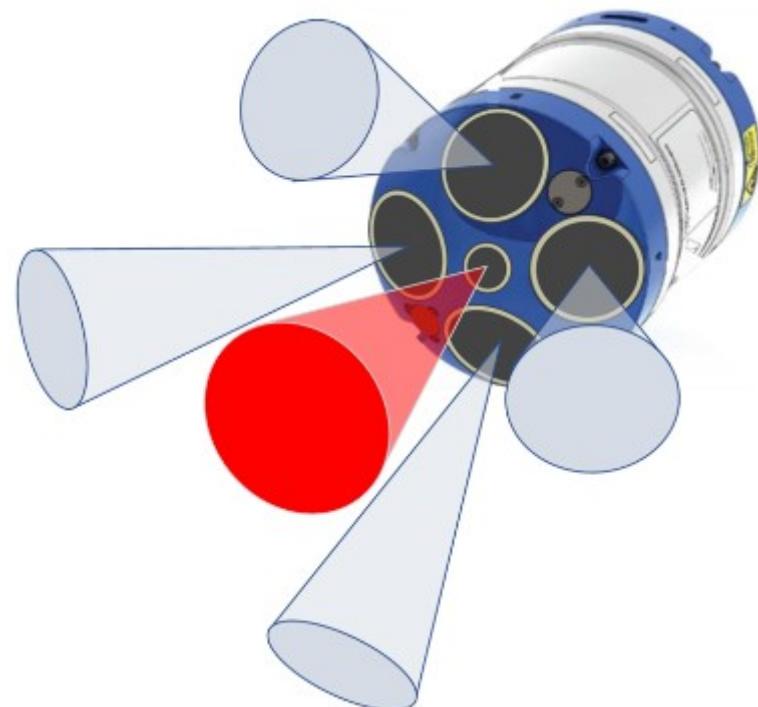
Acquisition basse fréquence [1 Hz]

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^{ème} faisceau
w from 5th beam

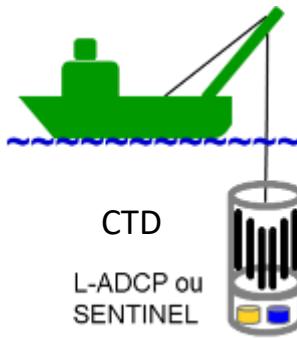


Mesure directe de w en milieu hauturier

* RDI : Research & Development Instruments

Objectifs

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



Mesures effectuées :

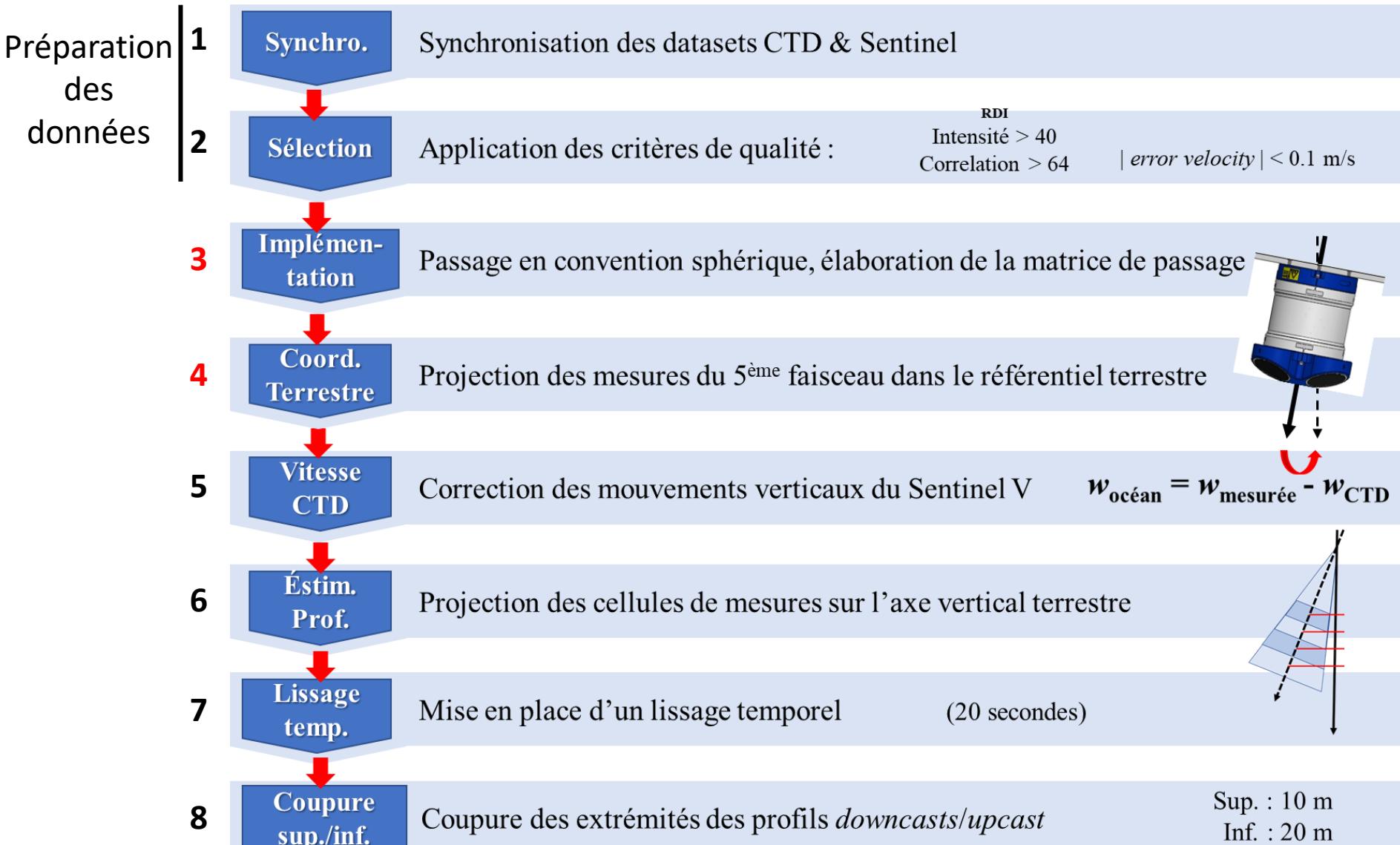
- ✓ Mesures du Sentinel : u , v , w_s , attitude, cap
- ✓ w_{CTD} dérivée de $\frac{1}{\rho g} \frac{\partial p}{\partial t}$ (approximation hydrostatique)

Défis :

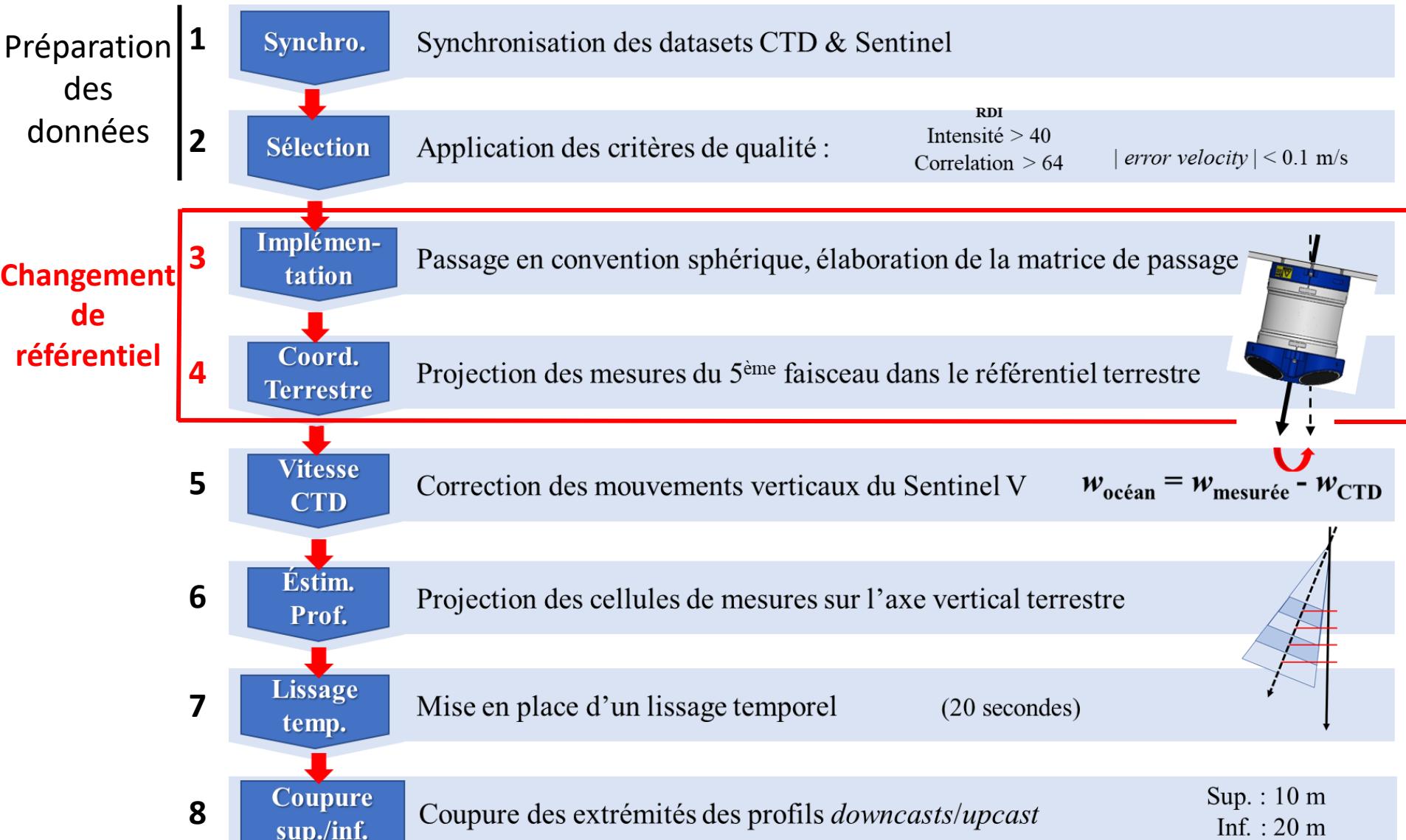
- Nouveauté de l'instrument, utilisation innovante
- Méthode de traitement développée *ex nihilo*
- Généralisation des conventions → extension à d'autres instruments



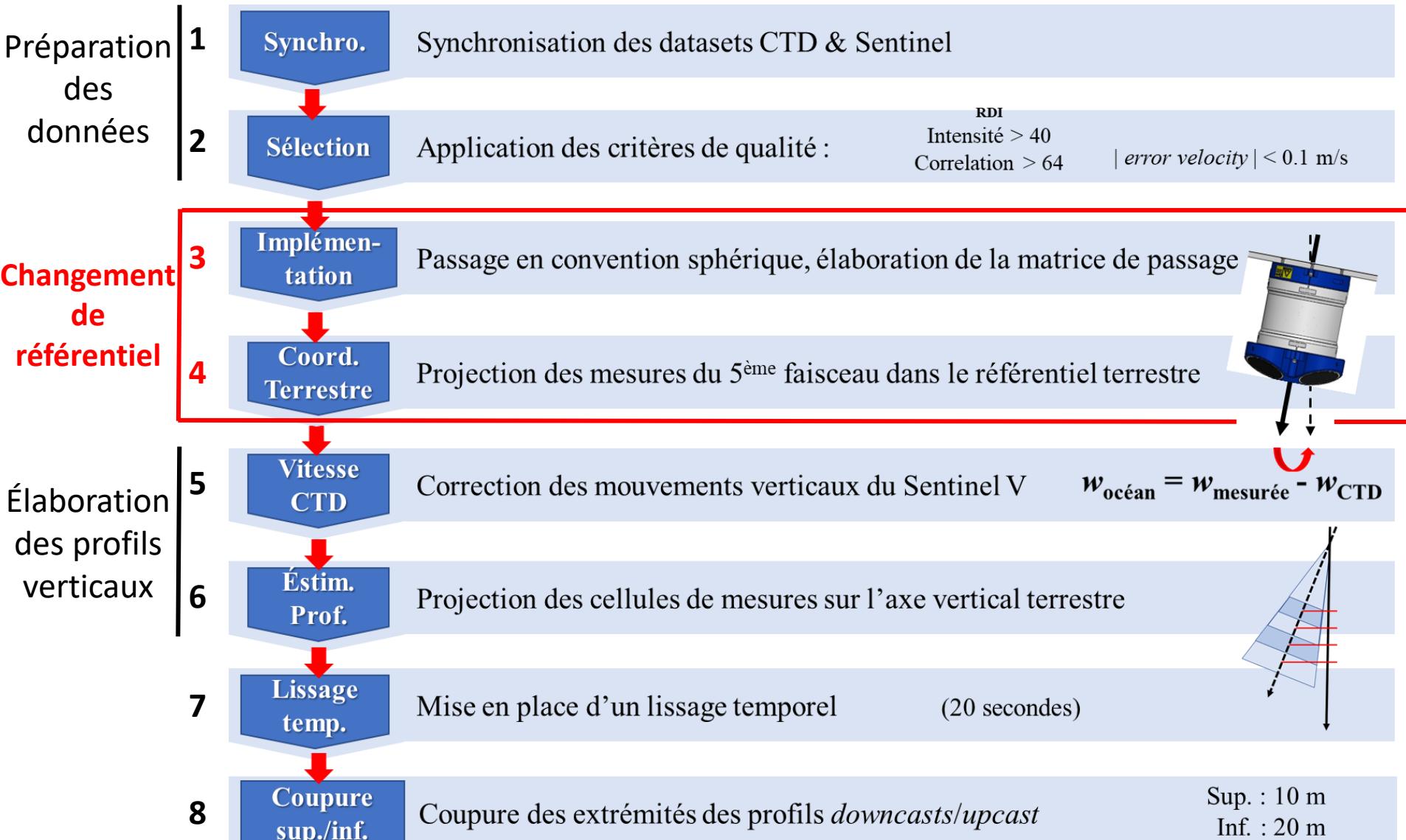
Méthode de traitement des mesures de w



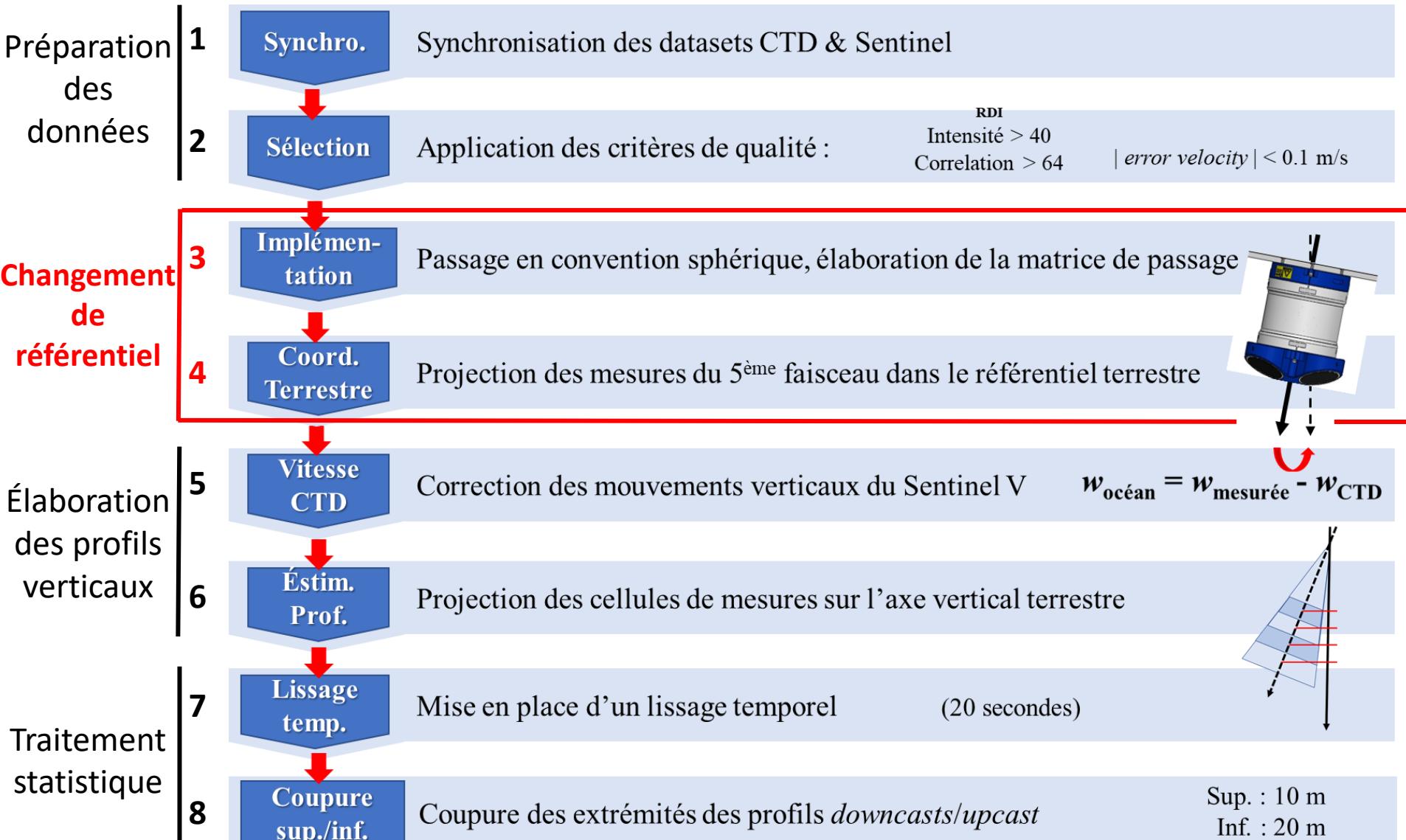
Méthode de traitement des mesures de w



Méthode de traitement des mesures de w

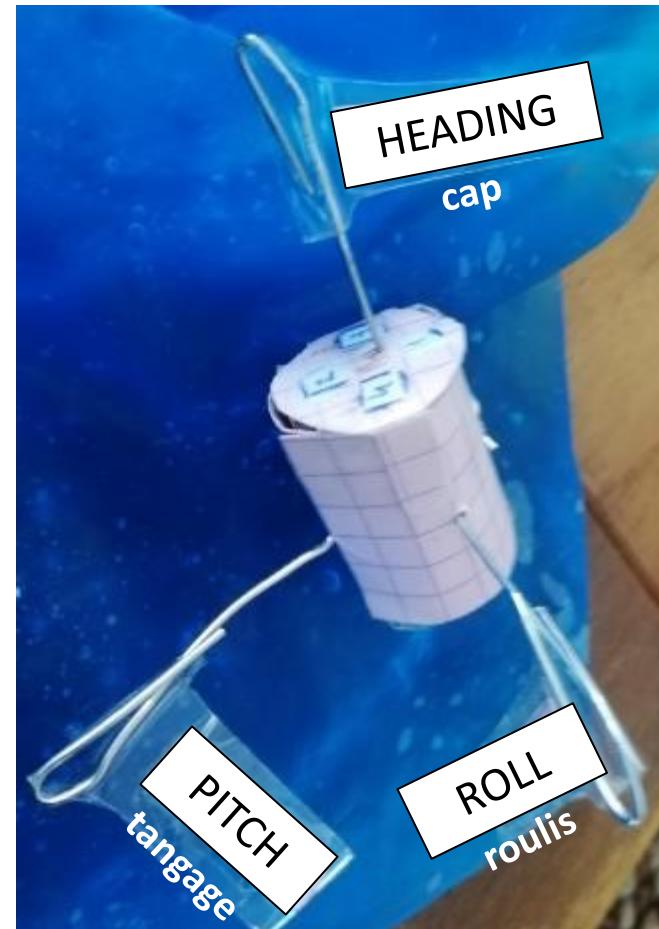
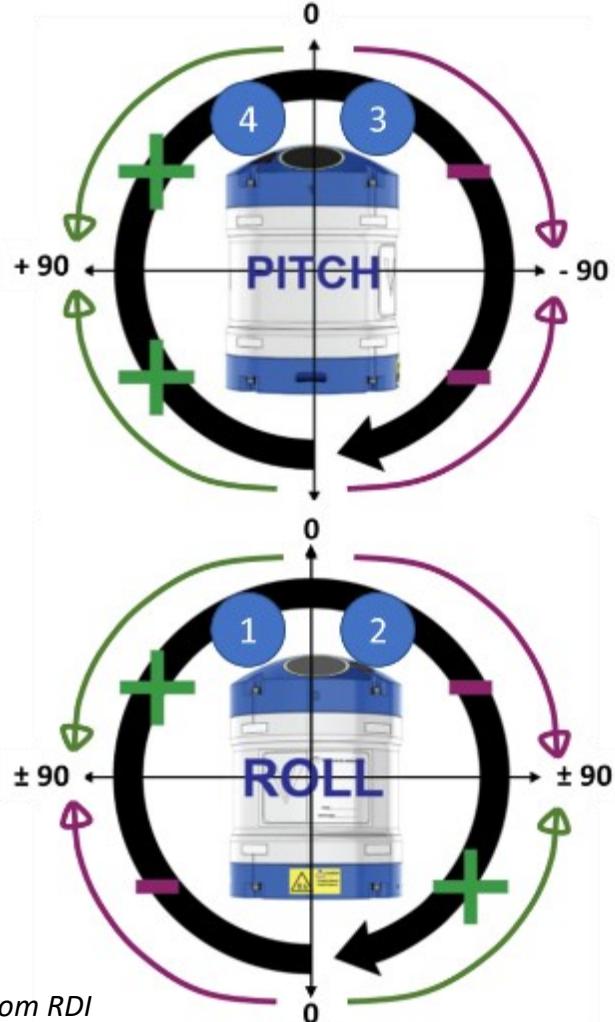


Méthode de traitement des mesures de w



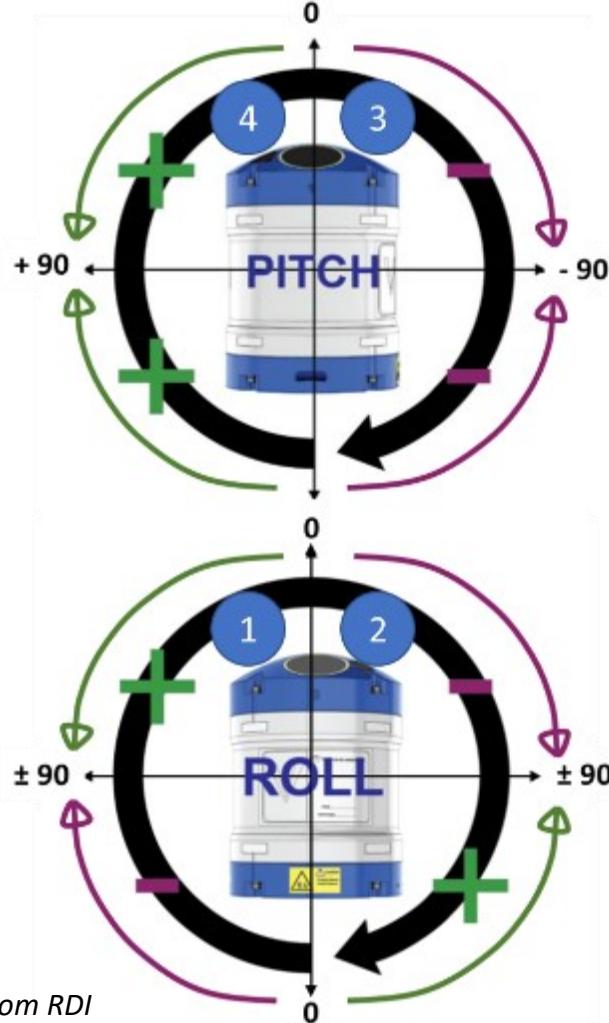
3. Généralisation de la convention des angles d'attitude

Convention RDI



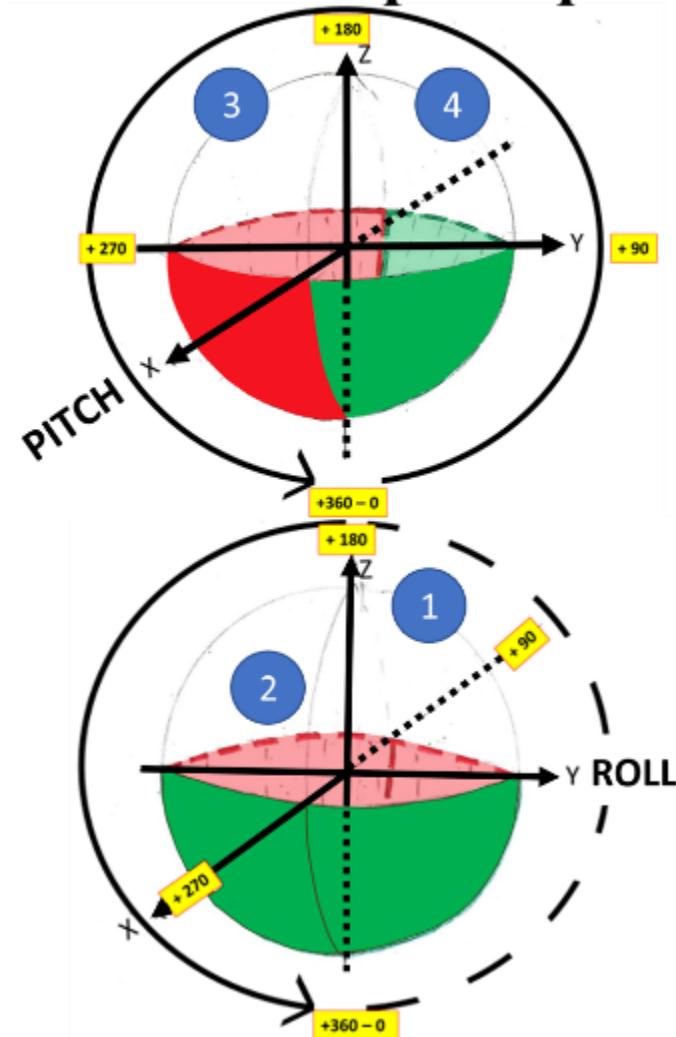
3. Généralisation de la convention des angles d'attitude

Convention RDI

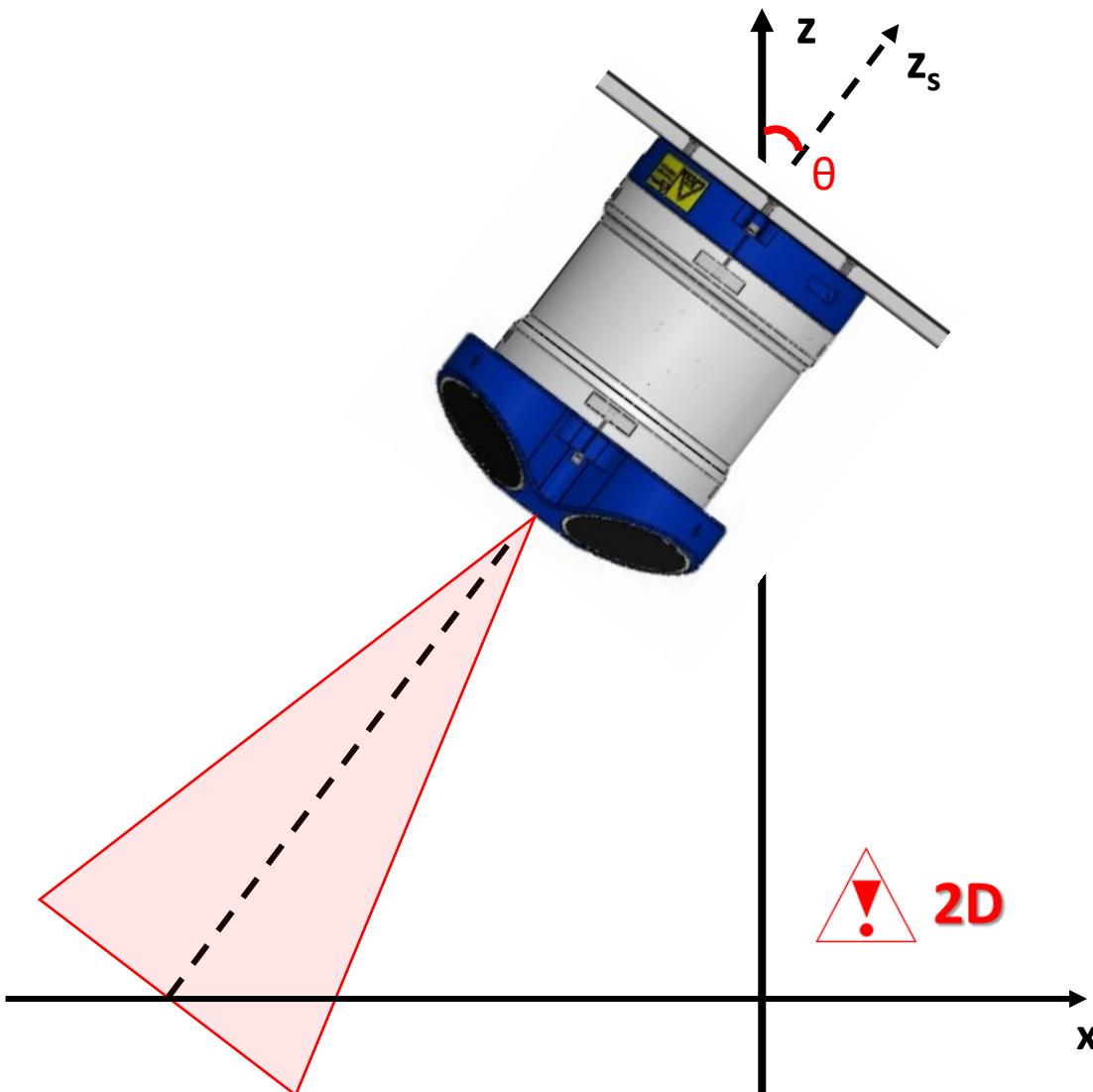


Adapted from RDI

Convention sphérique

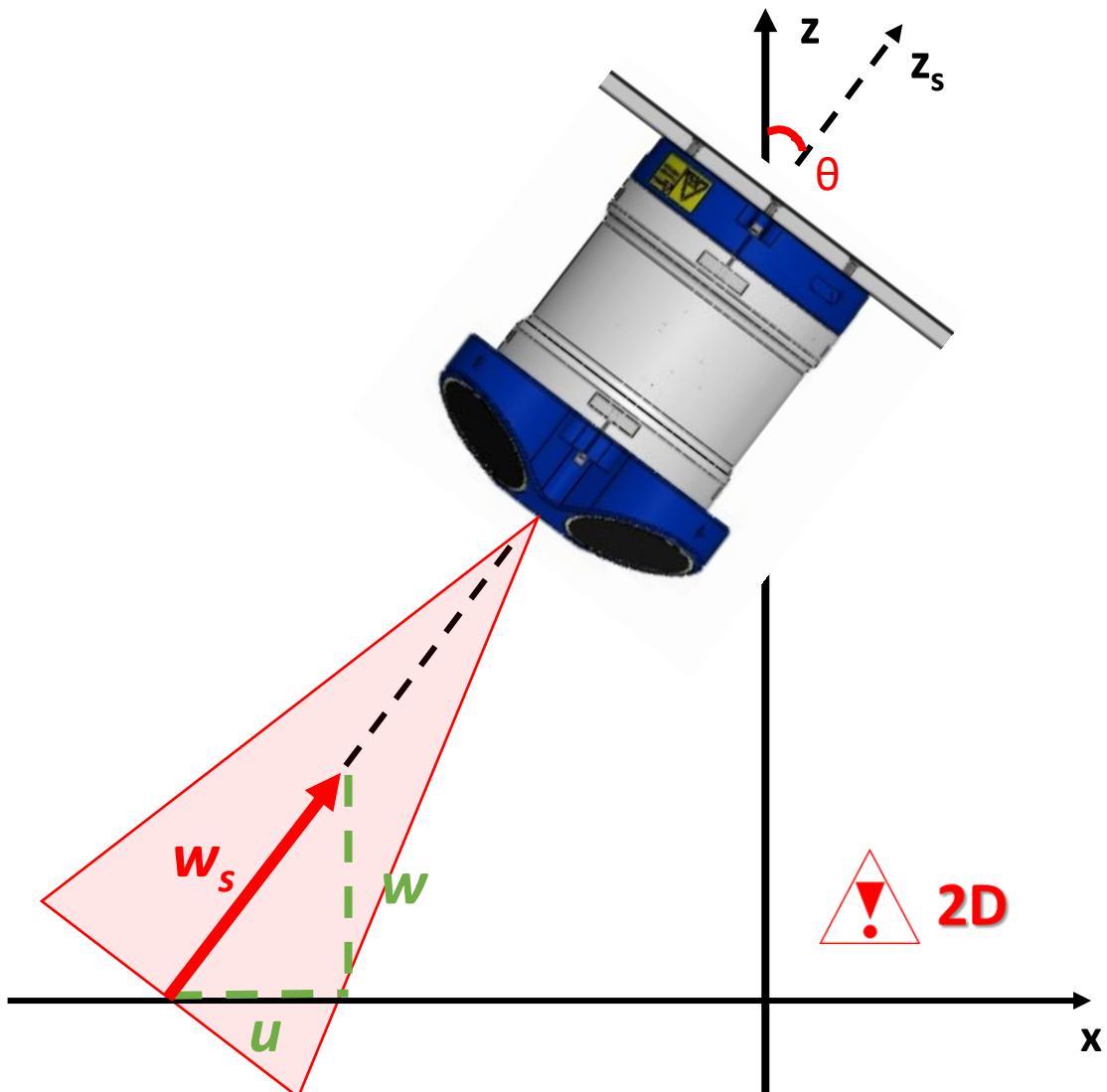


4. Changement de référentiel Sentinel → Terre



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

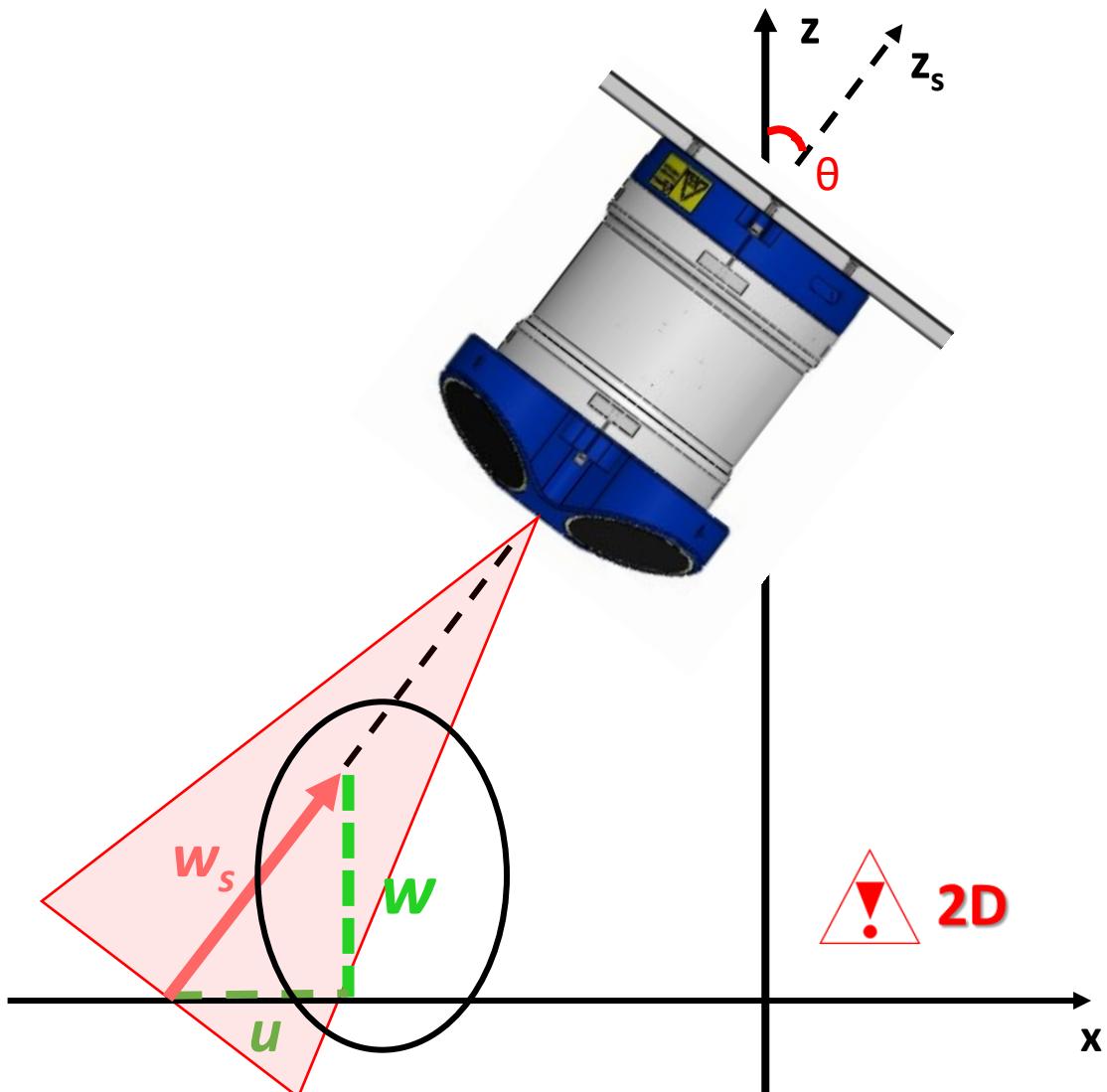
4. Changement de référentiel Sentinel → Terre



θ 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



θ 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



3D

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

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

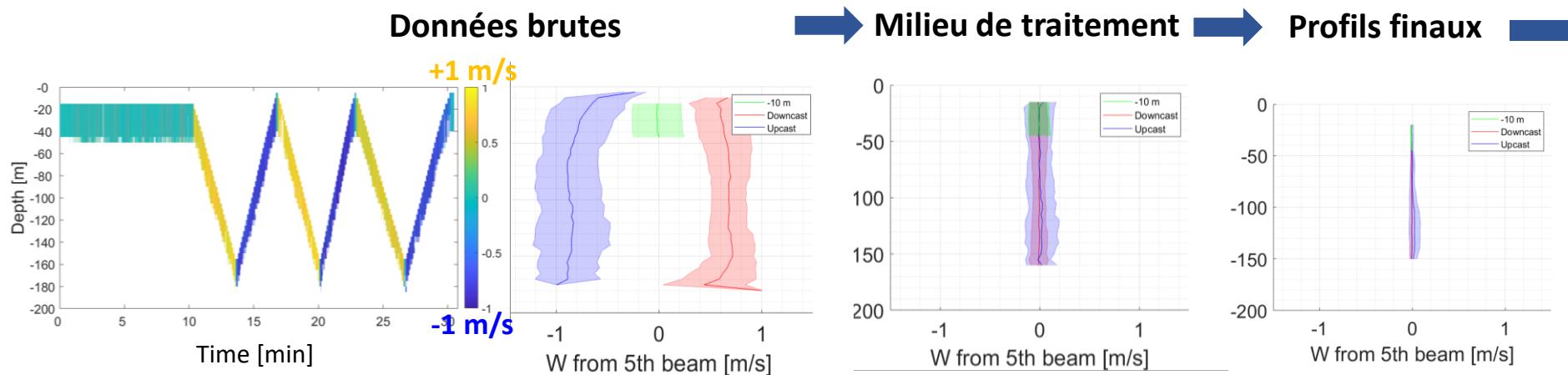
Terrestre ← → Sentinel

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^{ème} faisceau

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



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

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

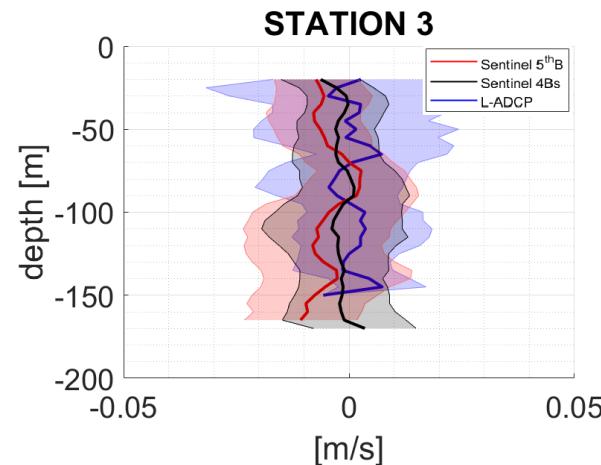
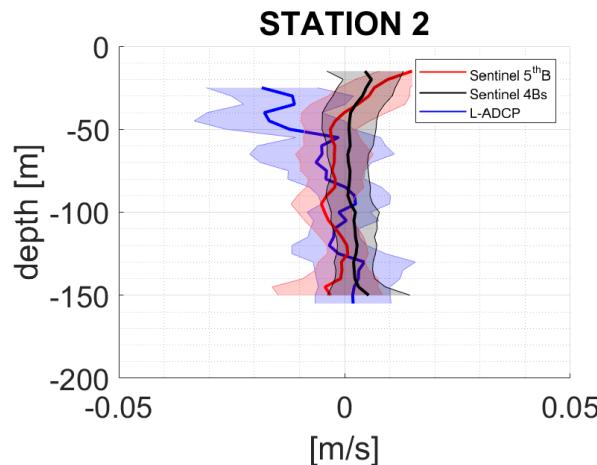
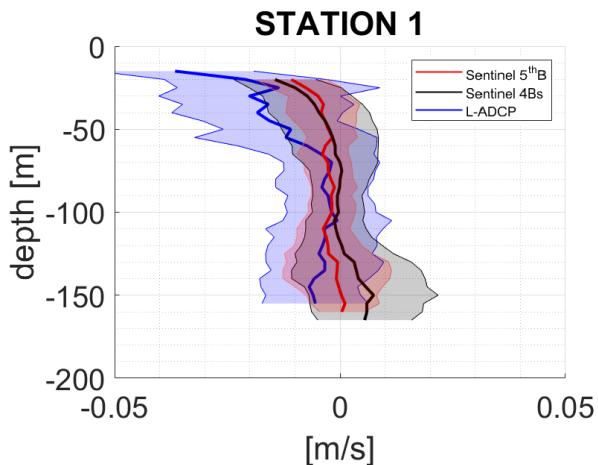
Ordres de grandeur atteints : $\mu \sim \text{mm/s}$ $\sigma \sim 1 \text{ cm/s}$

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 5th Beam*, *Sentinel 4 Beams*, *L-ADCP*

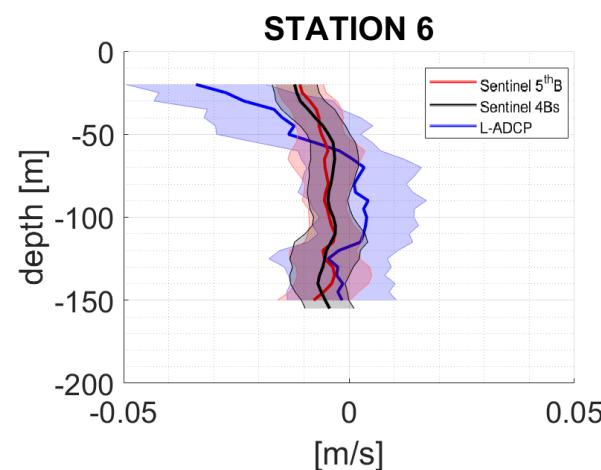
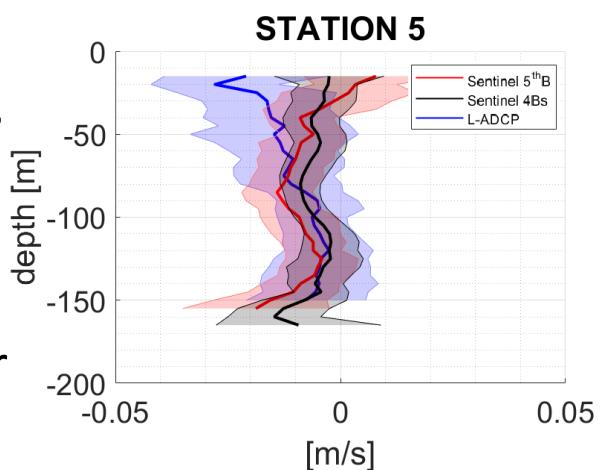


Sentinel 5th Beam & 4 Beams

- concordance des 2 datasets

L-ADCP

- différence en surface
- concordance en profondeur

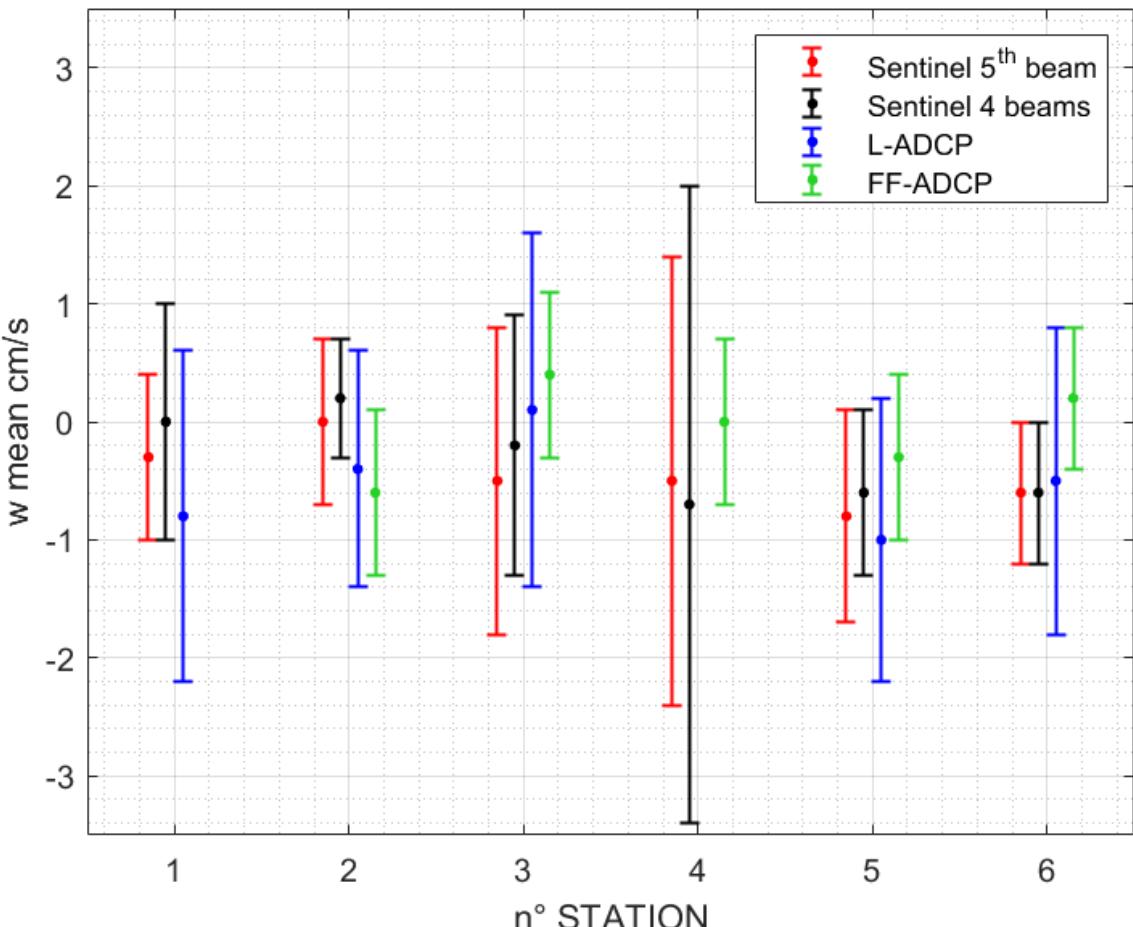


→ Généralisation de la méthode de traitement au L-ADCP
 → σ meilleurs pour les données issues du Sentinel

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

$$\begin{aligned}\mu &\sim \text{mm/s} \\ \sigma &\sim \text{cm/s}\end{aligned}$$

Meilleures précisions avec
Sentinel 5th 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

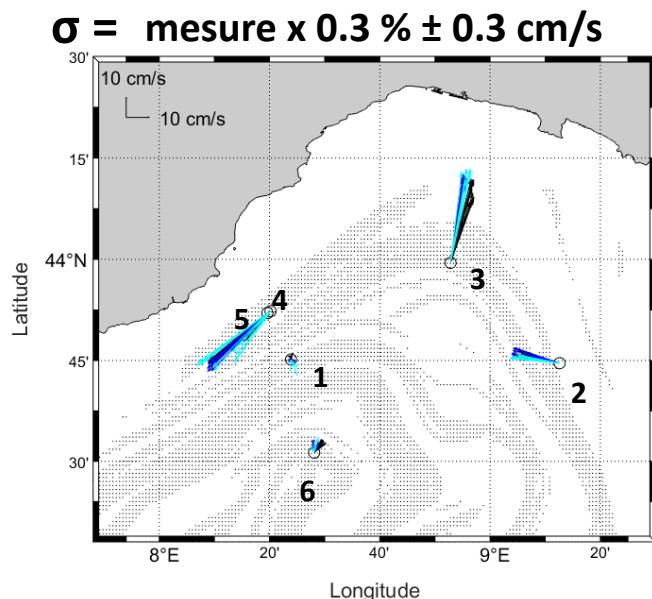
Mesures des **composantes u et v** par le **Sentinel** et le **L-ADCP** corrigées de l'effet de **dérive** du navire

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

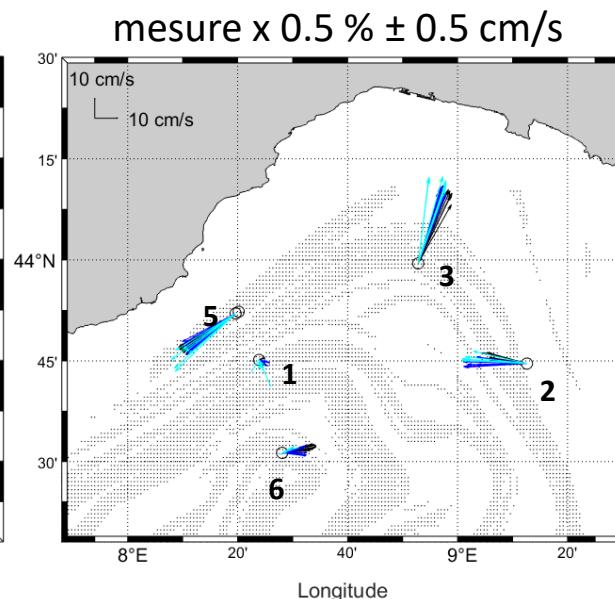
→ Moyenne temporelle : 20 min avant arrivée sur station

profondeurs
0 – 50 m
50 – 100 m
100 – 150 m

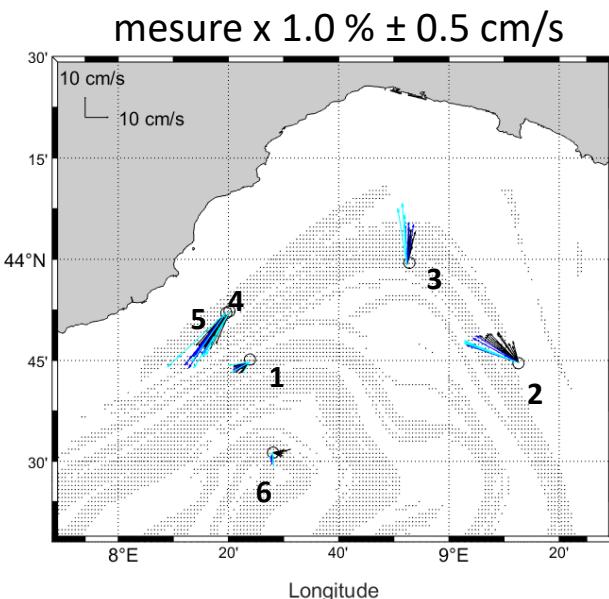
Sentinel



L-ADCP



ADCP de coque



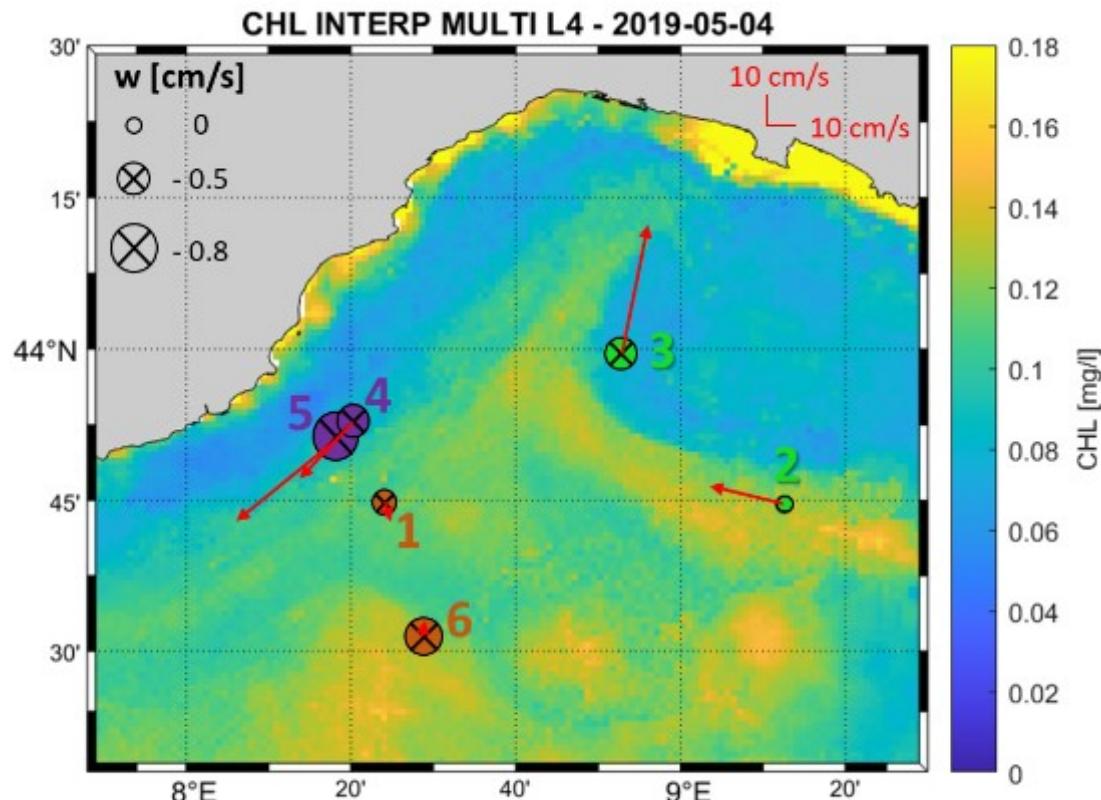
- Concordance u et v entre chaque instrument & dynamique attendue dans la zone
- Confiance dans l'acquisition de w par le **Sentinel 5th beam**

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

Utilisation de différentes sources de données

Sentinel : w (5^{th} 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^{th} beam), u et v

Satellite : produits L3 et L4 de chlorophylle et SST

- Distinction de plusieurs zones :

Courant Nord (liguro-provençal)

Recirculation cyclonique

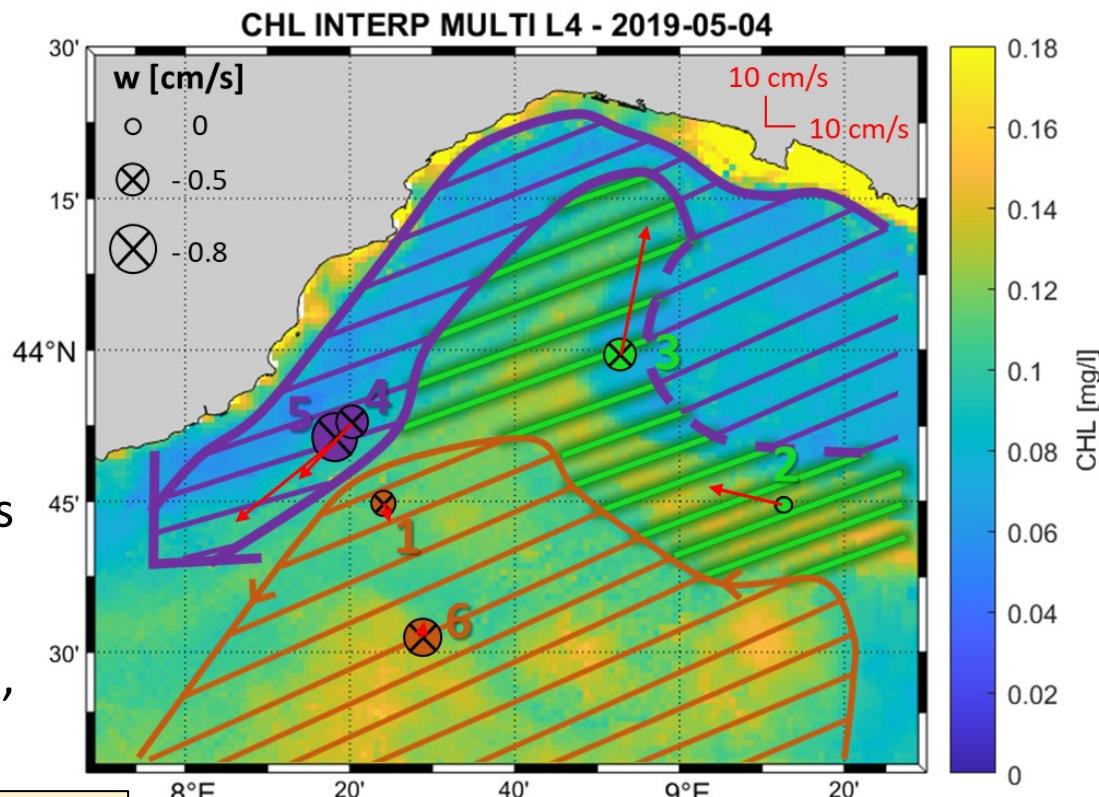
Zone intermédiaire

→ Différences géographiques

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

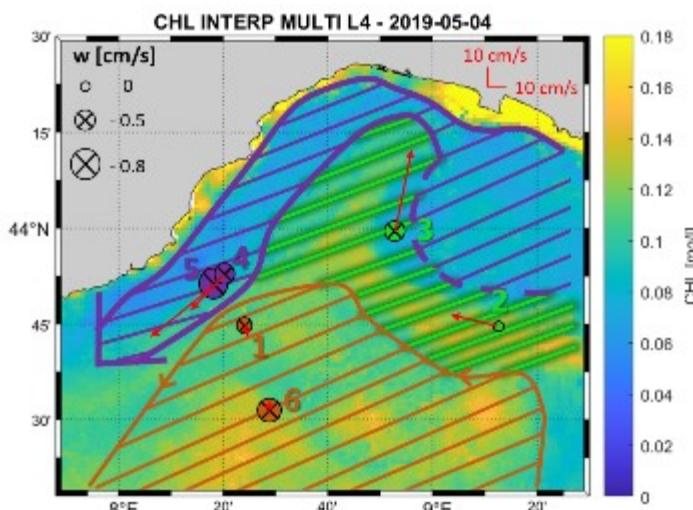
Faible contraste des w dans la zone, w faiblement < 0

→ Différents processus de fine échelle



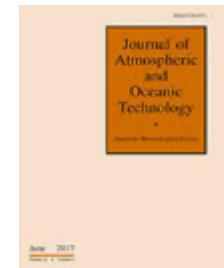
Conclusions

- **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**

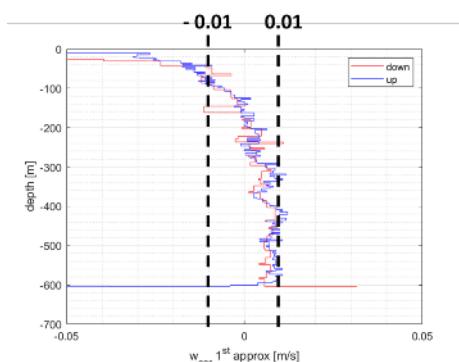


Perspectives

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



- Analyse des données du SeaExplorer (modèle de vol)
→ Étude de w_{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

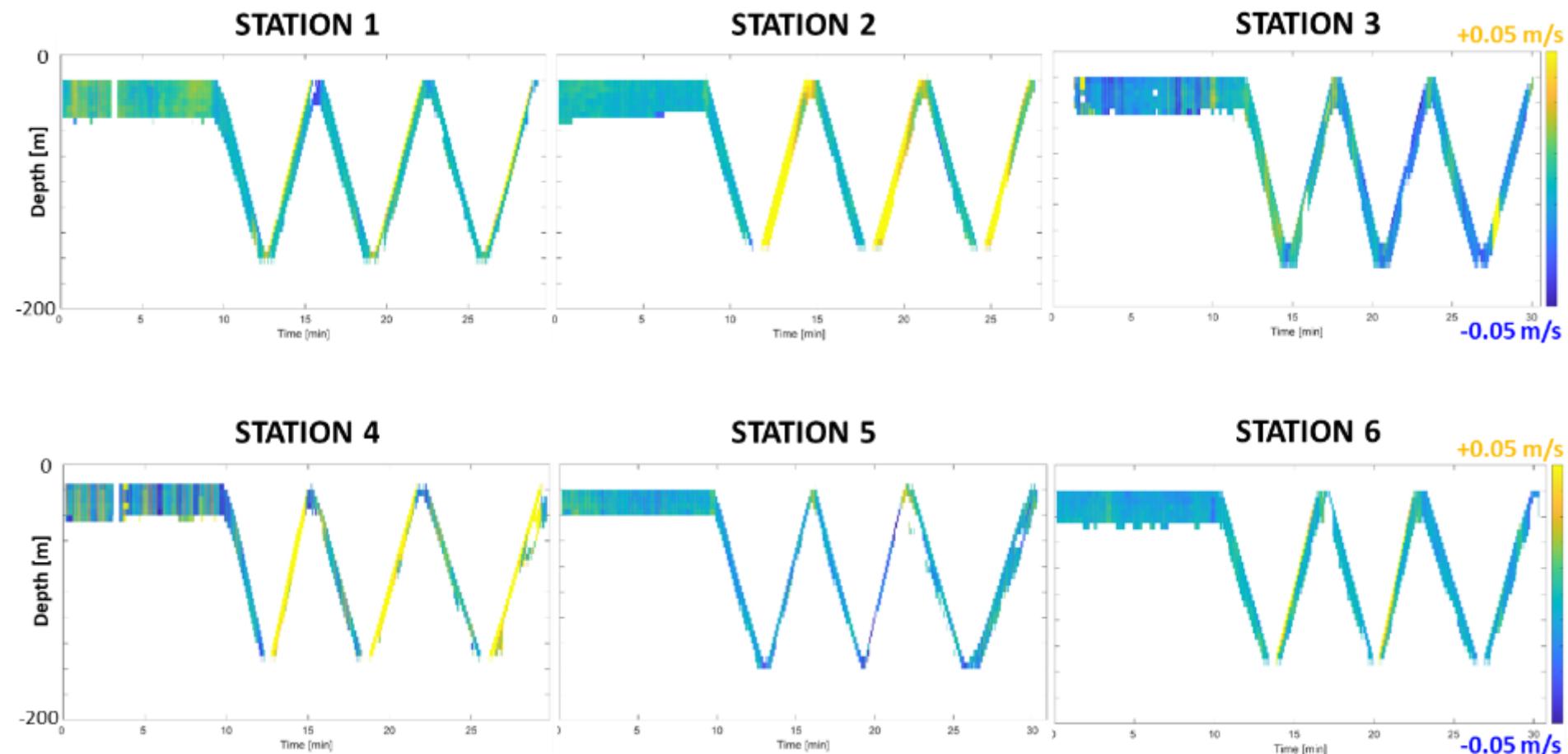


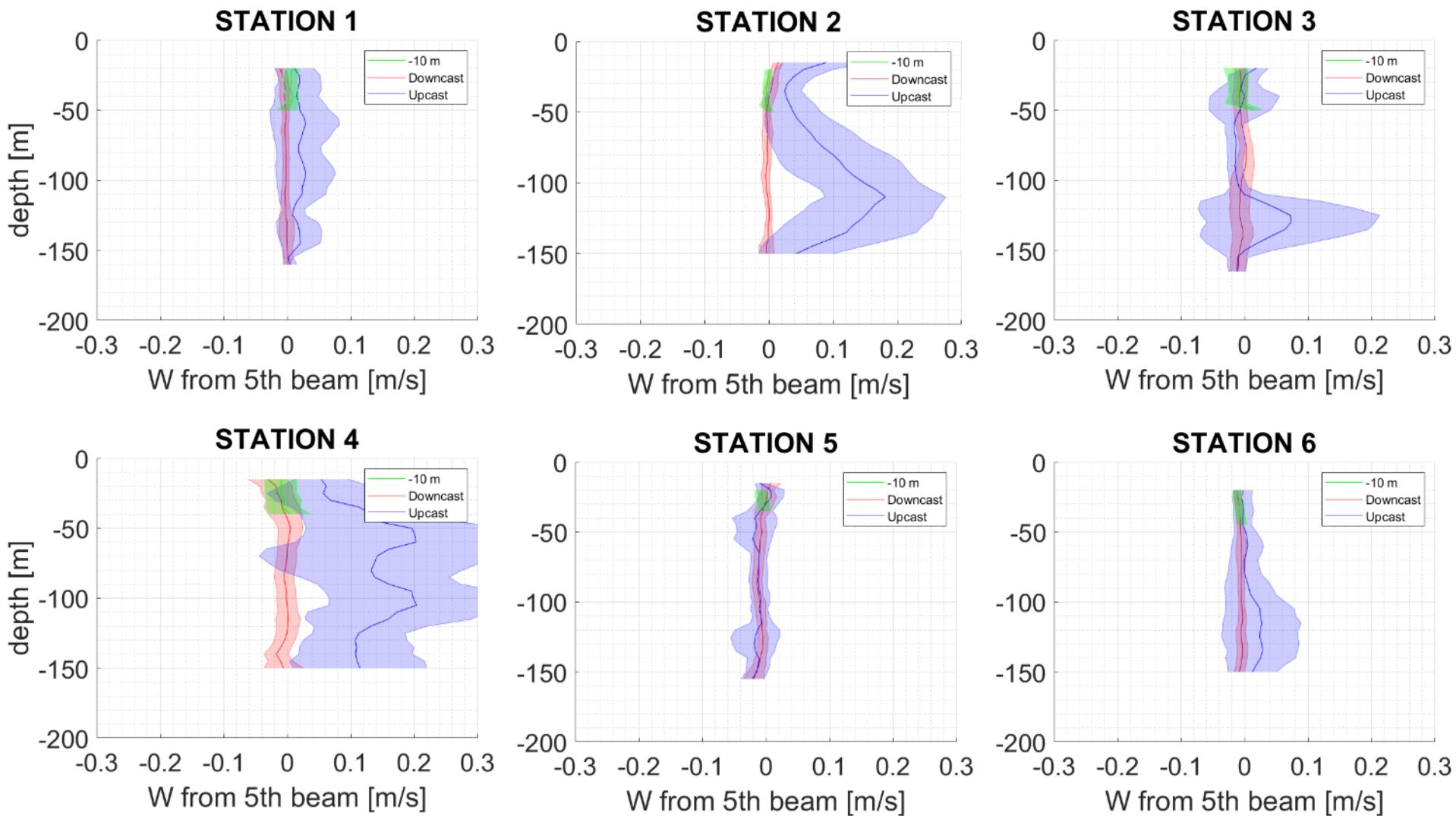


Merci pour votre attention

Annexes

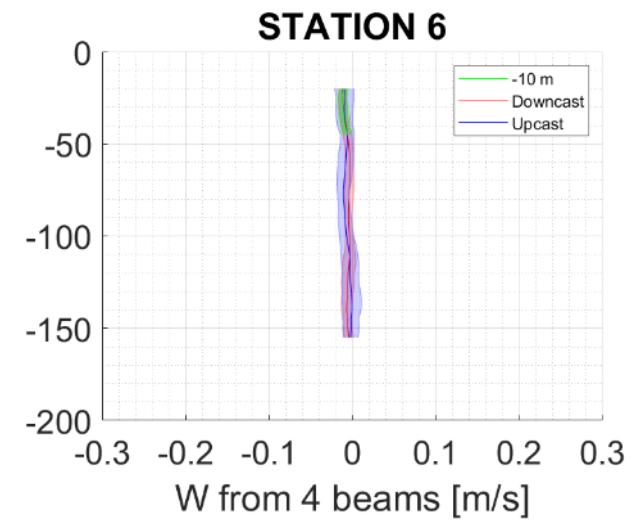
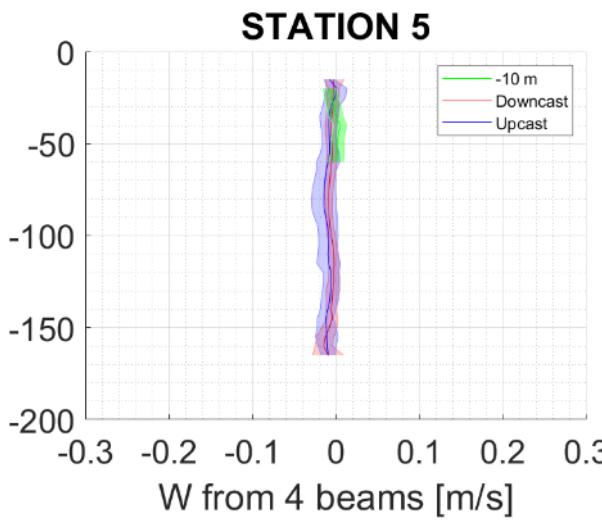
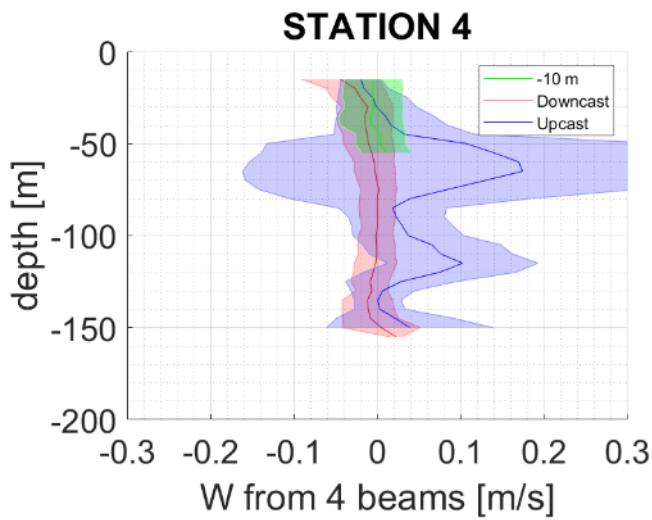
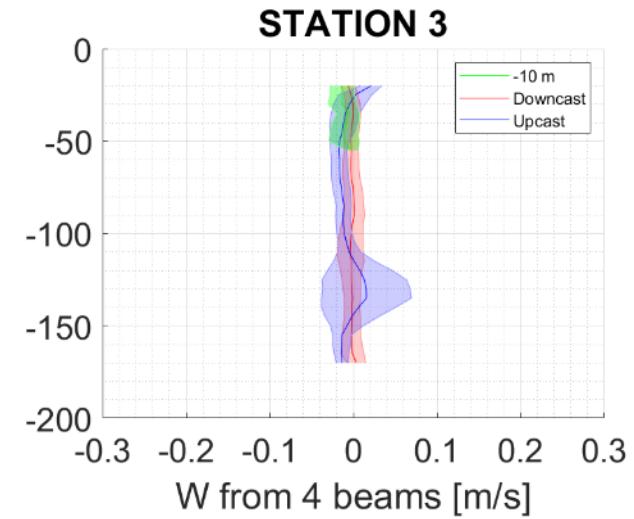
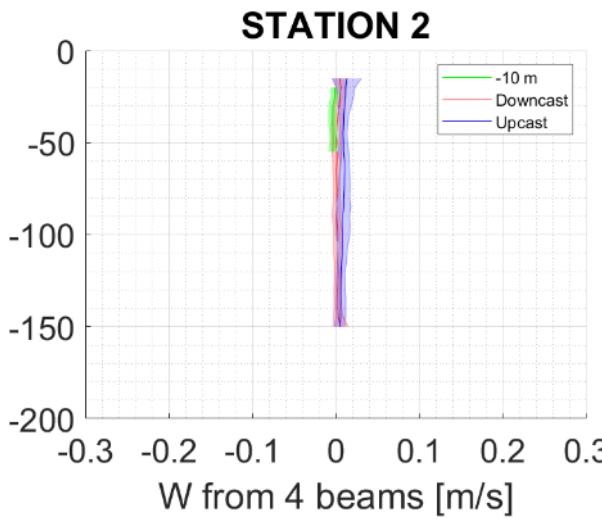
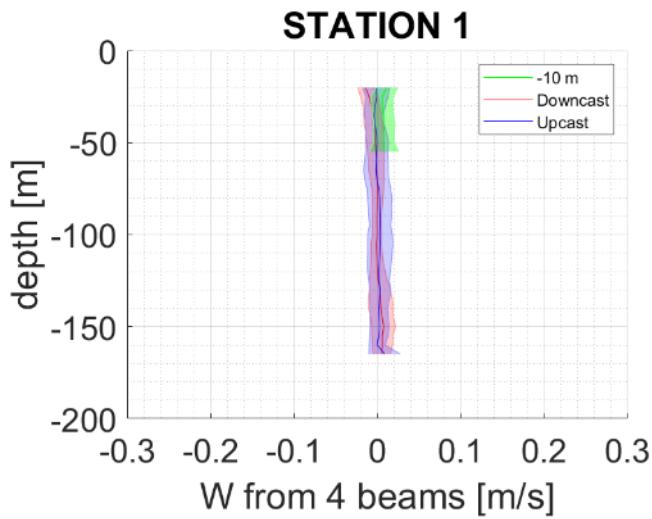
Séries temporelles des mesures de w par **Sentinel 5th beam**





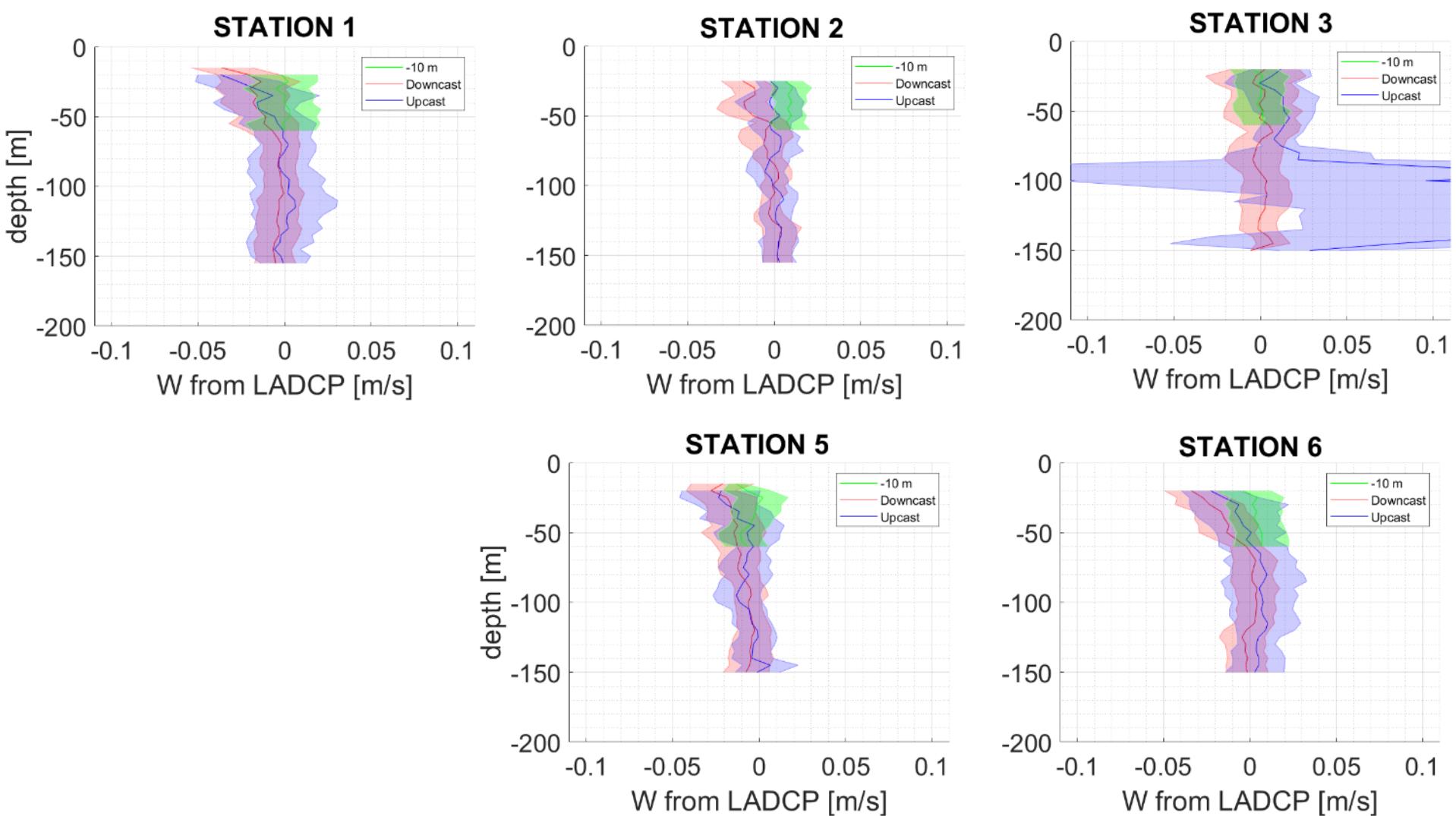
downcasts

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



downcasts

STATION	1	2	3	4	5	6
μ [10 ⁻² m/s]	-0.0	0.2	-0.2	-0.7	-0.6	-0.6
σ [10 ⁻² m/s]	1.0	0.5	1.1	2.7	0.7	0.6



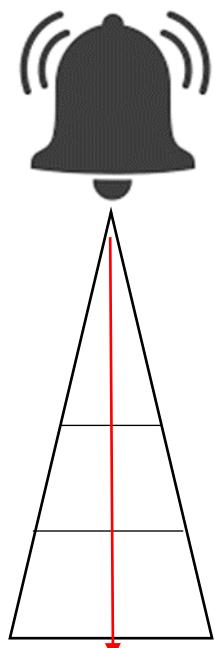
downcasts

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

Phénomène de résonance – ou *ringing*

1. Pulse acoustique :

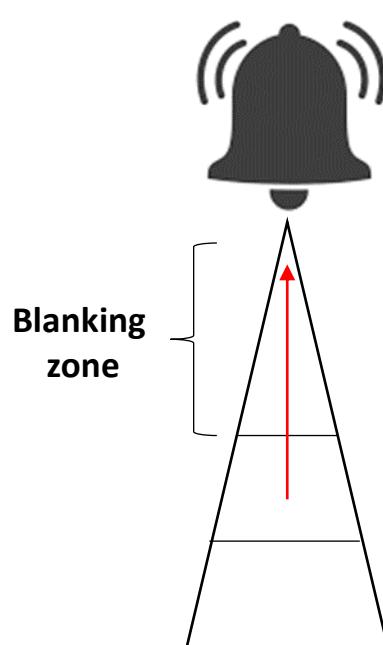
- envoi du **signal**
- vibration de la dalle



2. Écoute écho cellules proches :

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

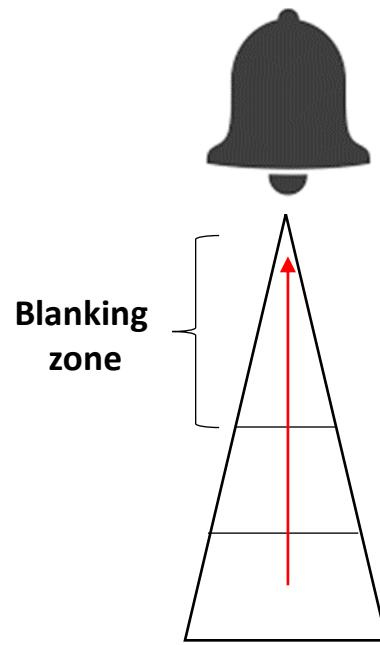
Effet Doppler $\rightarrow 0$



3. Écoute écho cellules éloignées :

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

Effet Doppler

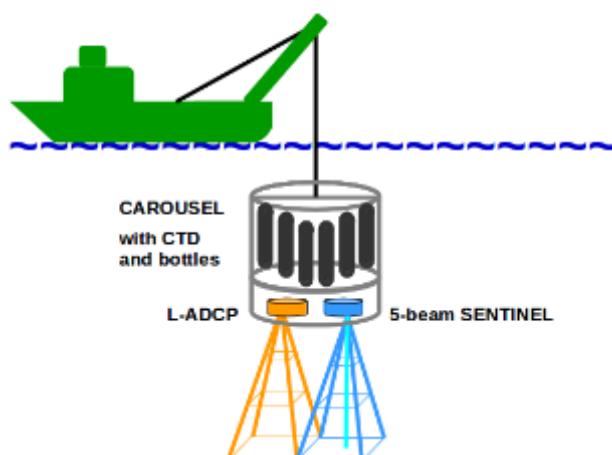


Sentinel V : 5-beam ADCP

Déploiement

The Five Beam ADCP

Five Beam Acoustic Doppler Current Profiler



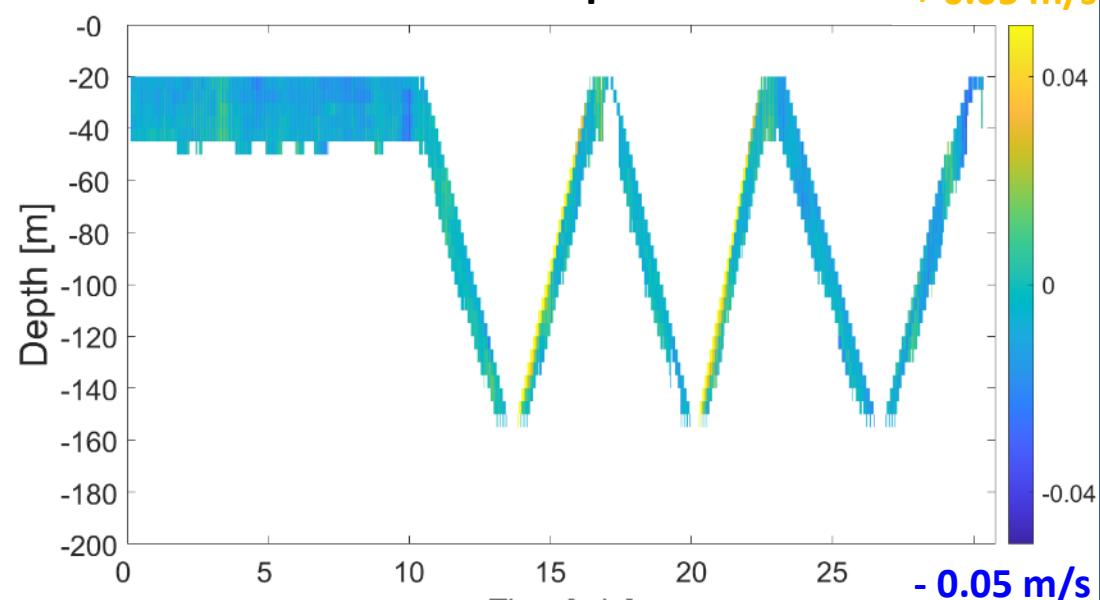
andrea.doglioli@univ-amu.fr



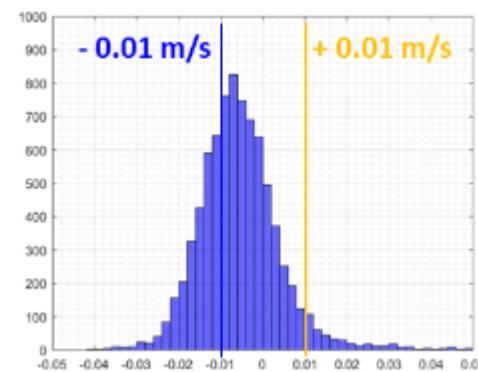
<https://people.mio.osupytheas.fr/~doglioli>

Résultats – STATION 6

Série temporelle



Histogramme



Traitements des données

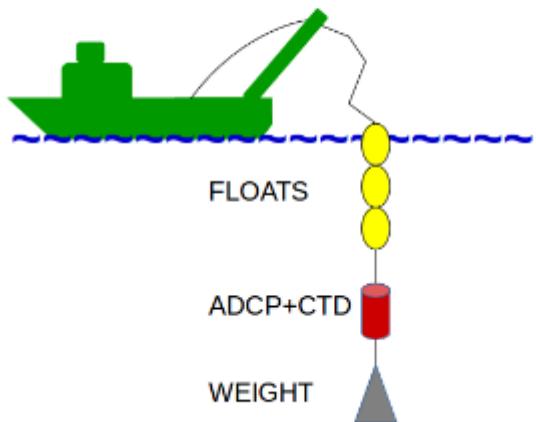
Chaine d'analyse des
vitesses verticales

C. Comby, 2020

FF-ADCP

Déploiement

The FF-ADCP stic Doppler Current Profiler



andrea.doglioli@univ-amu.fr



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

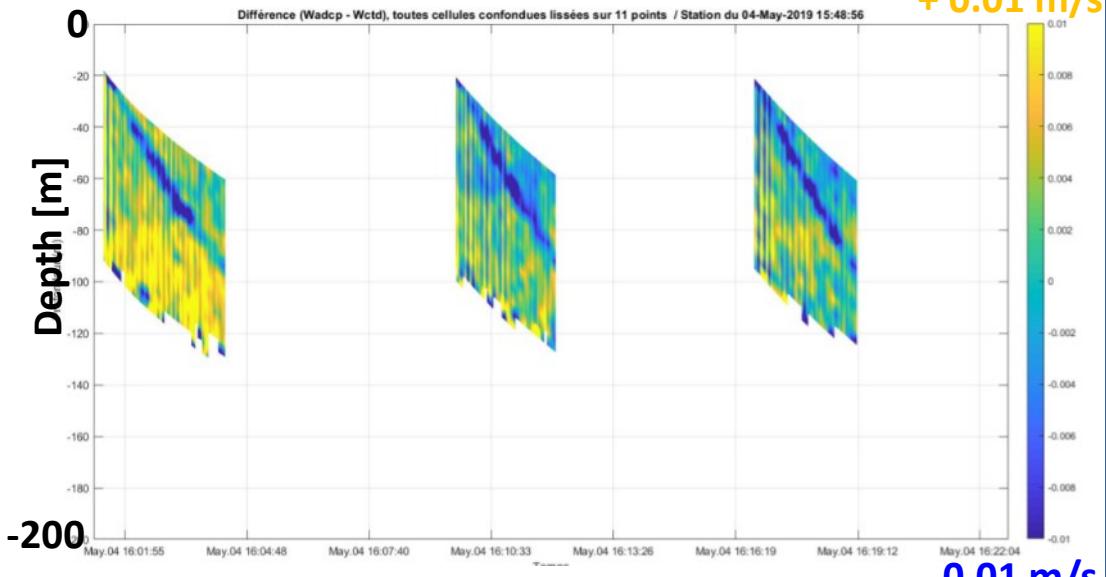
Traitement des données

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

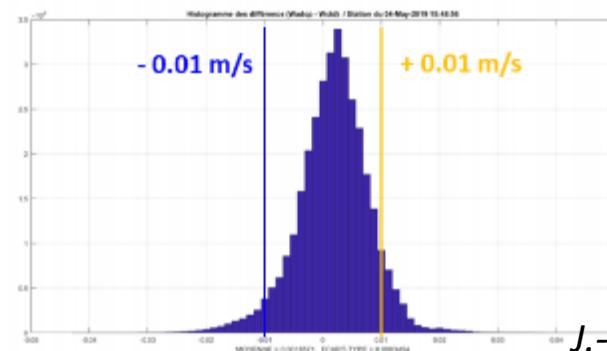
J.-L. Fuda, 2019

Résultats – STATION 6

Série temporelle



Histogramme



J.-L. Fudg, 2019

Synchronisation

Error, correl, int.

Earth coord.

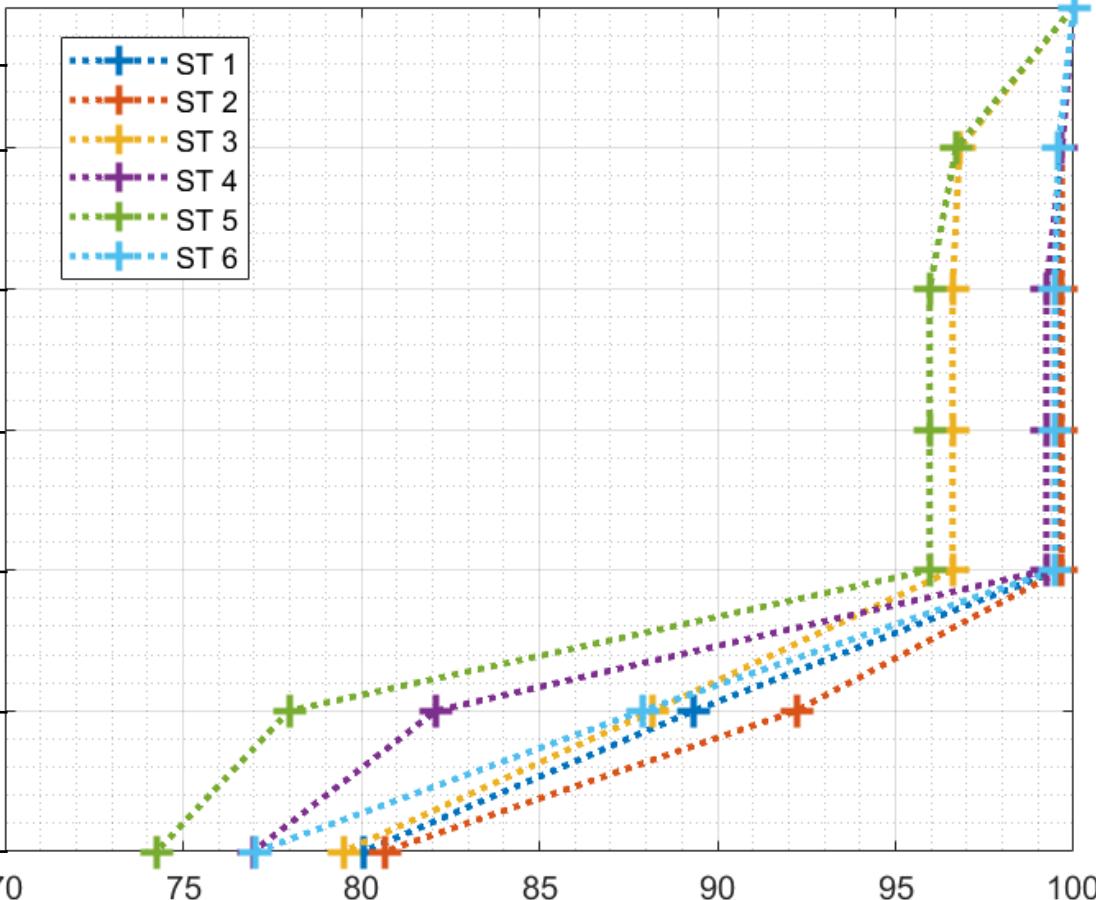
CTD speed

Depth estimation

Temporal average

Top, bottom cut

% données conservées SENTINEL 5th beam



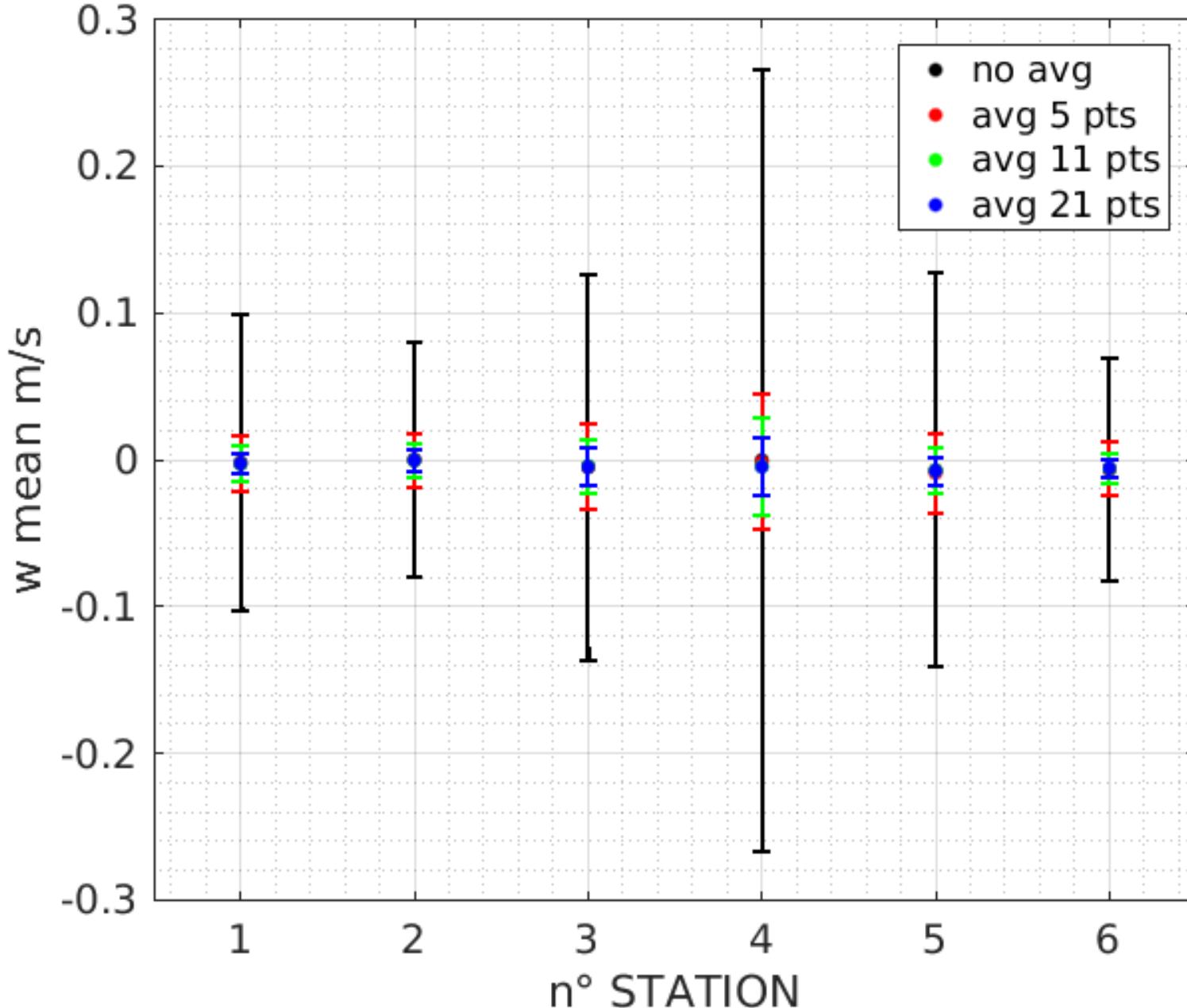
Diminution progressive du nombre de valeur numérique de w (i.e. NaN augmente)

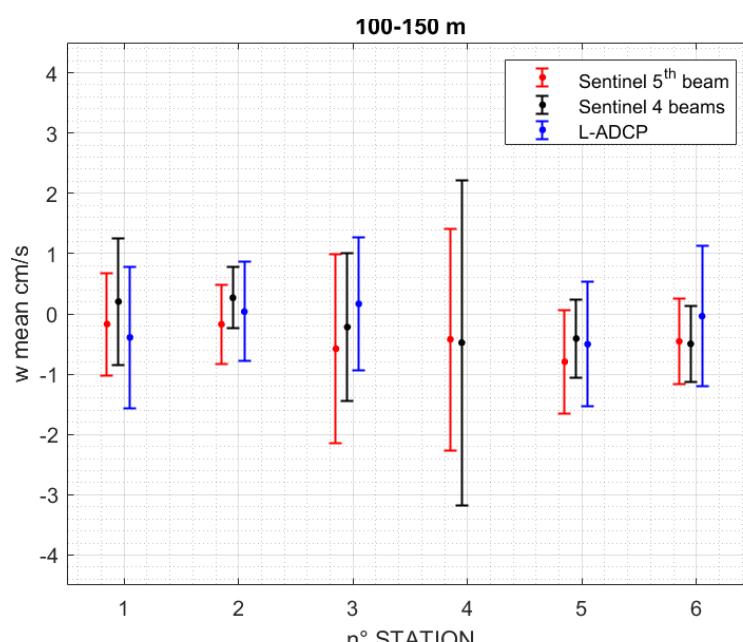
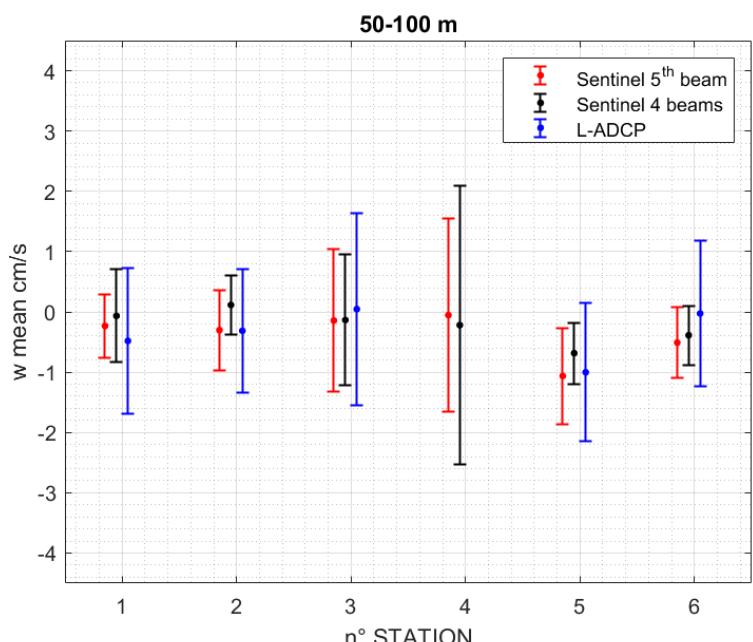
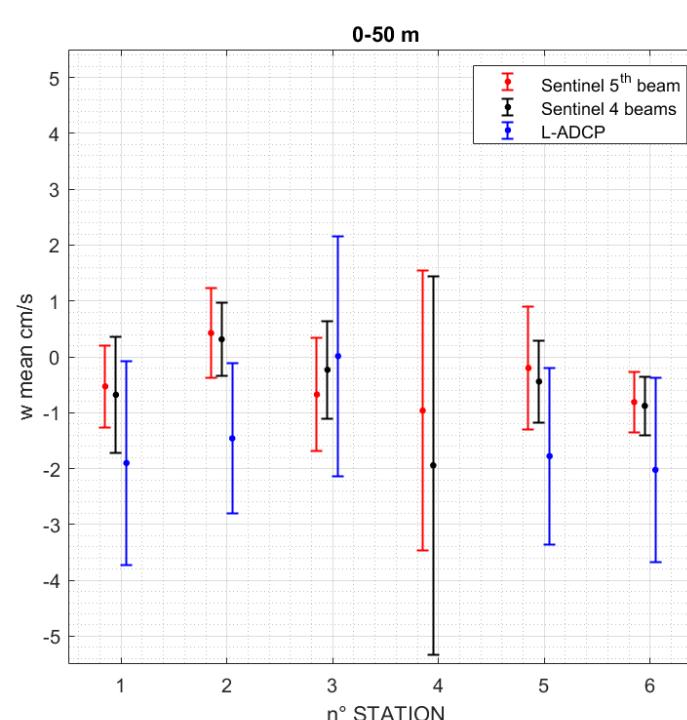
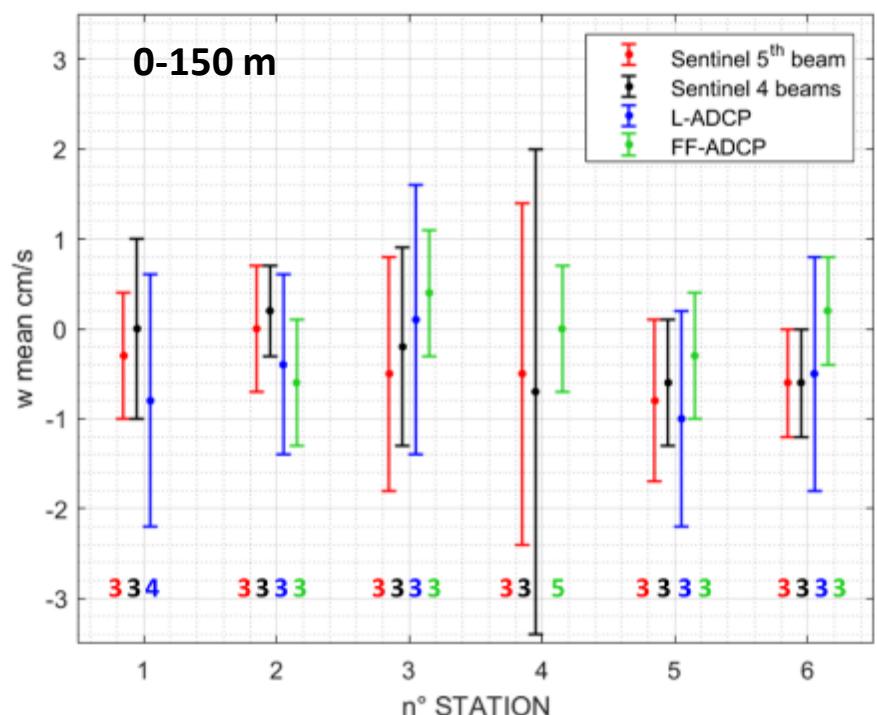
Réduction principale : ***temporal average***

≥ 70 % pour l'ensemble des stations

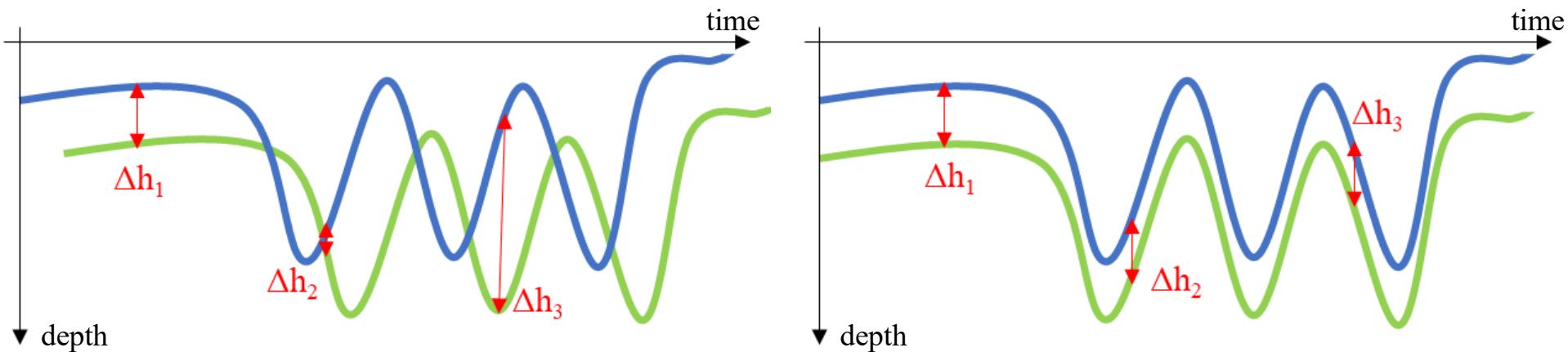
Comparaison des fenêtres de lissage pour μ & σ downcasts

SENTINEL
5th beam





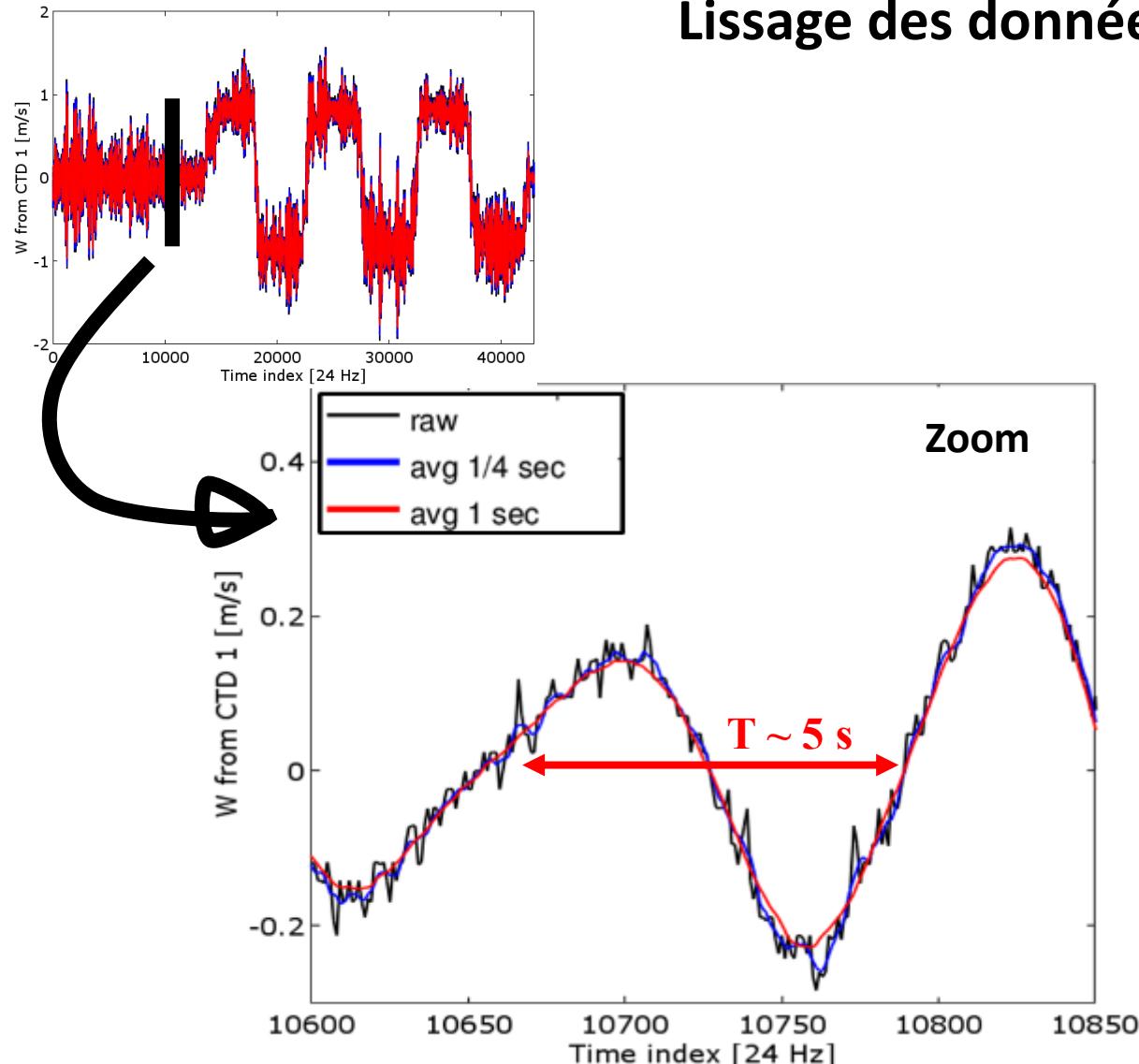
Ajustement automatique des datasets



- Séquence **CTD** balayée par la séquence **SENTINEL**
- Différence de hauteur (Δh) pour chaque indice de temps
- Calcul : moyenne (μ) et écart-type (σ) de l'échantillon

σ 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

→ **1/4 sec** : amplitude & bruit
conservés

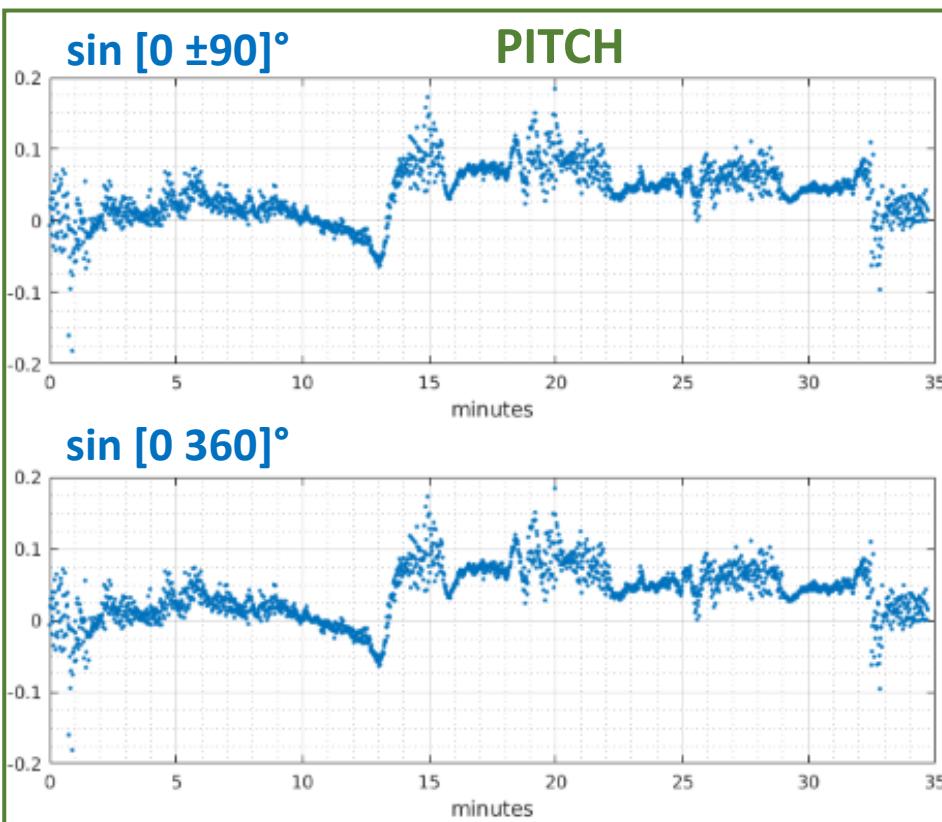
→ **1 sec** : amplitude & bruit
réduits

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

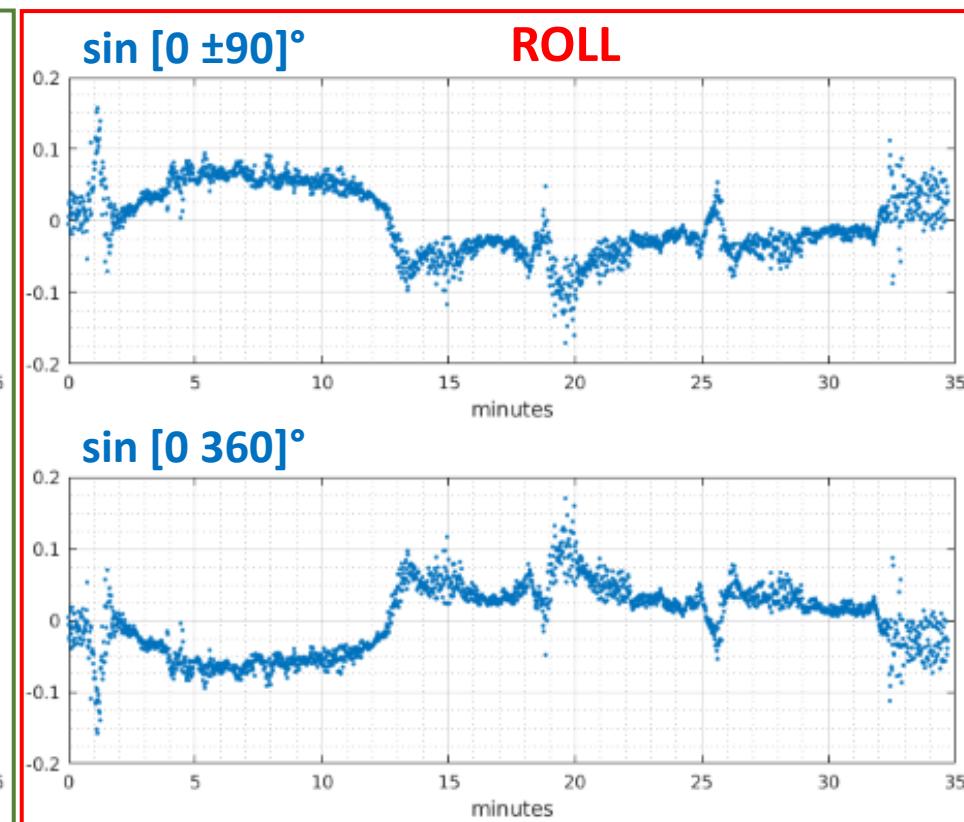
Impact du changement de convention

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 **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) :

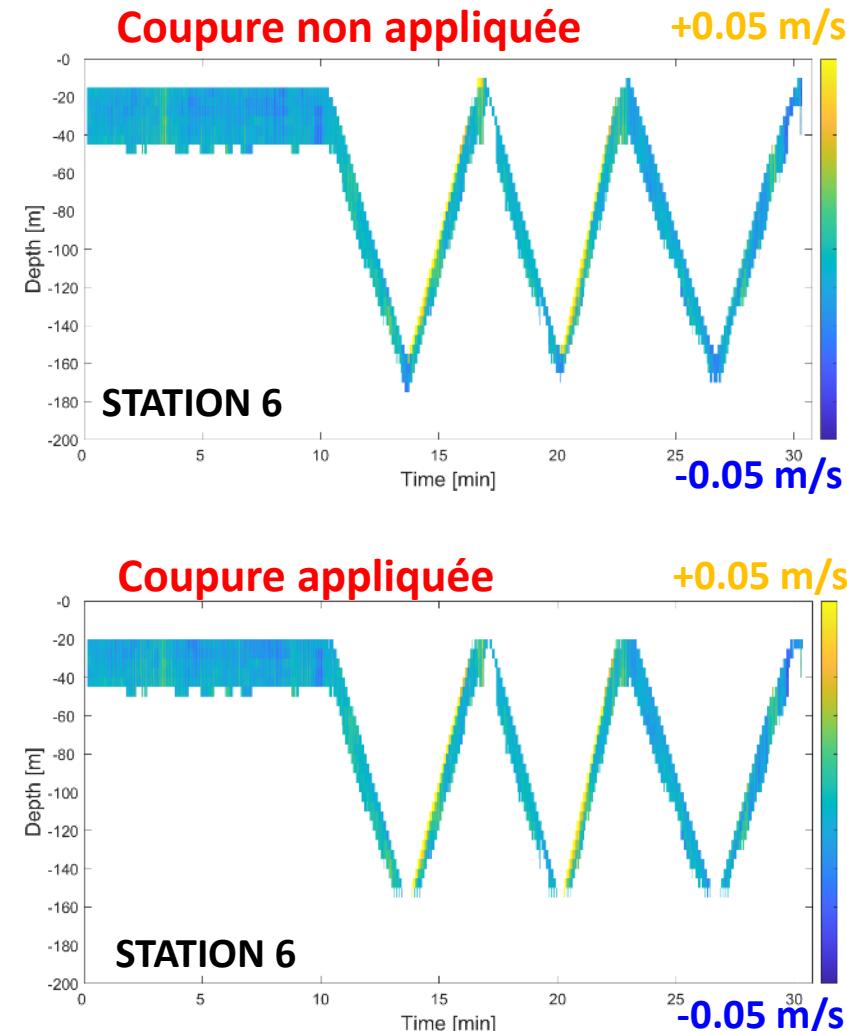
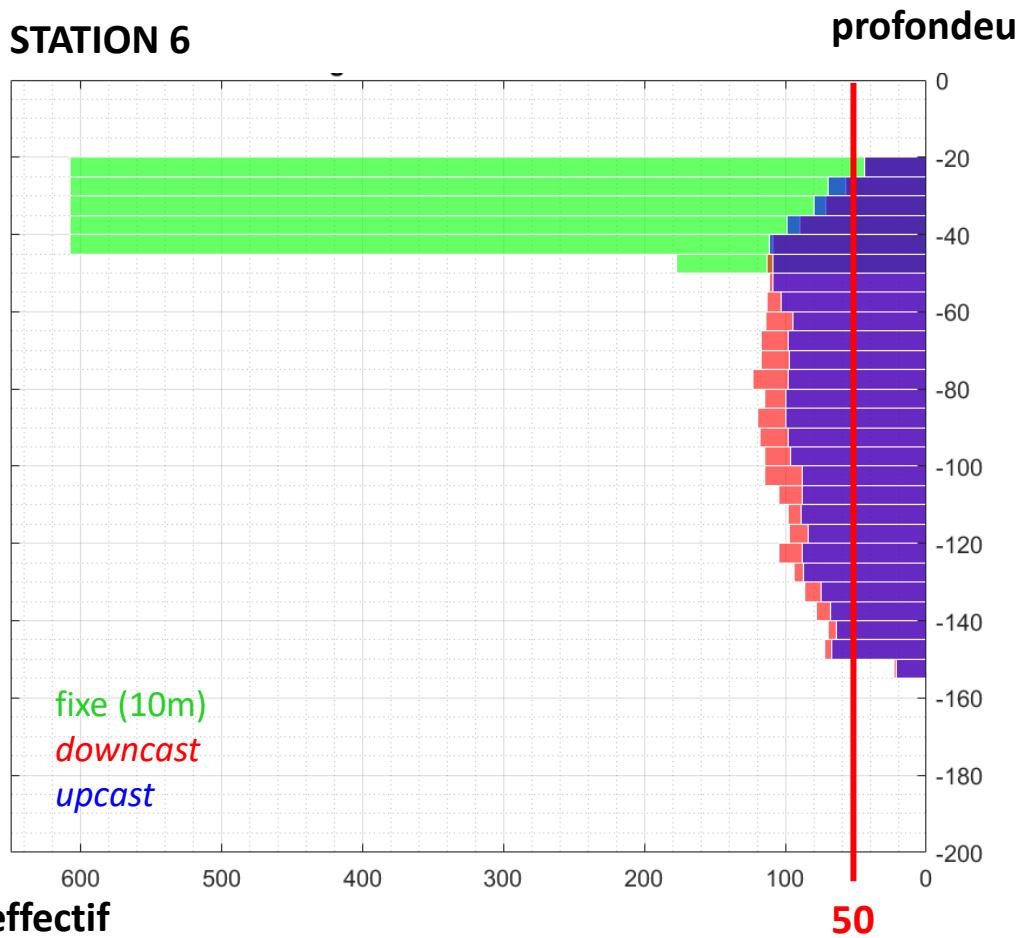
$$w_{\text{CTD}} = \frac{1}{\rho g} \frac{\partial p}{\partial t}$$

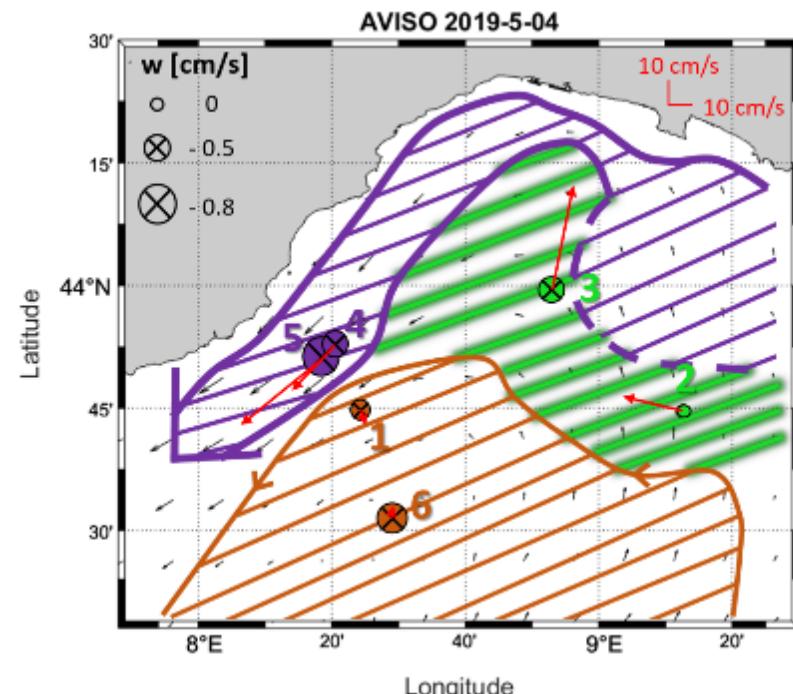
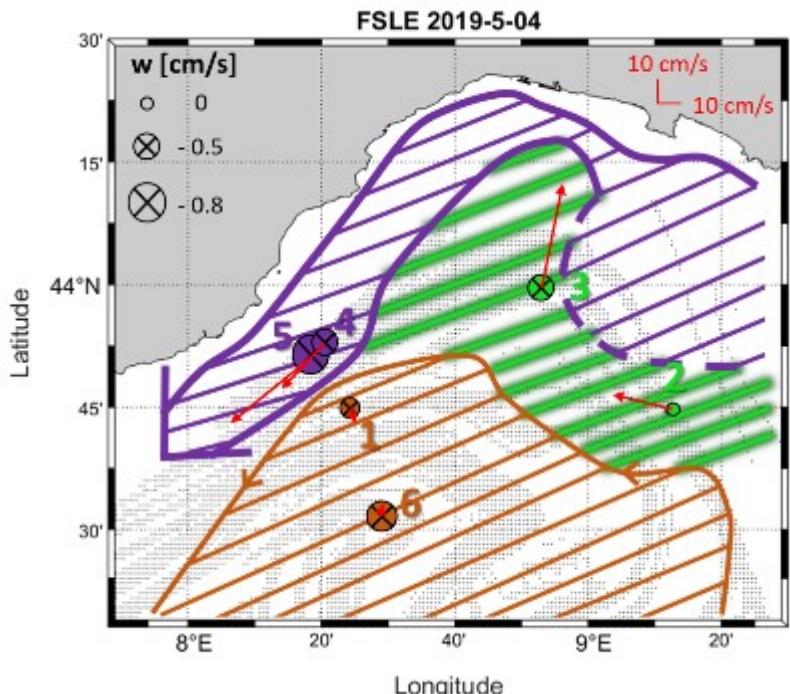
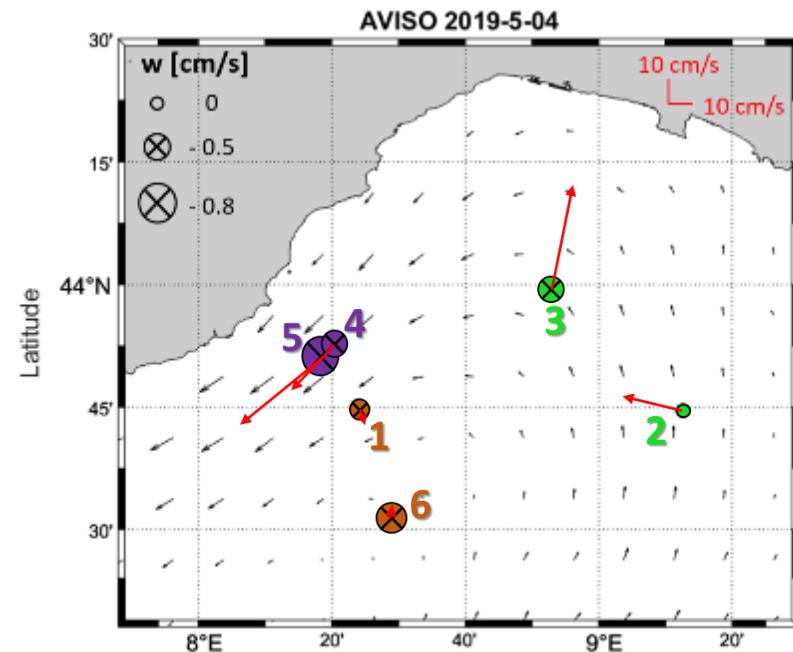
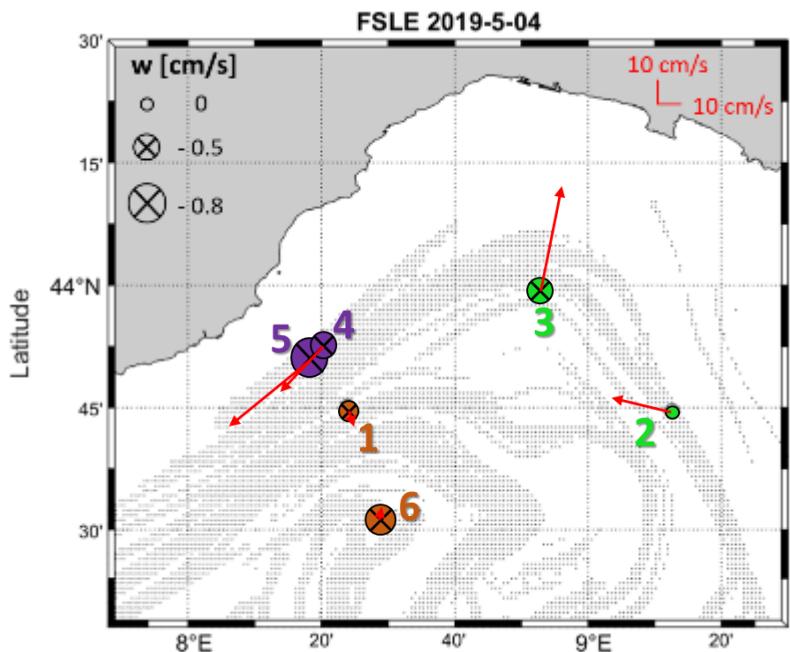
Étape de coupure des extrémités sup./inf.

Approche statistique de la mesure

→ nécessité d'analyser des données avec des effectifs élevés

STATION 6





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

Données à disposition	Précision
■ Sentinel : <i>Sentinel V50</i>	500 kHz
■ L-ADCP : <i>Workhorse</i>	300 kHz
■ ADCP de coque : <i>Ocean Surveyor</i> 75 kHz	mesure x 0.3 % \pm 0.3 cm/s mesure x 0.5 % \pm 0.5 cm/s mesure x 1.0 % \pm 0.5 cm/s

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

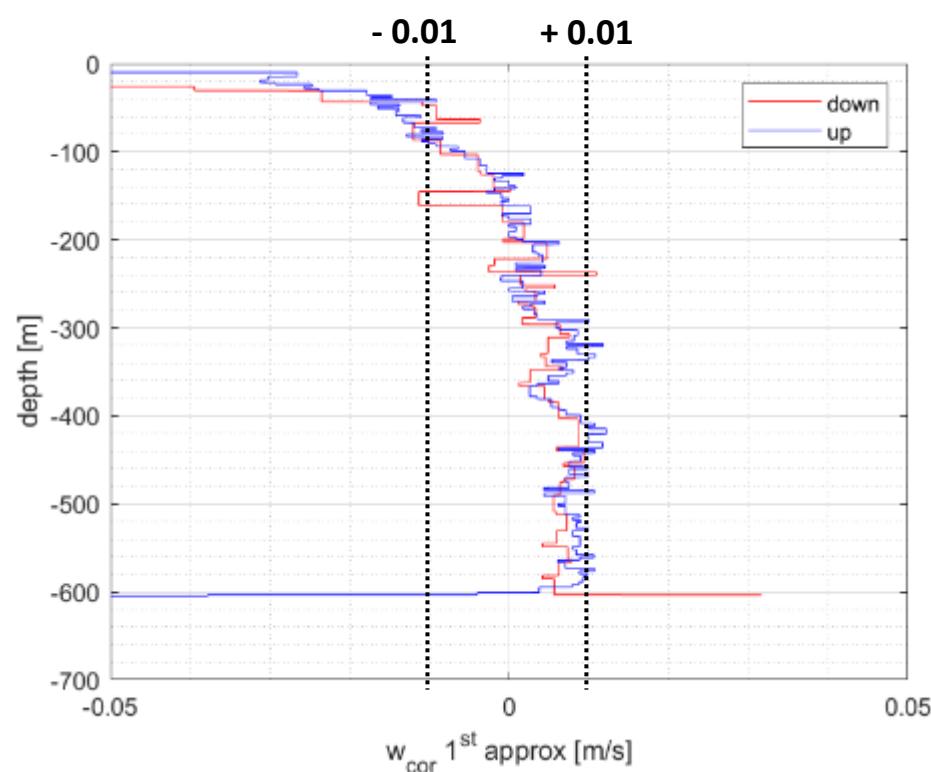
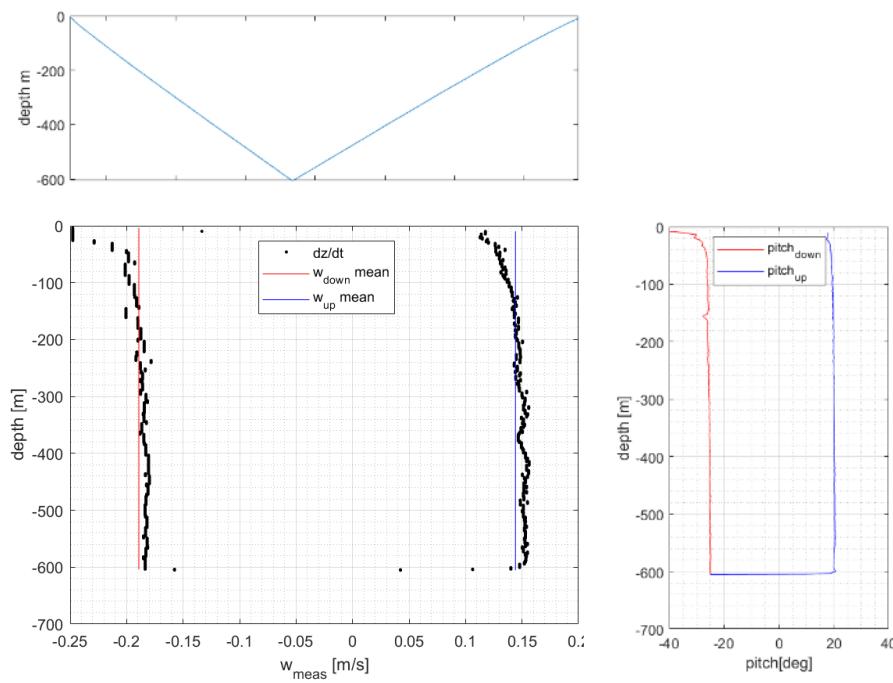
Confiance dans l'acquisition de w par le **Sentinel 5th beam**

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



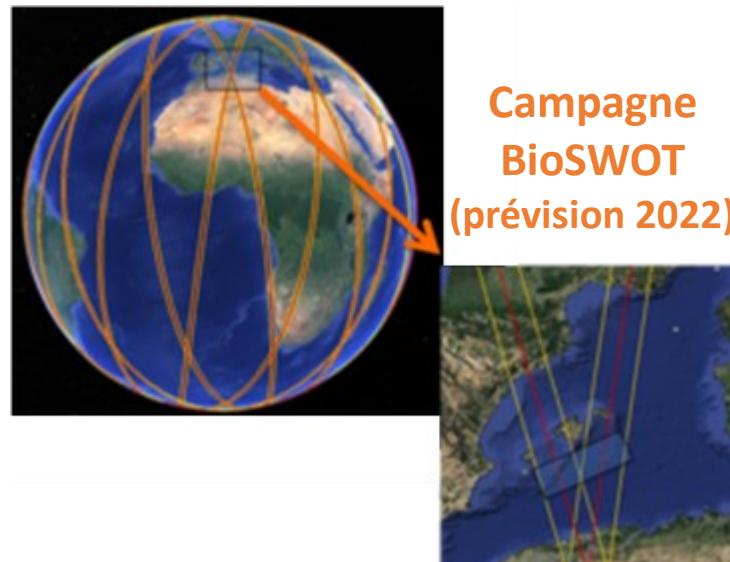
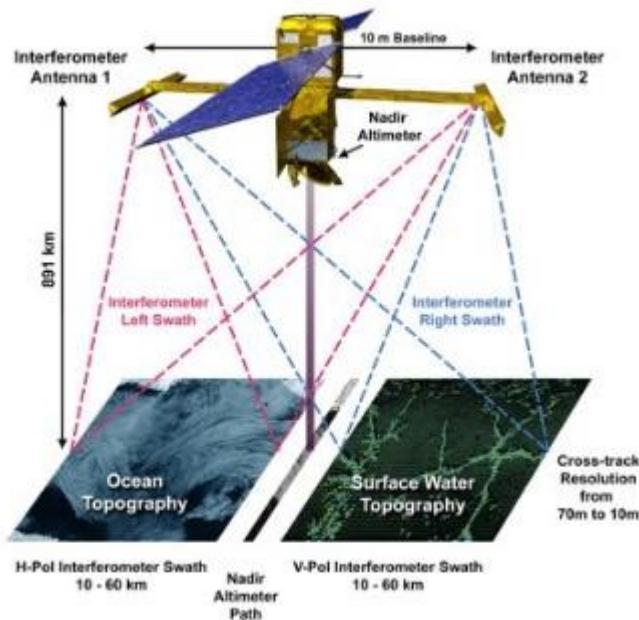
→ En première approximation on obtient des w de l'ordre de quelques mm/s

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



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, 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 The Mediterranean Sea (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 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.