

Vitesses verticales et dynamique de fine échelle

Caroline **COMBY**

Composition du jury

Rapporteure : Rosemary **MORROW**

Rapporteur : Bruno **BLANKE**

Examineur : Francesco **D'OVIDIO**

Examineur : Frédéric **CYR**

Examineur : Xavier **CAPET**

Présidente du jury : Anne **MOLCARD**

Directrice de thèse : Stéphanie **BARRILLON**

Co-directrice de thèse : Anne **PETRENKO**

Introduction

Mesures in situ ADCP

Estimations indirectes

Mesures in situ VVP

BIOSWOT-Med : un aboutissement récent

Conclusions et perspectives

Dynamique océanique

État de l'art sur la mesure des vitesses verticales

Limites de la mesure directe in situ

Questionnement scientifique

Objectifs et stratégies des travaux

Campagne FUMSECK

Dynamique océanique

Différentes échelles spatio-temporelles

Nombreux processus physiques et biologiques

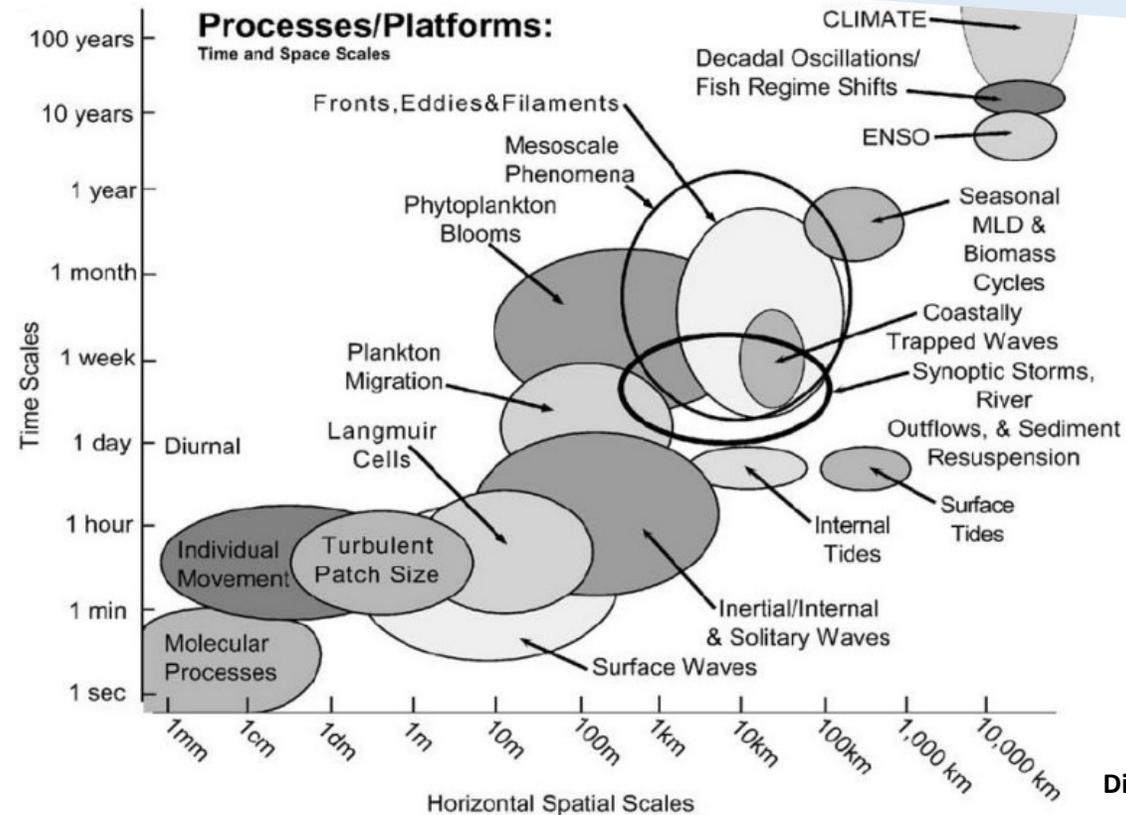
MICRO-

PLANETAIRE

Turbulence



L. DaVinci (1510 – 1512)



Dickey (2003)

Circulation générale



Franklin-Folder (1768 – 1775)

Introduction

Mesures in situ ADCP

Estimations indirectes

Mesures in situ VVP

BIOSWOT-Med : un aboutissement récent

Conclusions et perspectives

Dynamique océanique

État de l'art sur la mesure des vitesses verticales

Limites de la mesure directe in situ

Questionnement scientifique

Objectifs et stratégies des travaux

Campagne FUMSECK

Dynamique océanique

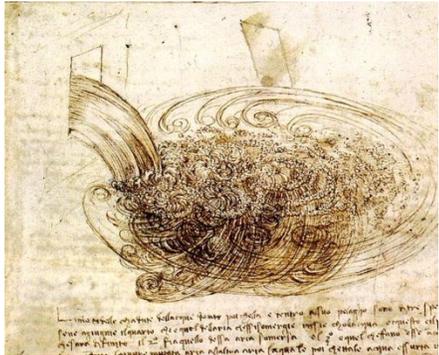
Différentes échelles spatio-temporelles

Nombreux processus physiques et biologiques

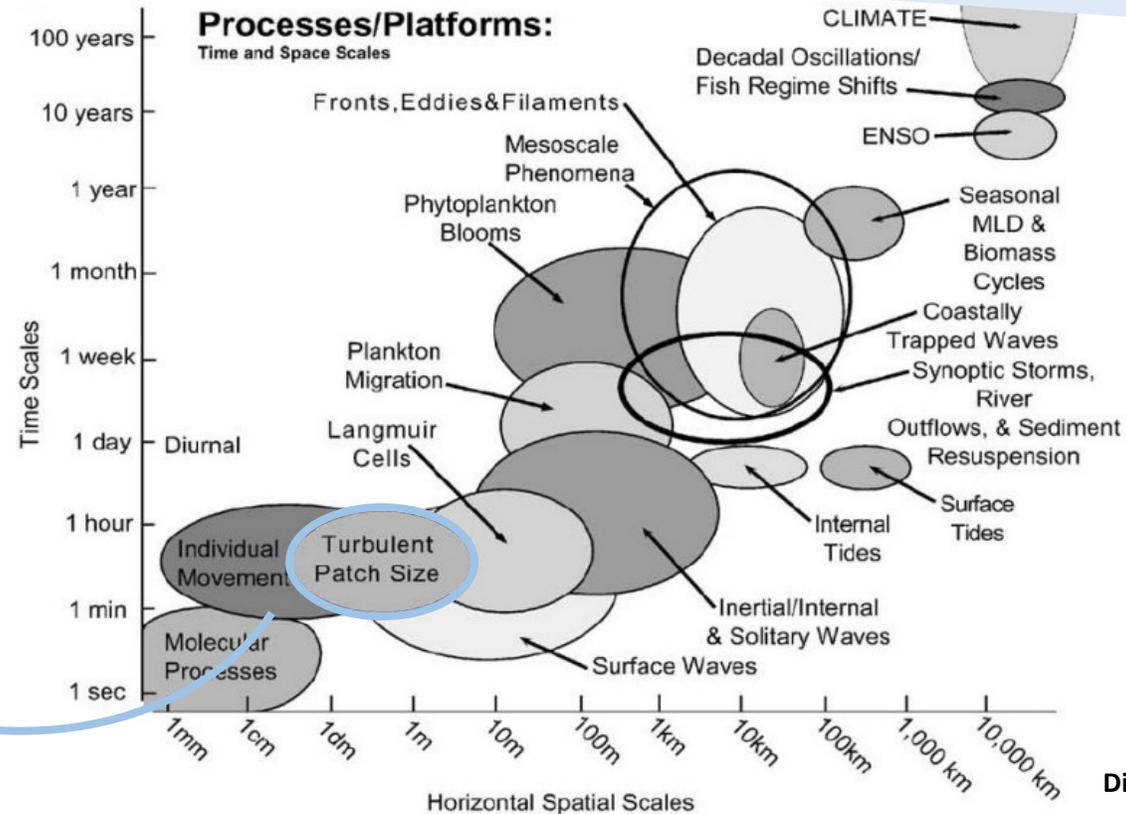
MICRO-

PLANETAIRE

Turbulence



L. DaVinci (1510 – 1512)



Circulation générale



Franklin-Folder (1768 – 1775)

Dickey (2003)

Introduction

Mesures in situ ADCP

Estimations indirectes

Mesures in situ VVP

BIOSWOT-Med : un aboutissement récent

Conclusions et perspectives

Dynamique océanique

État de l'art sur la mesure des vitesses verticales

Limites de la mesure directe in situ

Questionnement scientifique

Objectifs et stratégies des travaux

Campagne FUMSECK

Dynamique océanique

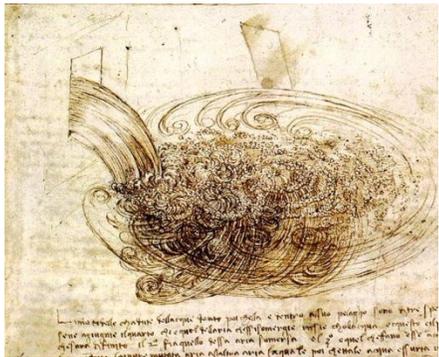
Différentes échelles spatio-temporelles

Nombreux processus physiques et biologiques

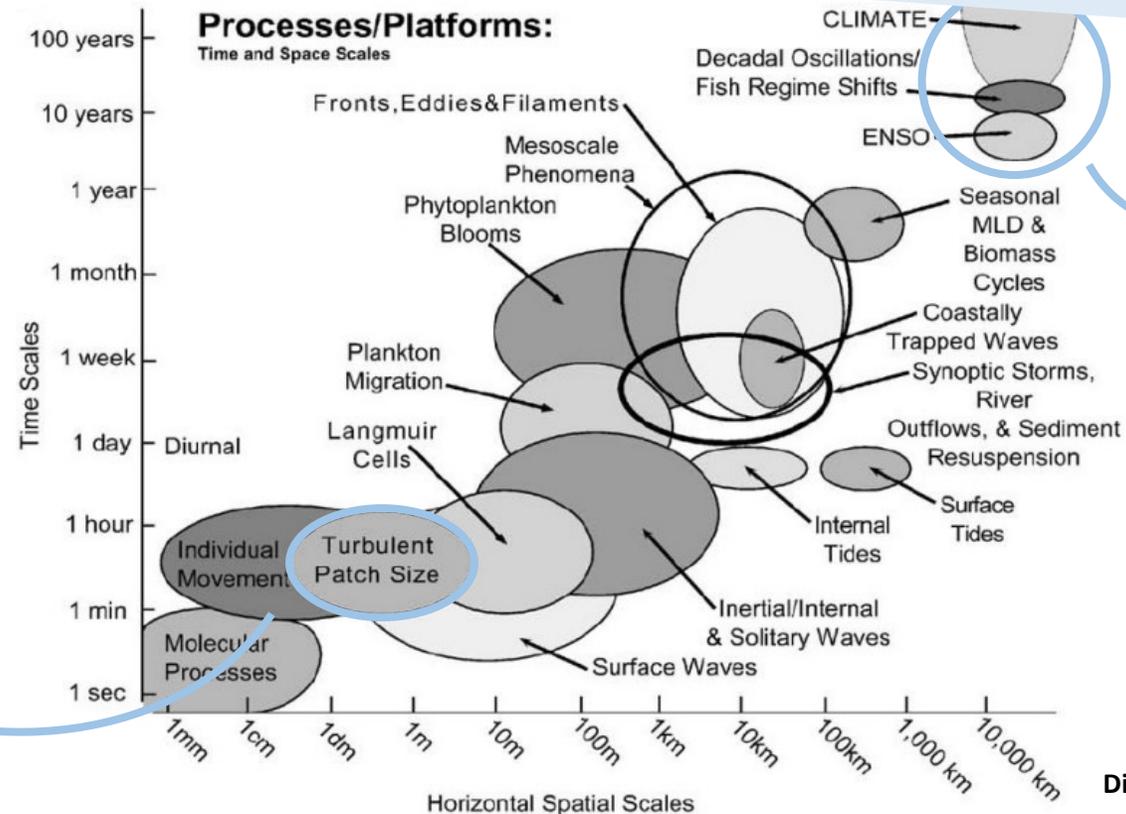
PLANETAIRE

MICRO-

Turbulence



L. DaVinci (1510 – 1512)



Circulation générale



Franklin-Folder (1768 – 1775)

Dickey (2003)

Introduction

Mesures in situ ADCP

Estimations indirectes

Mesures in situ VVP

BIOSWOT-Med : un aboutissement récent

Conclusions et perspectives

Dynamique océanique

État de l'art sur la mesure des vitesses verticales

Limites de la mesure directe in situ

Questionnement scientifique

Objectifs et stratégies des travaux

Campagne FUMSECK

MICRO-

SUBMESO-

MESO-

PLANETAIRE

jour – semaines ... mois
10 m – 10 km ... 100 km

Tourbillons, filaments, fronts

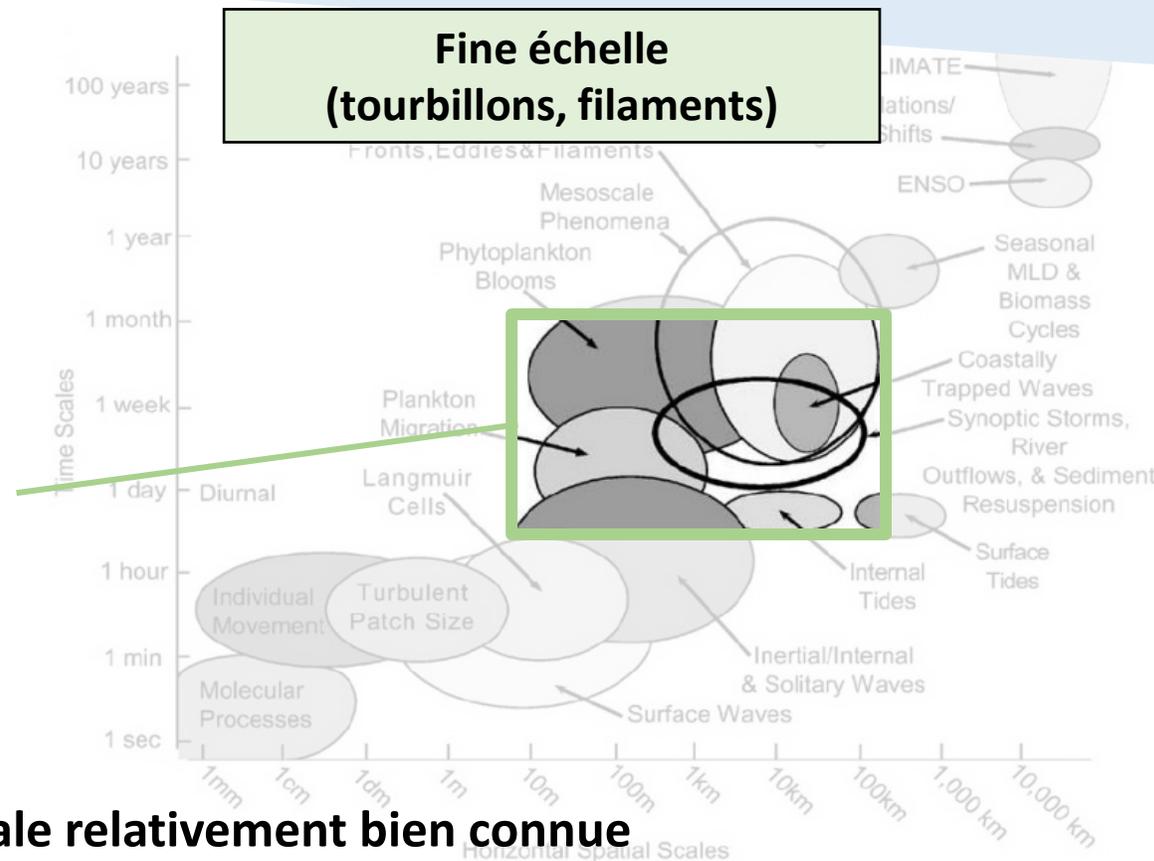
Ondes internes

Outflows rivières et bassins

re-suspension sédimentaire

Migration planctonique

Bloom phytoplanctonique



Rôle clé dans l'équilibre océanique global impliquant une dynamique agéostrophique et tri-dimensionnelle

Dynamique horizontale relativement bien connue

Introduction

Mesures in situ ADCP

Estimations indirectes

Mesures in situ VVP

BIOSWOT-Med : un aboutissement récent

Conclusions et perspectives

Dynamique océanique

État de l'art sur la mesure des vitesses verticales

Limites de la mesure directe in situ

Questionnement scientifique

Objectifs et stratégies des travaux

Campagne FUMSECK

MICRO-

SUBMESO-

MESO-

PLANETAIRE

jour – semaines ... mois
10 m – 10 km ... 100 km

Tourbillons, filaments, fronts

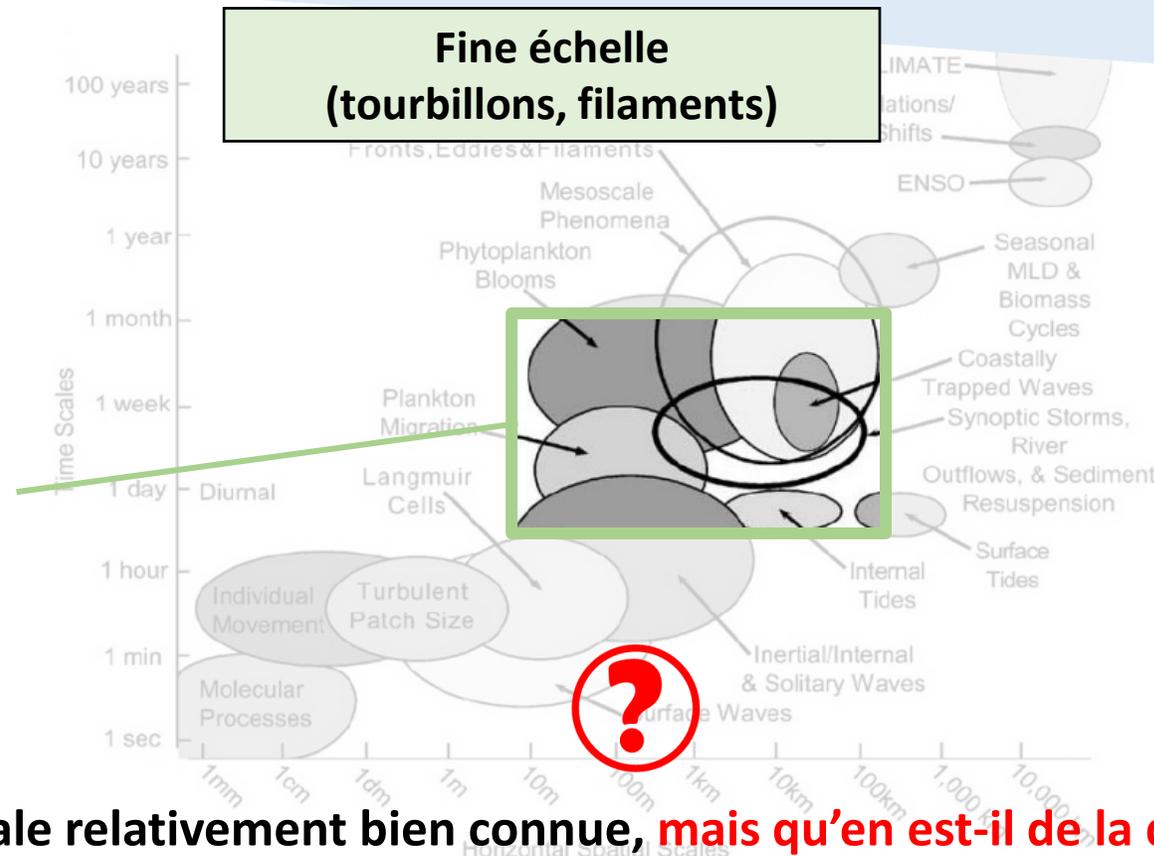
Ondes internes

Outflows rivières et bassins

re-suspension sédimentaire

Migration planctonique

Bloom phytoplanctonique



Rôle clé dans l'équilibre océanique global impliquant une dynamique agéostrophique et tri-dimensionnelle

Dynamique horizontale relativement bien connue, mais qu'en est-il de la dynamique verticale ?

- **Vitesses horizontales** : mesure fiable, précise, répandue, nombreuses méthodes
- Très peu de mesure des **vitesses verticales** : absence de technique de mesure directe in situ précise

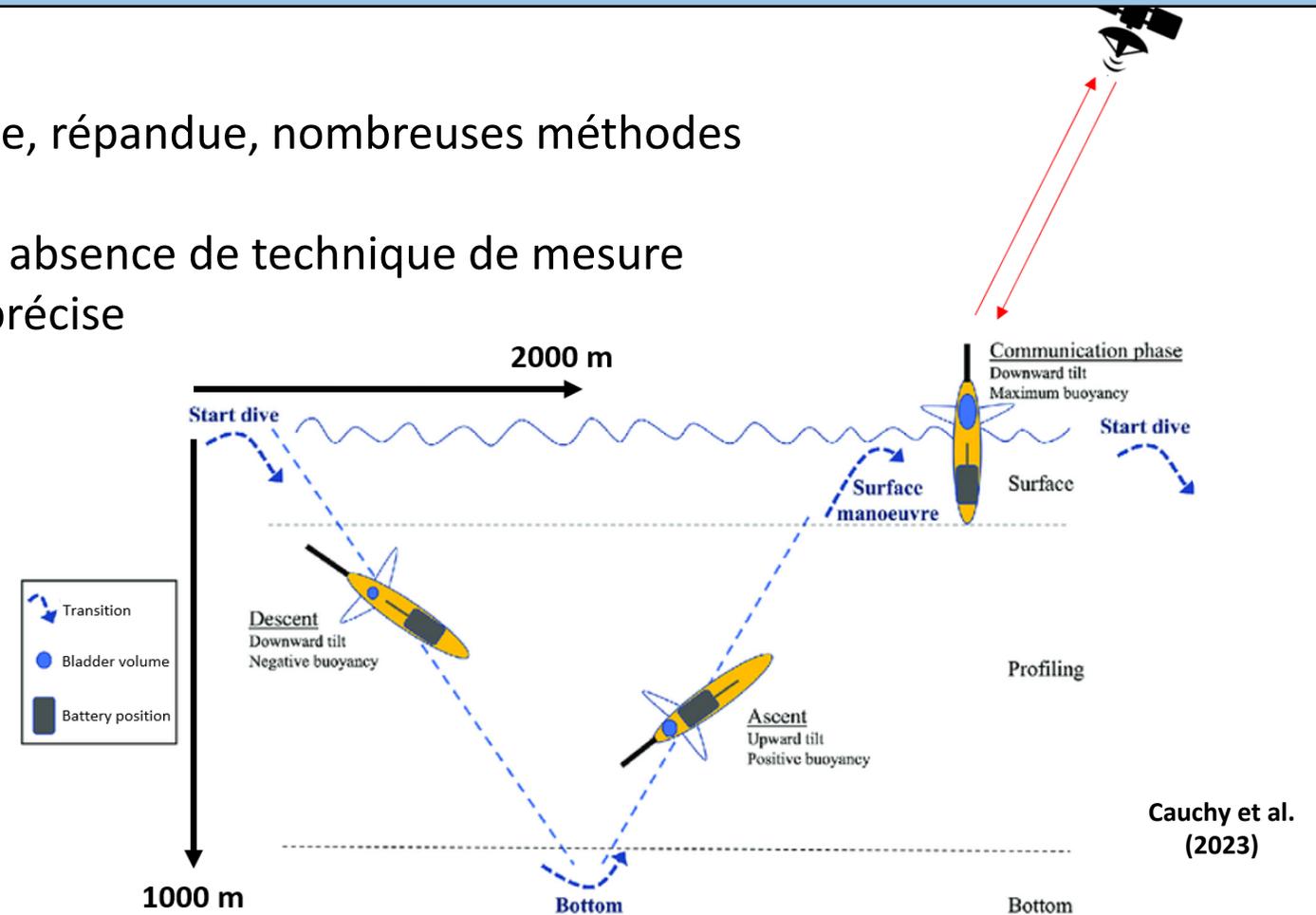
Études classiques des vitesses verticales :

- Modélisation numérique
- Approximation $w = 0$ m/s
- Estimation indirecte : équation- ω
- Méthodes de flottabilité : glider

- **Vitesses horizontales** : mesure fiable, précise, répandue, nombreuses méthodes
- Très peu de mesure des **vitesses verticales** : absence de technique de mesure directe in situ précise

Études classiques des vitesses verticales :

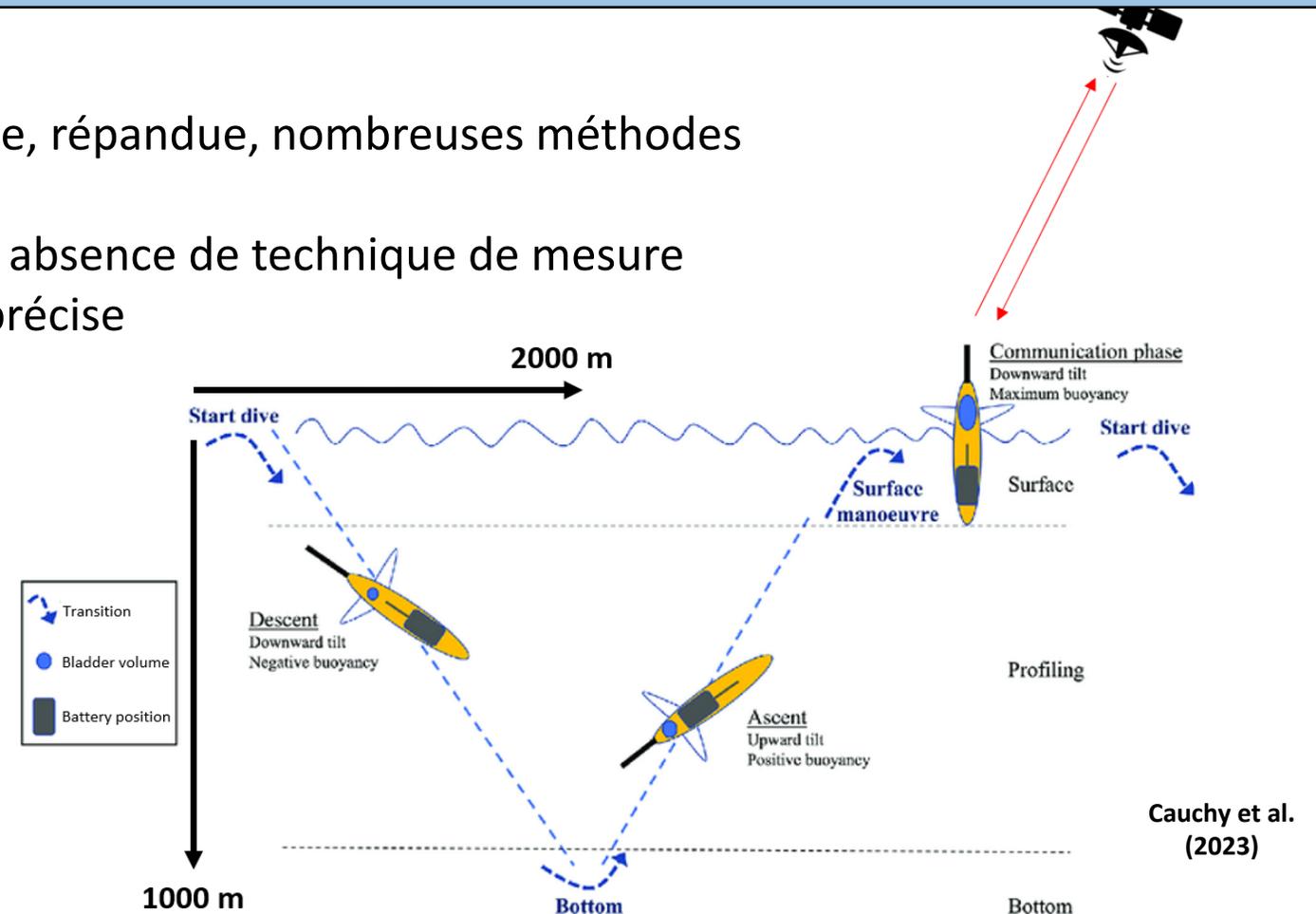
- Modélisation numérique
- Approximation $w = 0$ m/s
- Estimation indirecte : équation- w
- Méthodes de flottabilité : **glider**



- **Vitesses horizontales** : mesure fiable, précise, répandue, nombreuses méthodes
- Très peu de mesure des **vitesses verticales** : absence de technique de mesure directe in situ précise

Études classiques des vitesses verticales :

- Modélisation numérique
- Approximation $w = 0$ m/s
- Estimation indirecte : équation- w
- Méthodes de flottabilité : **glider**



Pourquoi cette absence de mesure directe in situ de la composante verticale océanique ?

1. Ordres de grandeurs : $w \ll u, v$

composante verticale $\sim < \text{mm/s} - \text{cm/s}$ composantes horizontales $\sim 10 \text{ cm/s}$

2. Nature éphémère des structures de fine échelle

Durée de vie courte, détection satellite en temps réel, mais présence de w généralement plus intenses dans ces structures qu'aux échelles plus grandes

3. Challenge technologique

Méthodologies en cours de développement (NO/platformes...)



Difficultés d'estimations *in situ*

- **Comment et avec quelle précision mesurer in situ les courants marins verticaux pour la compréhension de la dynamique océanique à haute fréquence spatio-temporelle ?**
- **Comment mieux comprendre la dynamique de fine échelle dans sa globalité ?
Quelles sont les implications de ces vitesses verticales de fine échelle pour la biologie ?**
- **Quelle(s) approches(s) envisager ? Pour l'étude de quelle(s) dynamique(s) ?**

Objectifs et stratégies suivis durant la thèse :

1. Optimiser les techniques/instruments à disposition pour la mesure directe in situ des vitesses verticales
2. Quels liens entre nos méthodes de mesures directes et les méthodes d'estimations indirectes
3. Développement d'une nouvelle technique basée sur la mise en place d'un prototype innovant (VVP)
4. Au final, quelles approches choisir et dans quelles situations ?

Campagnes océanographiques

FUMSECK

2019

PROTEVS-Gascogne

2022

BIOSWOT-Med

2023

Campagne FUMSECK

30 avril – 07 mai 2019

Mer Ligure , N/O *Téthys II*

Zone d'étude : OSCAHR 2015

➤ Données diversifiées

Stations

- ADCP bathysonde
- ADCP chute libre (courantologie)
- Sondes CTD (hydrologie)

Transects

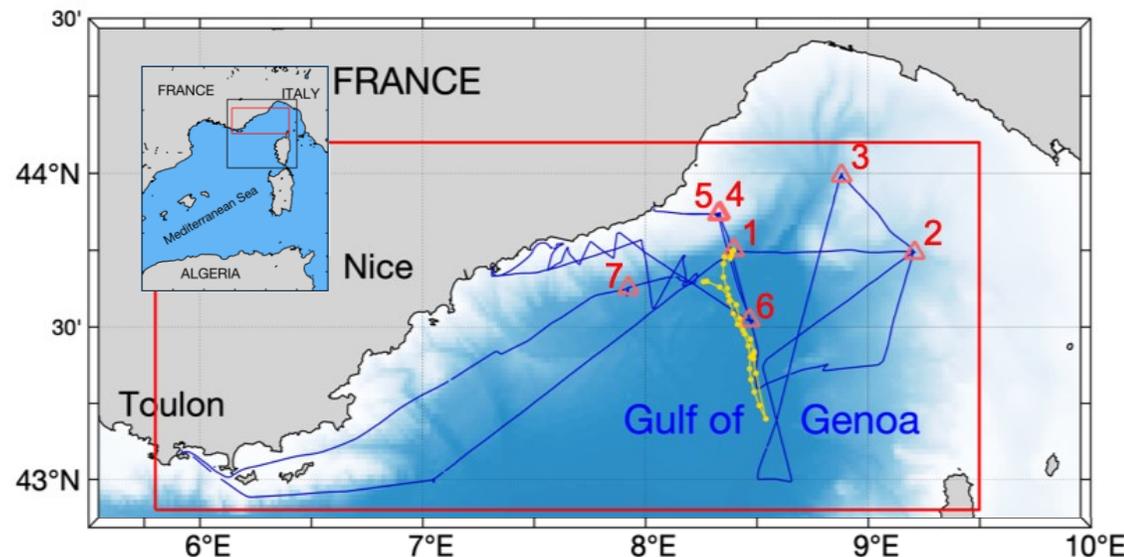
- ADCP de coque (courantologie)
- MVP, TSG (hydrologie)
- Glider
- Cytométrie

Satellite

- Température
- Chlorophylle a
- Hauteur de la surface libre
- Champs de courants géostrophiques
- Diagnostics Lagrangiens

Couplage données de modélisation numérique

SYMPHONIE – Eco3M-S



Introduction

Mesures in situ ADCP

Estimations indirectes

Mesures in situ VVP

BIOSWOT-Med : un aboutissement récent

Conclusions et perspectives

Dynamique océanique

État de l'art sur la mesure des vitesses verticales

Limites de la mesure directe in situ

Questionnement scientifique

Objectifs et stratégie des travaux

Campagne FUMSECK

Campagne FUMSECK

30 avril – 07 mai 2019

Mer Ligure, N/O *Téthys II*

Zone d'étude : OSCAHR 2015

➤ Données diversifiées

Stations

- **ADCP bathysonde**
- **ADCP chute libre**
(courantologie)
- Sondes **CTD** (hydrologie)

Part. I

Transects

- **ADCP de coque** (courantologie)
- **MVP**, TSG (hydrologie)
- Glider
- Cytométrie

Part. II.1

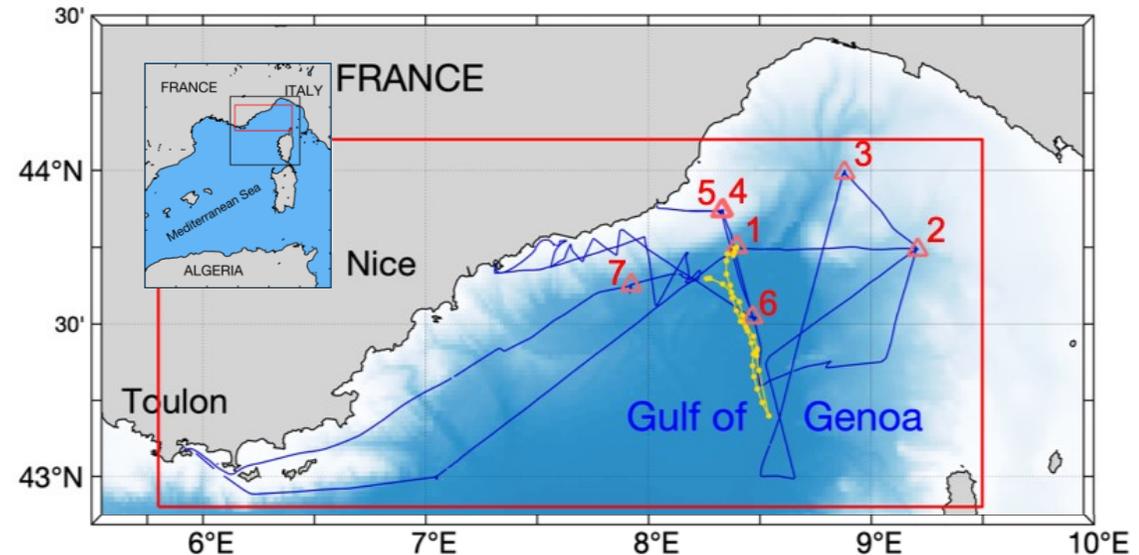
Satellite

- Température
- Chlorophylle a
- Hauteur de la surface libre
- Champs de courants géostrophiques
- Diagnostics Lagrangiens

Part. II.2

**Couplage données
de modélisation
numérique**

SYMPHONIE – Eco3M-S



Introduction

Dynamique océanique

Vitesses verticales état de l'art et stratégies de recherche

Campagne océanographique support : FUMSECK

Résultats des travaux de recherche

I. Mesures in situ ADCP

II.1 Estimation indirecte : équation- ω

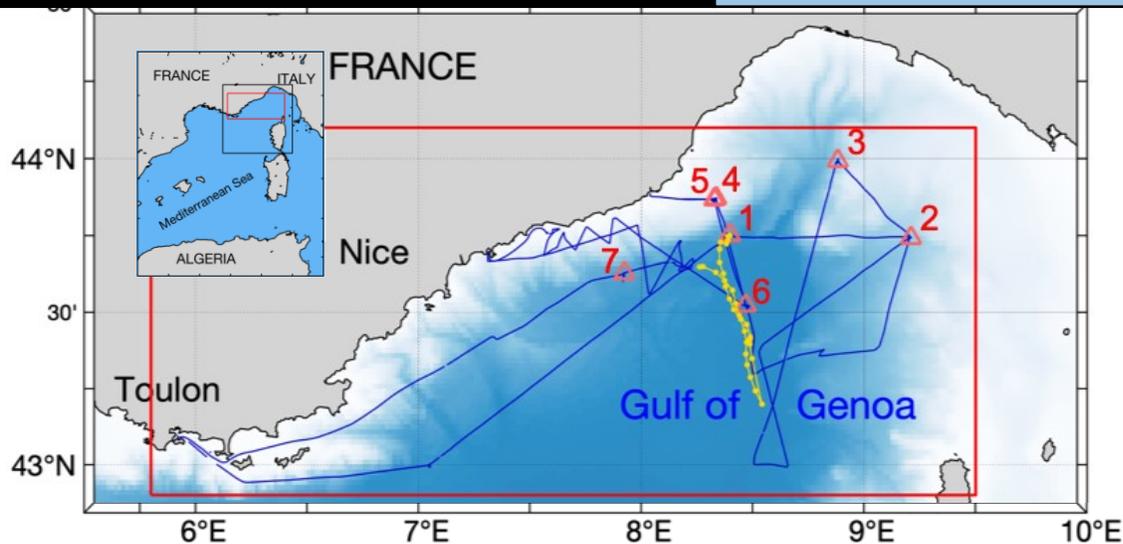
II.2 Estimation indirecte : modèle SYMPHONIE

III. Mesure in situ VVP

IV. BIOSWOT-Med : aboutissement récent

Conclusion et perspectives

Synthèse personnelle



Sampling conditions: FUMSECK 2019 cruise

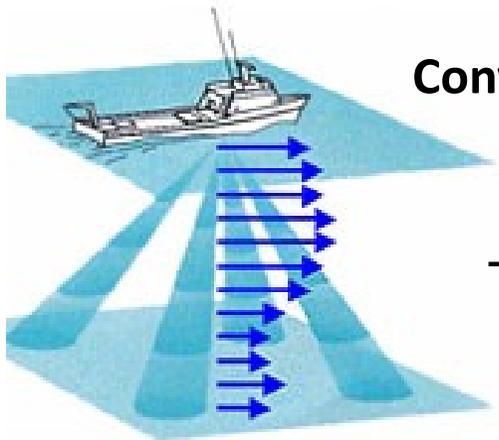
6 stations "vitesses verticales"

4 jours d'échantillonnage 01/05/2019 – 04/05/2019

Instruments de mesure ADCPs and CTD probes

ADCP – Acoustic Doppler Current Profiler

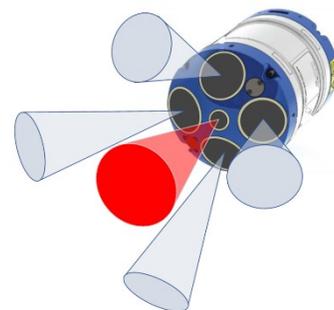
Utilisations : coque, bathysonde, mouillage



Conventionnels: 4 faisceaux

→ Mesure classique de u , v ,
et estimation de w

Nouvelle génération: Sentinel V50 (Teledyne RDI)

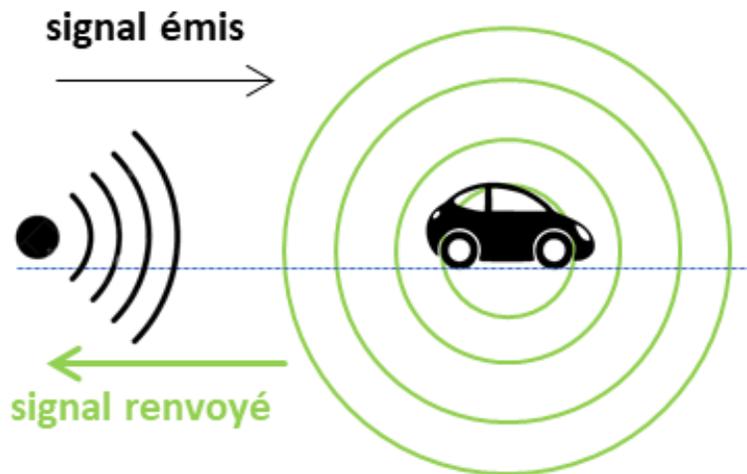


Présence d'un 5^{ème} faisceau
 → Estimation directe de w

Vitesses des courants marins : mesures sur plateforme

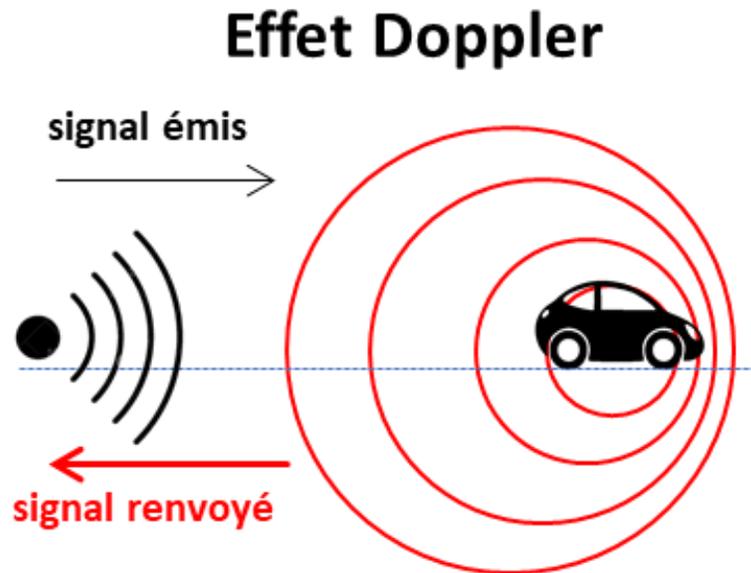
Principe de mesure basée sur l'utilisation d'**ondes sonores** et de l'**effet Doppler** (radars routiers)

Effet Doppler



Vitesses des courants marins : mesures sur plateforme

Principe de mesure basée sur l'utilisation d'**ondes sonores** et de l'**effet Doppler** (radars routiers)

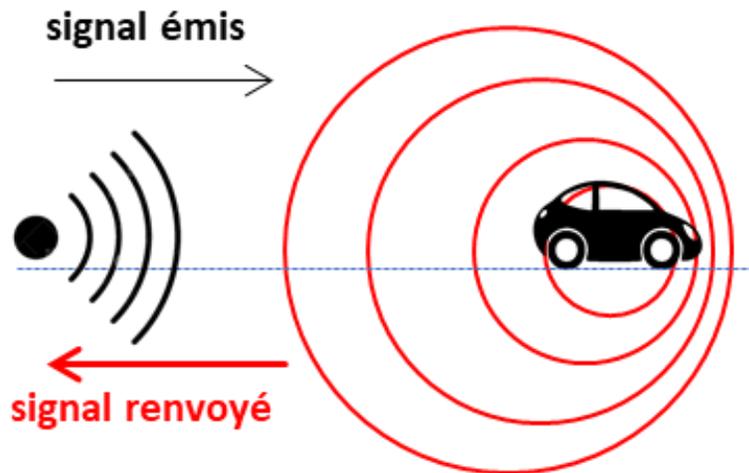


Variation du signal acoustique → cible en mouvement

Vitesses des courants marins : mesures sur plateforme

Principe de mesure basée sur l'utilisation d'**ondes sonores** et de l'**effet Doppler** (radars routiers)

Effet Doppler



... dans l'océan

Radar → ADCP

Véhicule → Particule marine

Nécessite la présence de particules transportées passivement par les courants marins

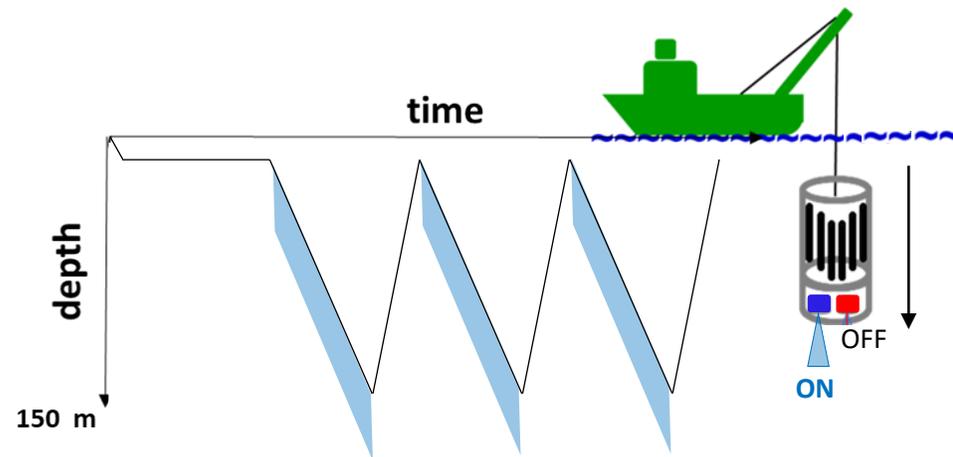
Variation du signal acoustique → cible en mouvement

L-ADCP

L-Sentinel

FF-ADCP

ADCP 4-faisceaux classique bathysonde



Cable électro-porteur → force de rappel très importante

* Tous les ADCPs sont associés à une sonde CTD

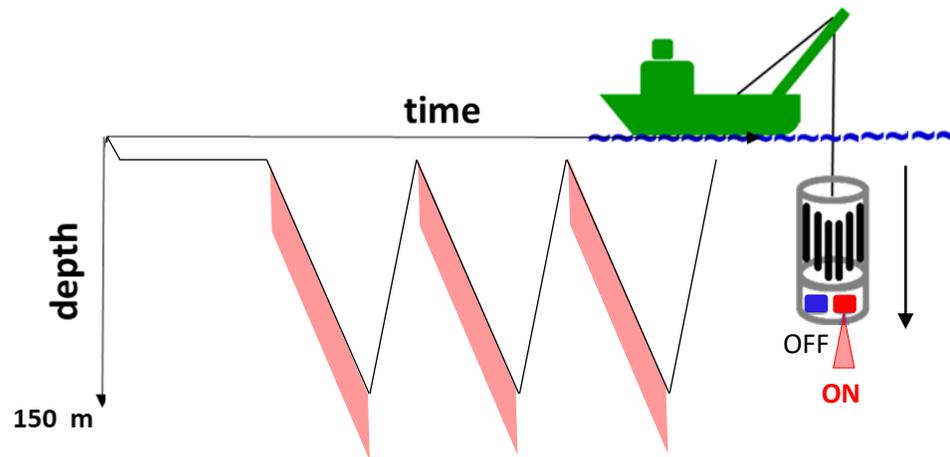
L-ADCP

ADCP 4-faisceaux classique
bathysonde

L-Sentinel

ADCP 5-faisceaux nouvelle gén.
bathysonde

FF-ADCP

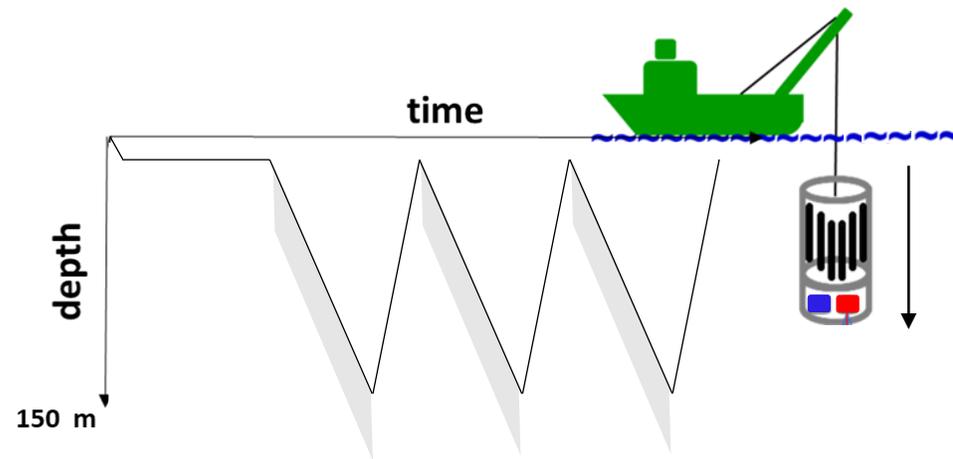


Cable électro-porteur → force de rappel très importante

* Tous les ADCPs sont associés à une sonde CTD

L-ADCP

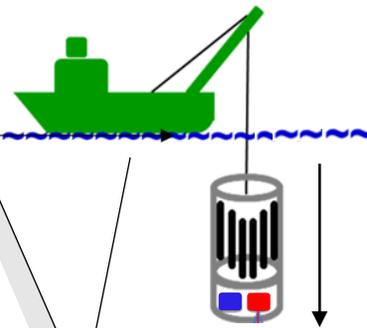
ADCP 4-faisceaux classique
bathysonde



Cable électro-porteur → force de rappel très importante

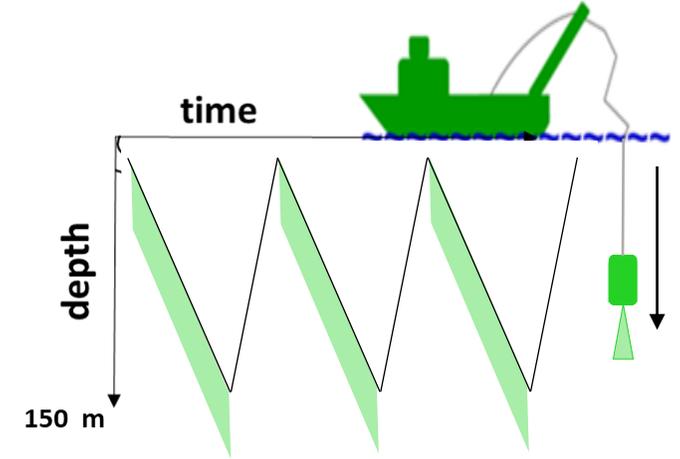
L-Sentinel

ADCP 5-faisceaux nouvelle gén.
bathysonde



FF-ADCP

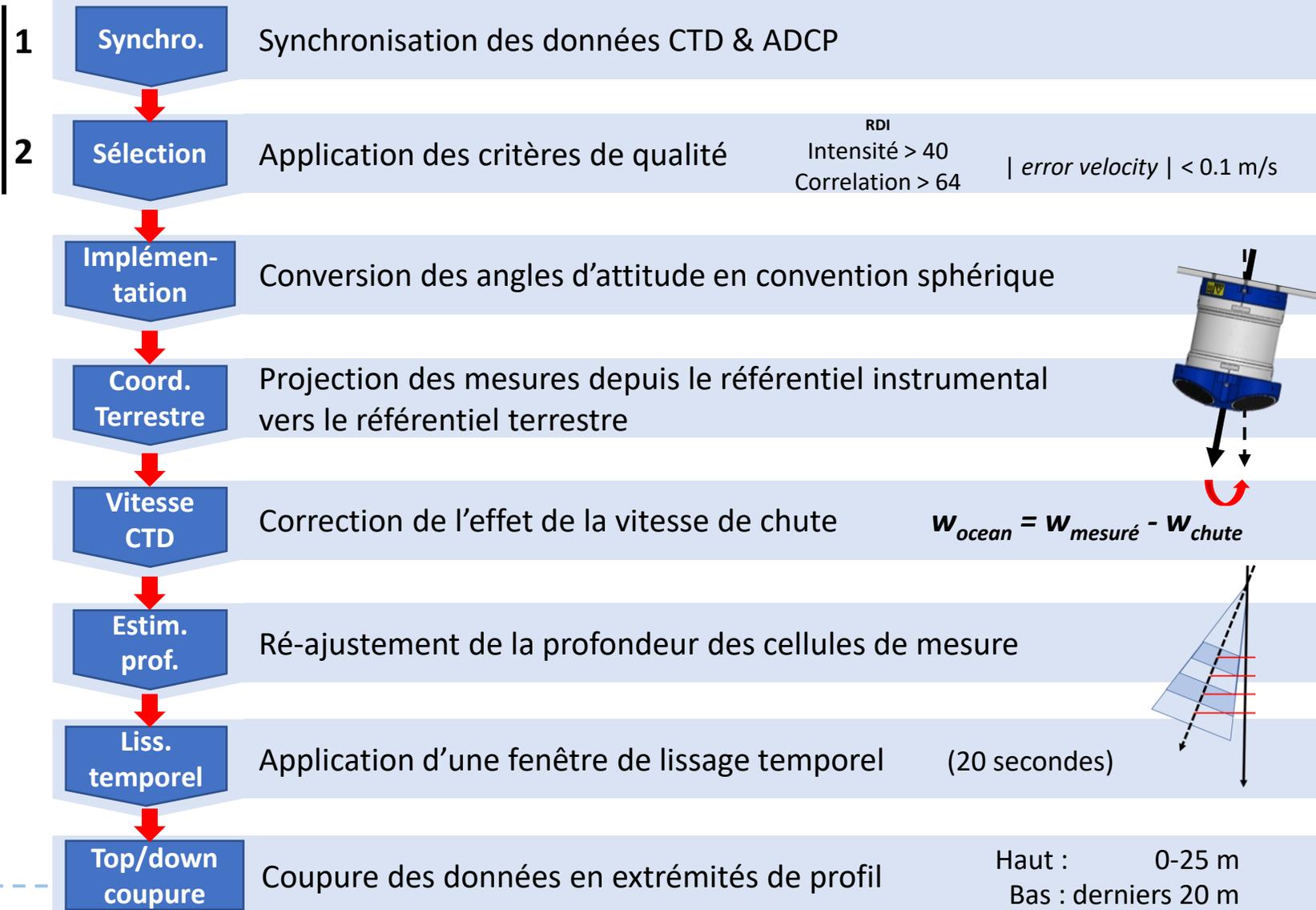
ADCP 4-faisceaux classique
chute libre



Cordage flottant → peu de rappel

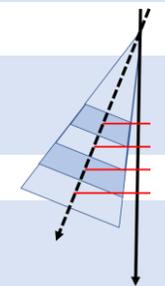
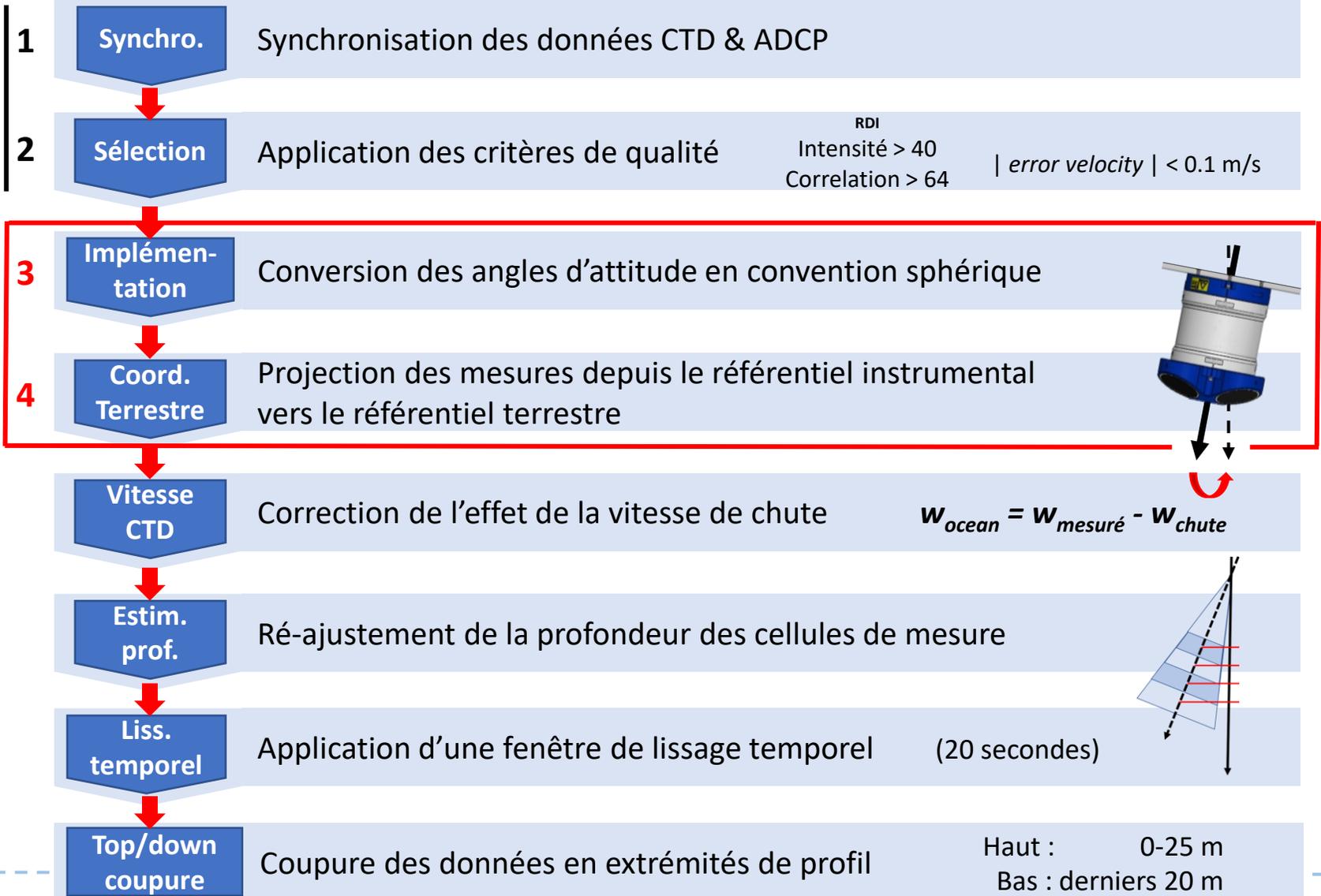
* Tous les ADCPs sont associés à une sonde CTD

Préparation des jeux de données

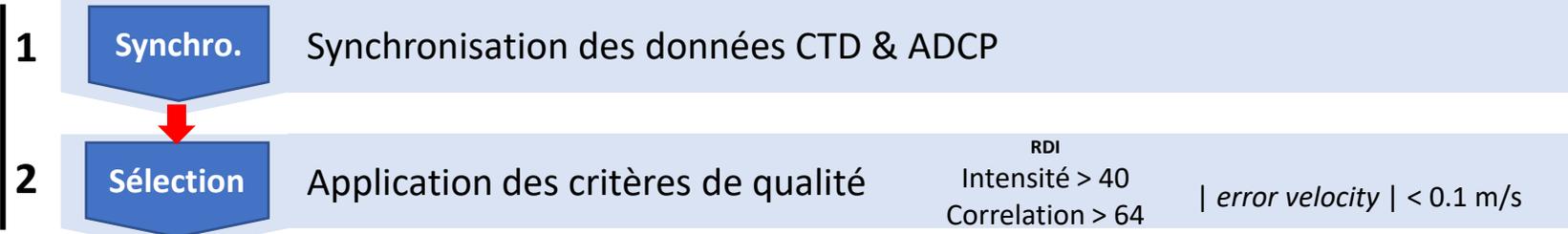


Préparation des jeux de données

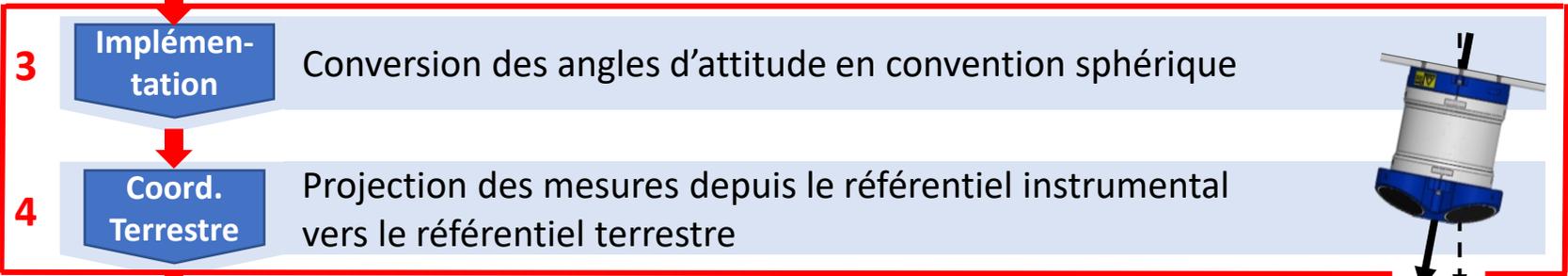
Changement de référentiel
 Spécifique aux mesures
 par 5^{ème} faisceau



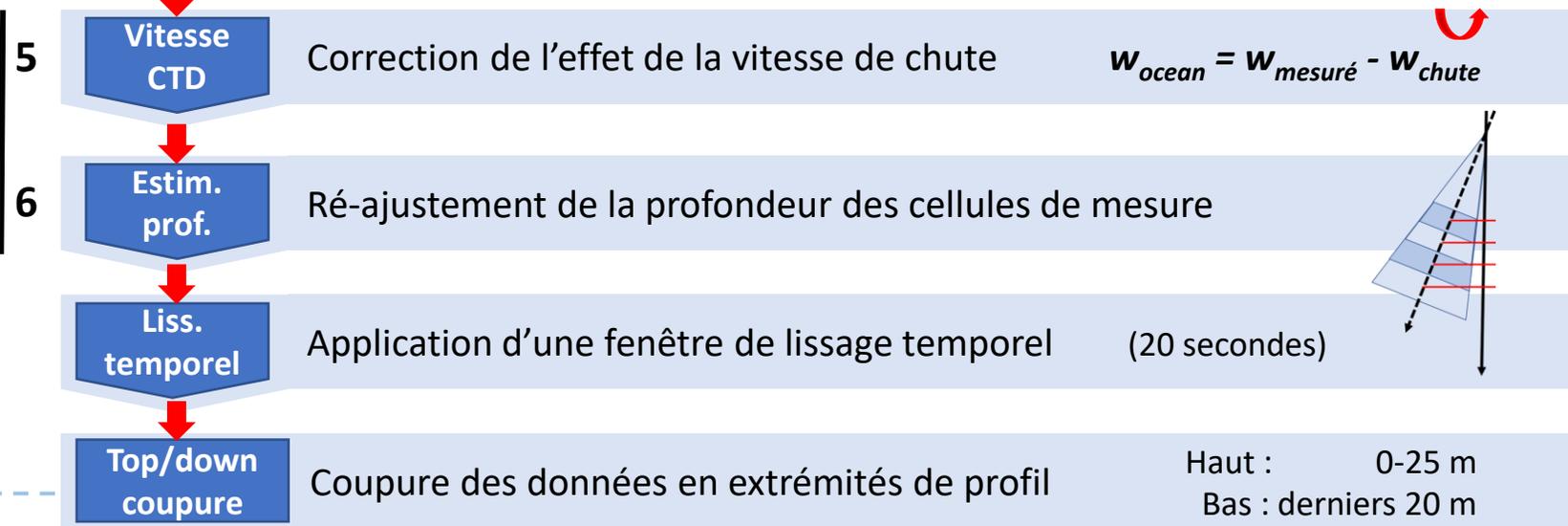
Préparation des jeux de données



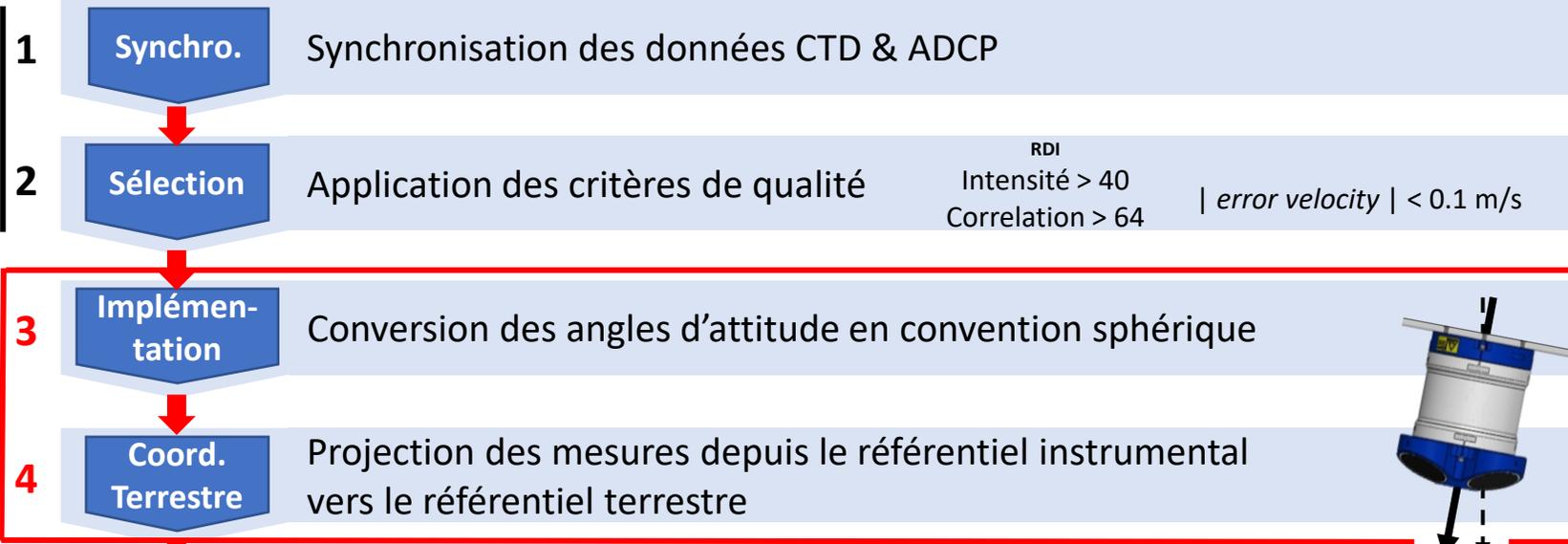
Changement de référentiel
Spécifique aux mesures
par 5^{ème} faisceau



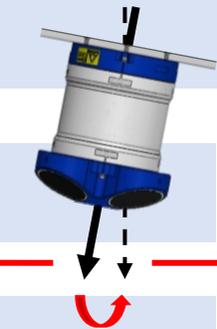
Construction des profils verticaux



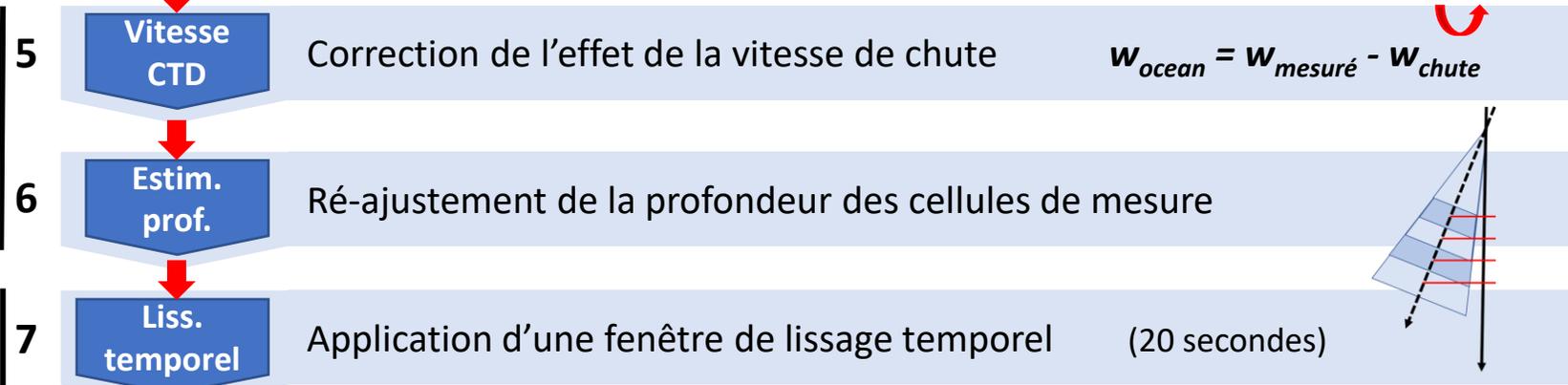
Préparation des jeux de données



Changement de référentiel
 Spécifique aux mesures
 par 5^{ème} faisceau

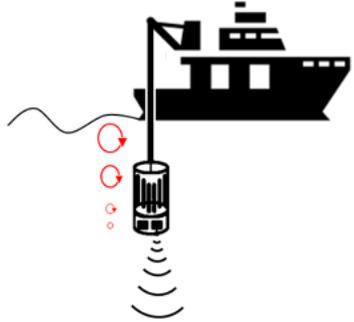


Construction des profils verticaux



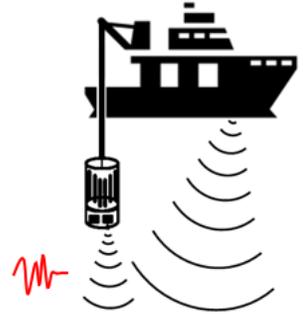
Traitement statistique





- Avec la surface : **effet de houle, courants orbitaux ...**
- ✓ **Downward looking, pas de mesures entre 0 – 25 m**

- Avec les ADCPs de coque / sonar : **interférences des ondes acoustiques**
- ✓ **Identification et élimination des zones d'interférences**



- Avec les organismes marins
- ✓ **Mesures diurnes → évite les migrations nyctémérales**
Paramètres de corrélation et d'intensité d'écho → suppression des signaux erronés

→ **Interférences sur la mesure de w identifiables et corrigeables**

→ écart-types observés $O(10^{-3} - 10^{-2})$ m/s

Incertitudes instrumentales

- Tests de propagations d'erreur : génération de bruits artificiels propagés sur les composantes **u, v, w**, sur les **angles d'inclinaison** de l'ADCP et des dalles acoustiques, sur la **pression**
génération de **5×10^4 data par test** pour **45 configurations testées** ⇒ volume de données générées \approx **2×10^6 data**

→ écart-types observés $O(10^{-3} - 10^{-2})$ m/s

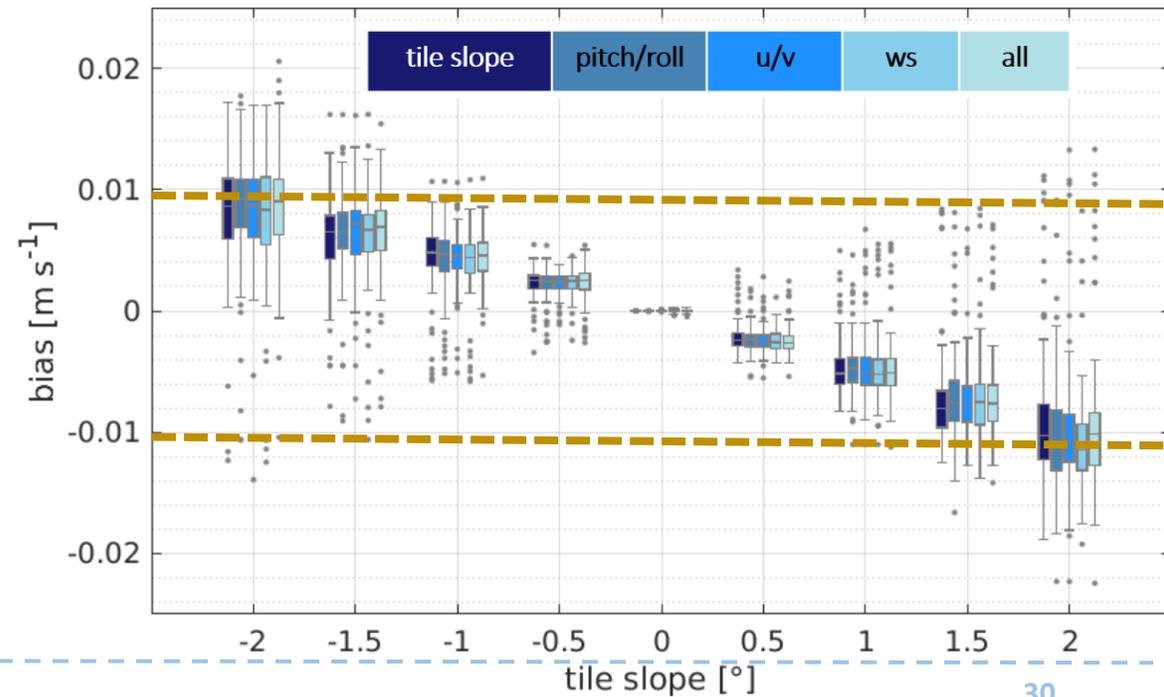
Incertitudes instrumentales

- Tests de propagations d'erreur : génération de bruits artificiels propagés sur les composantes **u, v, w**, sur les **angles d'inclinaison** de l'ADCP et des dalles acoustiques, sur la **pression**

génération de 5×10^4 data par test pour 45 configurations testées → volume de données générées $\approx 2 \times 10^6$ data Comby et al. 2022 JAOT

- **Angle de la dalle acoustique / inclinaison**
principale source d'erreur

$\pm 1^\circ \Rightarrow \pm 1$ cm/s



→ écart-types observés $O(10^{-3} - 10^{-2})$ m/s

Incertitudes instrumentales

- Tests de propagations d'erreur : génération de bruits artificiels propagés sur les composantes **u, v, w**, sur les **angles d'inclinaison** de l'ADCP et des dalles acoustiques, sur la **pression**

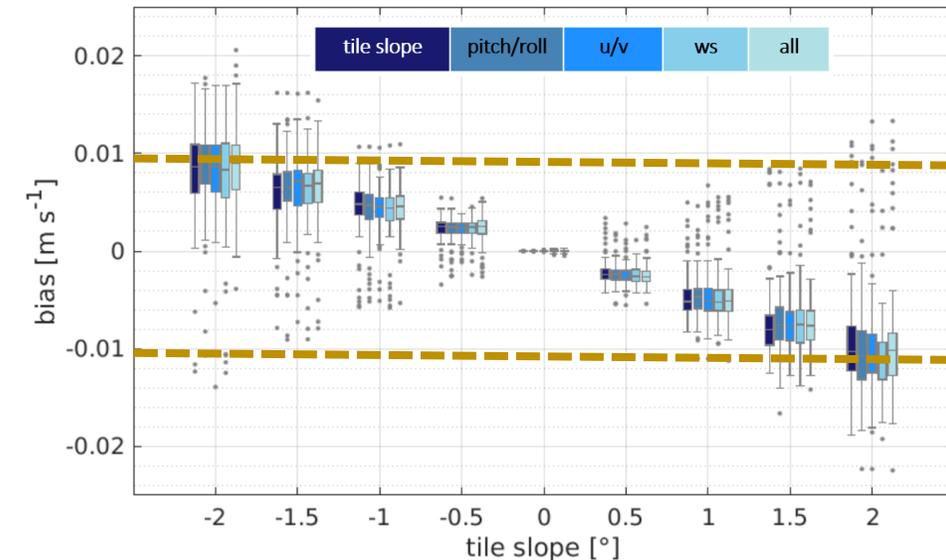
génération de 5×10^4 data par test pour 45 configurations testées → volume de données générées $\approx 2 \times 10^6$ data Comby et al. 2022 JAOT

- **Angle de la dalle acoustique / inclinaison**
principale source d'erreur

$$\pm 1^\circ \Rightarrow \pm 1 \text{ cm/s}$$

- **Précision du capteur de pression** propagation d'une incertitude dans l'estimation du mouvement vertical de l'ADCP (dérivée de la pression)

$$\pm 0.1 - 10 \text{ cm (fonction de la résistance à la pression)} \Rightarrow \pm 10^{-2} \text{ to } 1 \text{ cm/s}$$



→ écart-types observés $O(10^{-3} - 10^{-2})$ m/s

Incertitudes instrumentales

- Tests de propagations d'erreur : génération de bruits artificiels propagés sur les composantes **u, v, w**, sur les **angles d'inclinaison** de l'ADCP et des dalles acoustiques, sur la **pression**

- **Angle de la dalle acoustique / inclinaison** principale source d'erreur

$$\pm 1^\circ \Rightarrow \pm 1 \text{ cm/s}$$

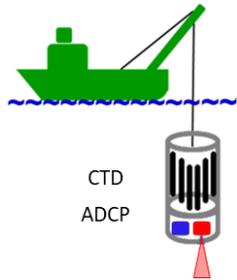
- **Précision du capteur de pression** propagation d'une incertitude dans l'estimation du mouvement vertical de l'ADCP (dérivée de la pression)

$$\pm 0.1 - 10 \text{ cm (fonction de la résistance à la pression)} \Rightarrow \pm 10^{-2} \text{ to } 1 \text{ cm/s}$$

Variabilité environnementale

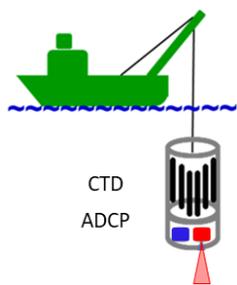
- Variations **spatio-temporelles** ne doivent pas être négligées, ++ dans les régions à faible énergie

3 instruments utilisés → 4 mesures de w
L-ADCP, **Sentinel 4 beams**, **Sentinel 5th beam**, **FF-ADCP**

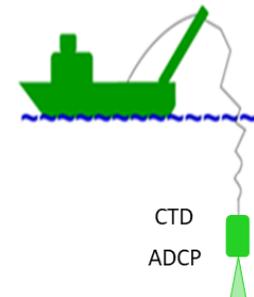


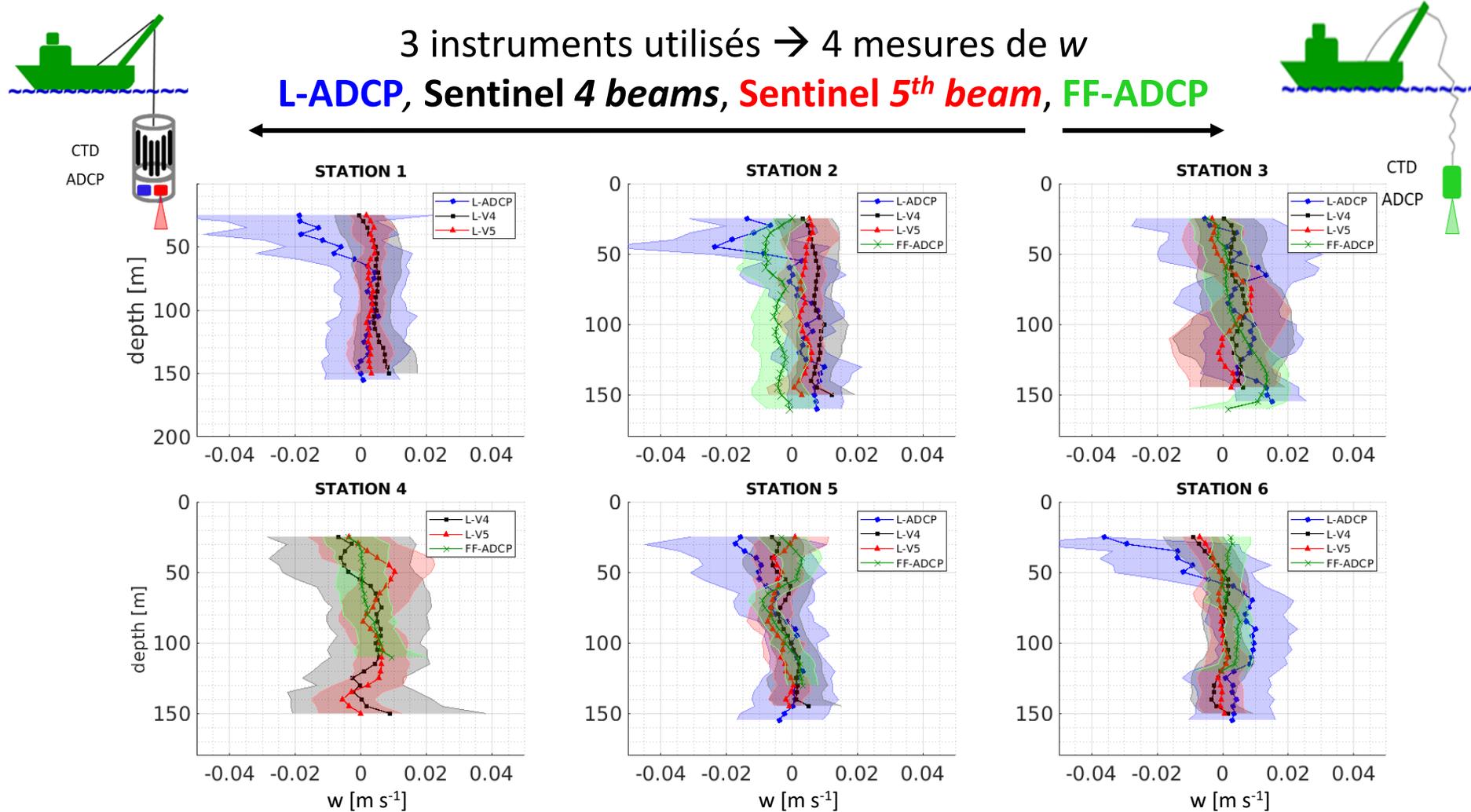
3 instruments utilisés → 4 mesures de w
L-ADCP, **Sentinel 4 beams**, **Sentinel 5th beam**, **FF-ADCP**



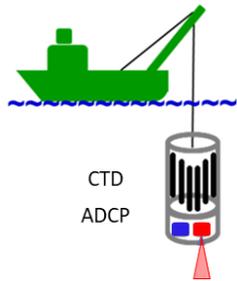


3 instruments utilisés → 4 mesures de w
L-ADCP, **Sentinel 4 beams**, **Sentinel 5th beam**, **FF-ADCP**

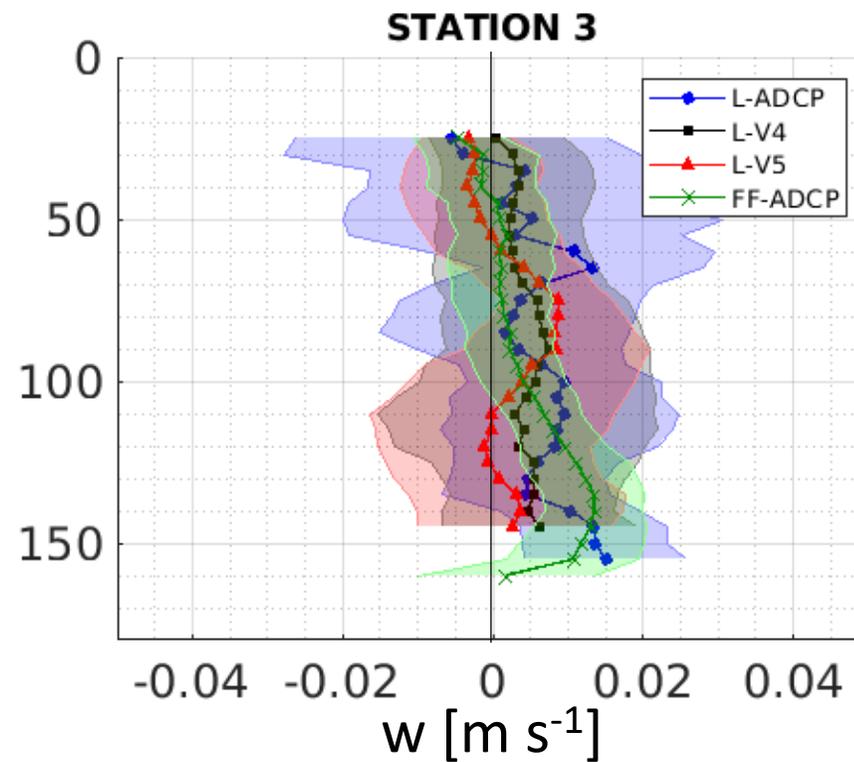
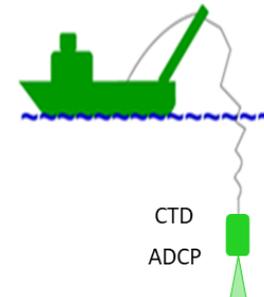


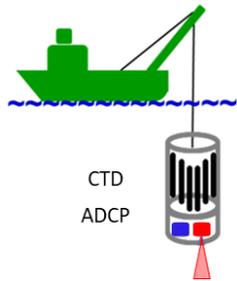


Comby et al. 2022 JAOT

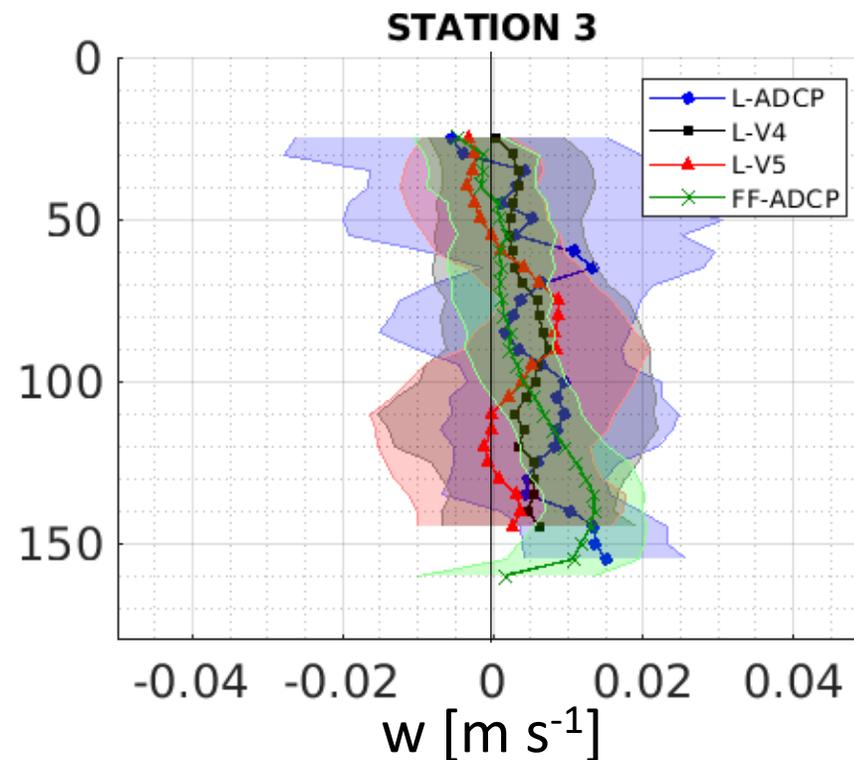
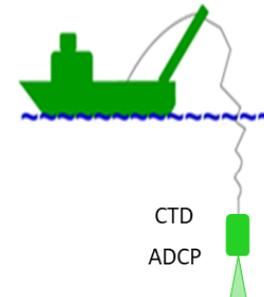


3 instruments utilisés → 4 mesures de w
L-ADCP, Sentinel 4 beams, **Sentinel 5th beam**, **FF-ADCP**

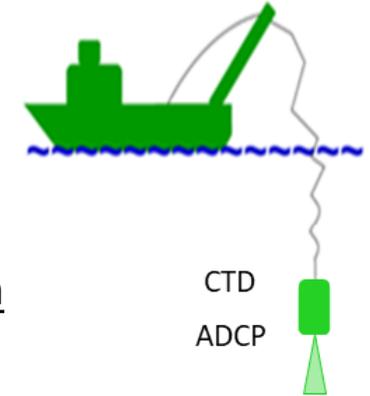
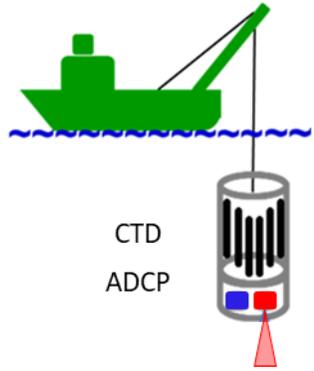




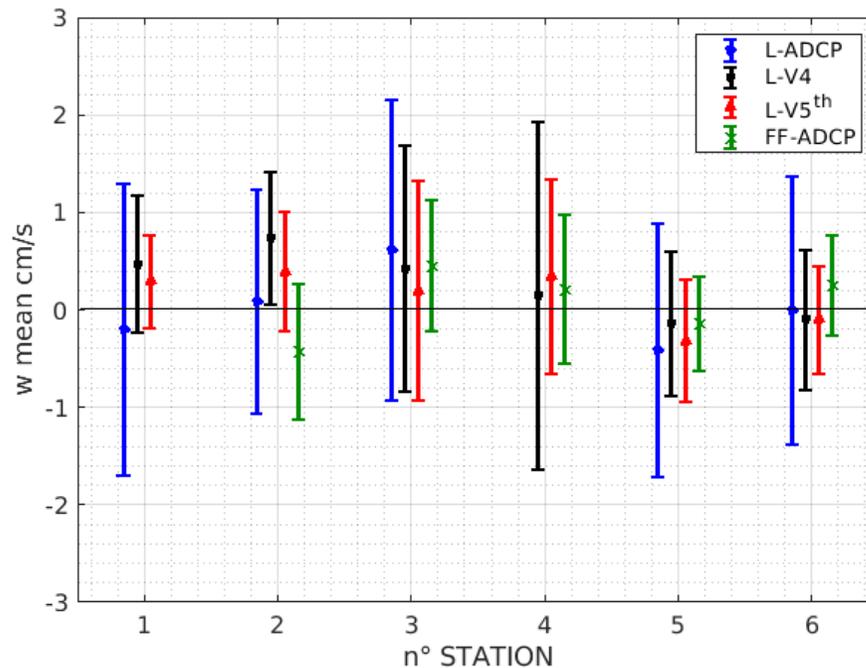
3 instruments utilisés → 4 mesures de w
L-ADCP, Sentinel 4 beams, Sentinel 5th beam, **FF-ADCP**



→ **Compatibilité des différentes méthodes, aucun biais observé**



3 instruments utilisés → 4 mesures de w
L-ADCP, Sentinel 4 beams, Sentinel 5th beam, FF-ADCP

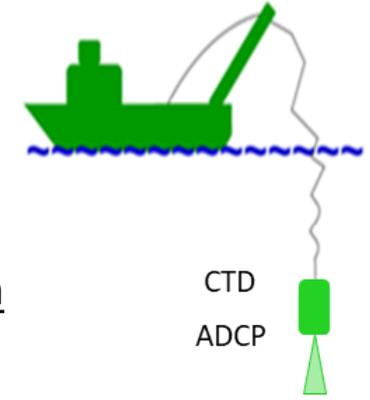
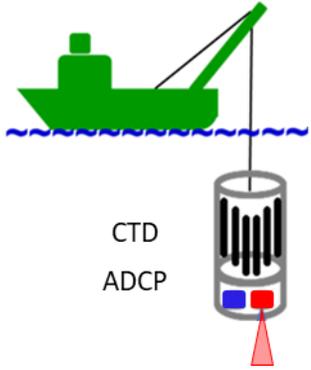


Downcasts data 0 – 150 m

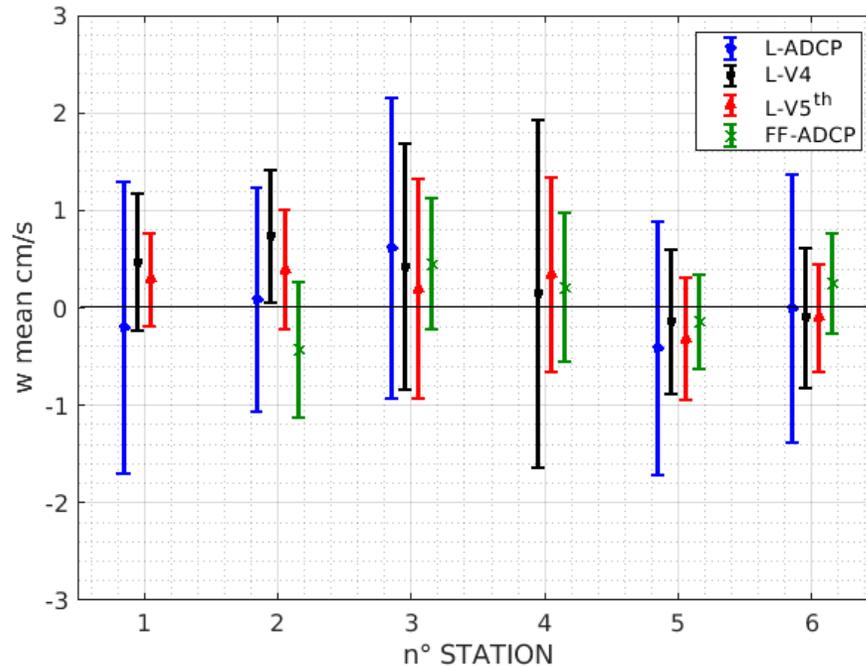
$\mu \sim$ mm/s
 0.02 0.26 0.14 0.6 cm/s

$\sigma \sim$ cm/s
 1.3 1.0 0.7 0.6 cm/s
L-ADCP > L-V4 > L-V5 > FF-ADCP

Précisions optimales :
Sentinel 5th beam & FF-ADCP



3 instruments utilisés → 4 mesures de w
L-ADCP, Sentinel 4 beams, Sentinel 5th beam, FF-ADCP



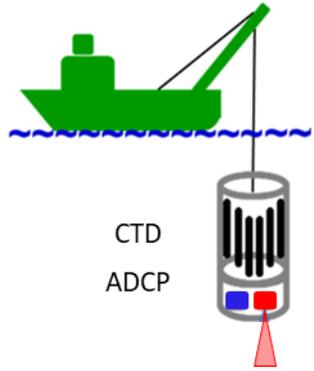
Downcasts data 0 – 150 m

$\mu \sim$ mm/s
 0.02 0.26 0.14 0.6 cm/s

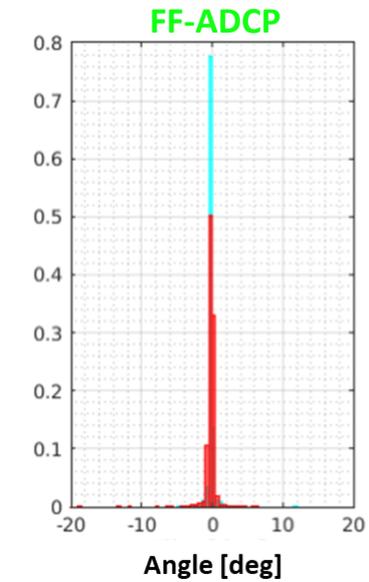
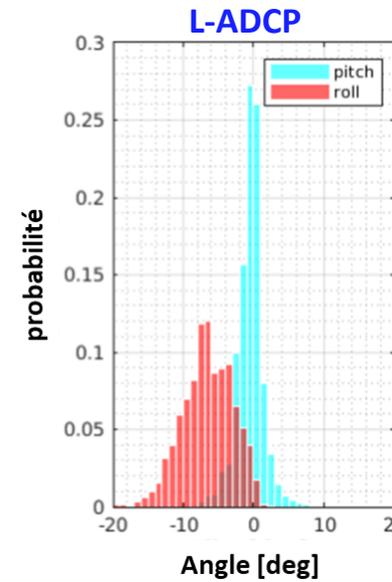
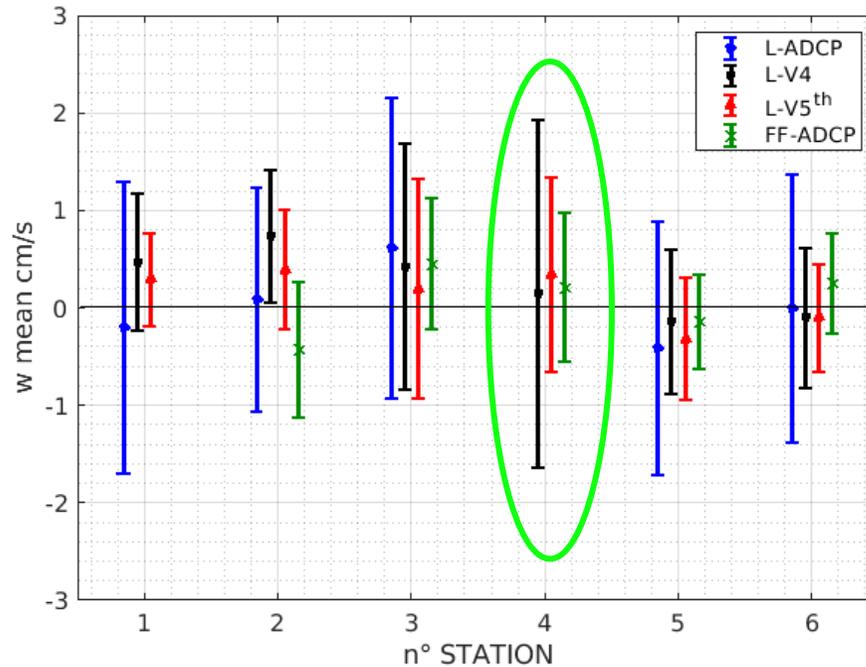
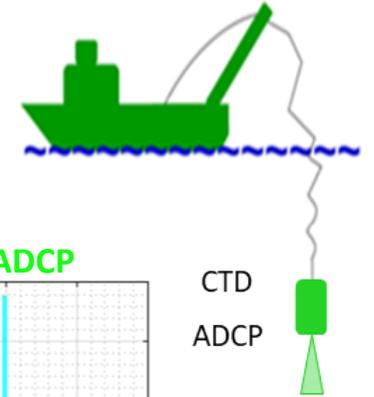
$\sigma \sim$ cm/s
 1.3 1.0 0.7 0.6 cm/s
L-ADCP > L-V4 > L-V5 > FF-ADCP

Précisions optimales :
Sentinel 5th beam & FF-ADCP

1) Sentinel 5th beam plus précis que les ADCP classiques



3 instruments utilisés → 4 mesures de w
L-ADCP, Sentinel 4 beams, Sentinel 5th beam, FF-ADCP



- Sentinel 5th beam** plus précis que les ADCP classiques
- Free-fall** technique : très peu sensible à l'état de mer

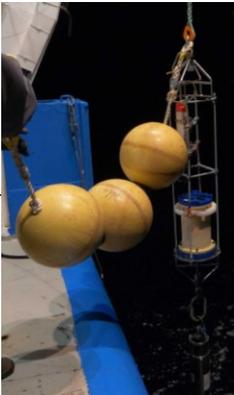
- **Méthode généralisée pour la mesure** des vitesses verticales avec différents instruments
 $O(10^{-3} - 10^{-2})$ m/s
- **Sources d'incertitudes** identifiées :
variabilités instrumentales (angle/pression) et environnementale → contributions du même ordre

Comby, C., Barrillon, S., Fuda, J.-L., Doglioli, A. M., Tzortzis, R., Gregori, G., Thyssen, M. and A. A., Petrenko (2022).
Measuring vertical velocities with ADCPs in low-energy ocean. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*

- **Couplage FF-ADCP & Sentinel** : précision optimale attendue
développé au MIO : déploiement PROTEVS-Gascogne (2022), BIOSWOT-Med (2023)

- **Approches indirectes** essentielles en l'absence d'échantillonnage *in situ*

Équation ω → utilisable à partir de champ 3D de courantologie et de densité
Modèle numérique **Symphonie** → adapté à la Méditerranée Nord Occidentale



Introduction

Dynamique océanique

Vitesses verticales état de l'art et stratégies de recherche

Campagne océanographique support : FUMSECK

Résultats des travaux de recherche

I. Mesures in situ ADCP

II.1 Estimation indirecte : équation- ω

II.2 Estimation indirecte : modèle SYMPHONIE

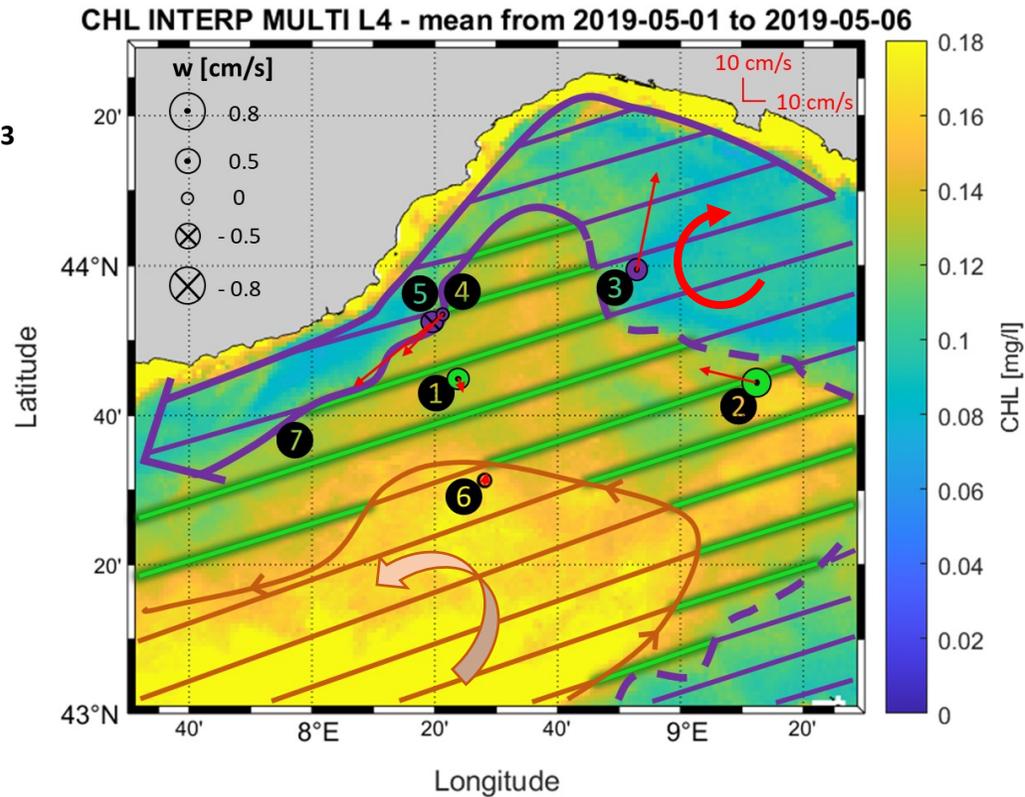
III. Mesure in situ VVP

IV. BIOSWOT-Med : aboutissement récent

Conclusion et perspectives

Synthèse personnelle

Adapté de
Barrillon *et al.* 2023
Biogeoscience



➤ Distinction de plusieurs zones :

Courant Nord (liguro-provençal)

Circulation cyclonique

Zone intermédiaire

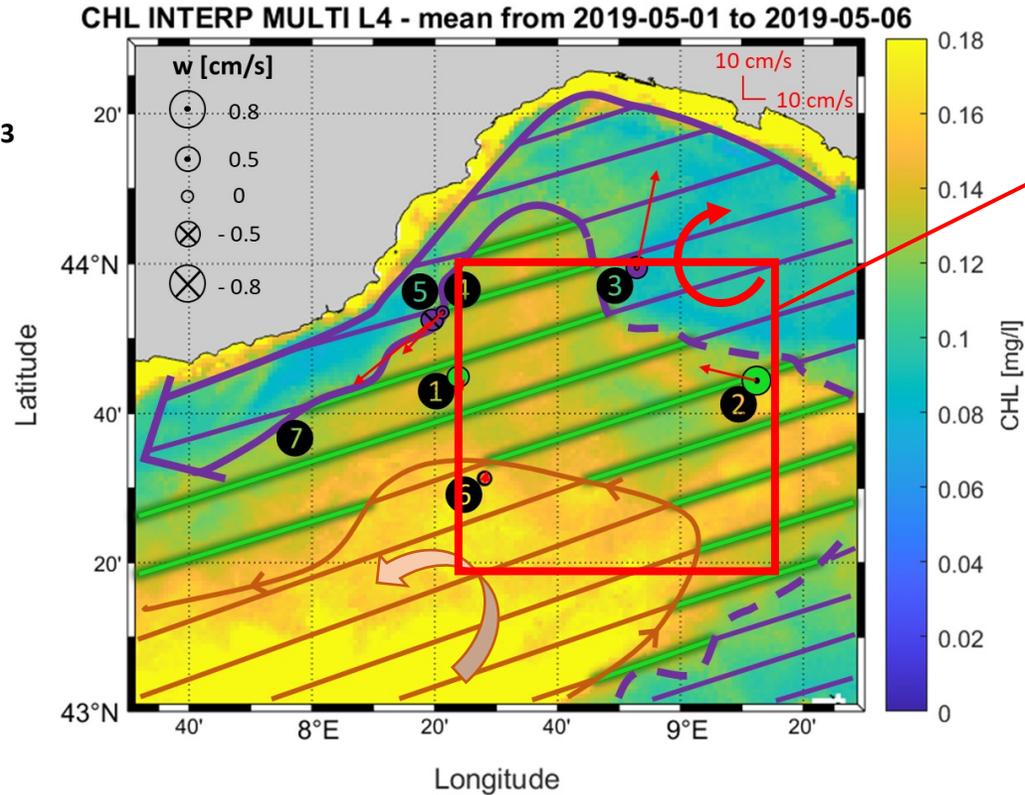
➤ Impact sur les vitesses verticales

Intensification des vitesses $u/v/w$ en bordure

du **Courant Nord**,

d'un **méandre** ou **tourbillon AC**

Adapté de
Barrillon *et al.* 2023
Biogeoscience



Résolution
équation- ω

➤ Campagne FUMSECK initialement organisée pour l'application de l'équation- ω

➤ Problématiques majeures :

1. Tempête en milieu de campagne
→ arrêt de l'échantillonnage

2. Absence de tourbillon de fine échelle dans la zone

➤ Distinction de plusieurs zones :

Courant Nord (liguro-provençal)

Circulation cyclonique

Zone intermédiaire

➤ Impact sur les vitesses verticales

Intensification des vitesses u/v/w en bordure

du **Courant Nord**,

d'un **méandre** ou **tourbillon AC**

➤ Inter-comparaison : stations 2 et 3

1. INTERPOLATION & OBJECTIVE MAPPING

Grille d'interpolation : **Arakawa C**

Structure d'intérêt : **FRONT**

Fonction d'interpolation : **linéaire**

Inclinaison de la structure : **$\theta = 35^\circ$**

Échelles de décorrélation : **$x_{cor} = y_{cor} = 30$ km**

2. ÉQUATION OMÉGA

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

(Hoskins 1978)

\mathbf{Q} : \mathbf{Q} -vector = $\mathbf{Q}_{tg} + \mathbf{Q}_{tag}$
 forçages **géostrophique** + **agéostrophique**

N : fréquence de Brunt Väisälä

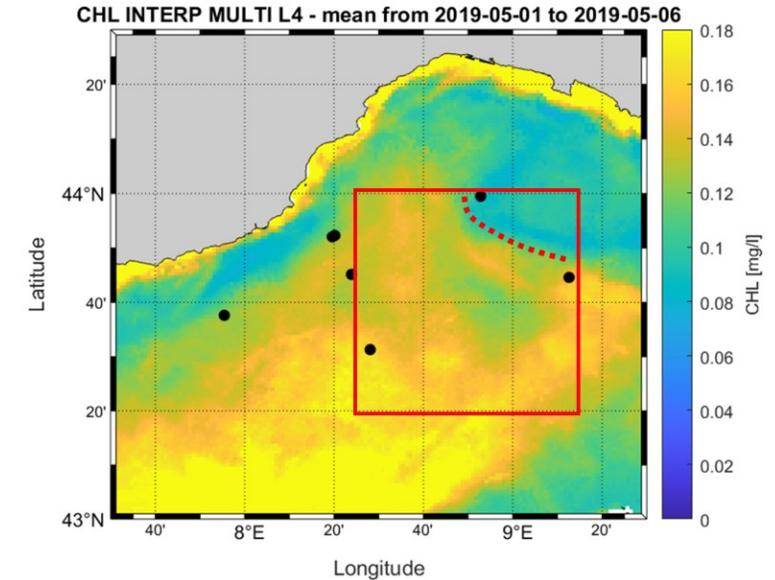
f : vorticité planétaire (paramètre de Coriolis s^{-1})



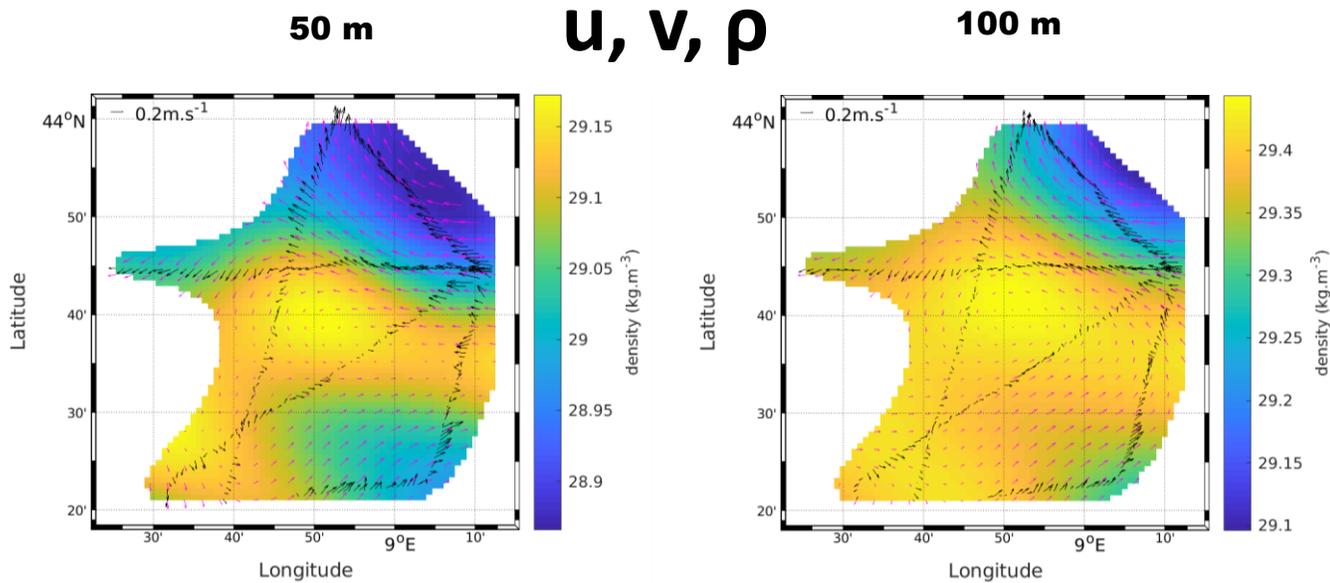
$$\mathbf{Q}_{tg} = \begin{pmatrix} \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial V_g}{\partial x} \nabla \rho \\ \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial V_g}{\partial y} \nabla \rho \end{pmatrix} + \mathbf{Q}_{tag} = \begin{pmatrix} \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial V_{ag}}{\partial x} \nabla \rho \\ \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial V_{ag}}{\partial y} \nabla \rho \end{pmatrix}$$

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

V_{ag} : composantes de la vitesse agéostrophique (u_{ag}, v_{ag}, w_{ag})



Haute résolution des données ADCP et MVP permettant d'appliquer l'équation et de reconstruire les champs 3D



→ Utilisation du solveur de calcul numérique développé par Pietri et al. (2021)

Objective mapping

Interpolation des courants et de la densité

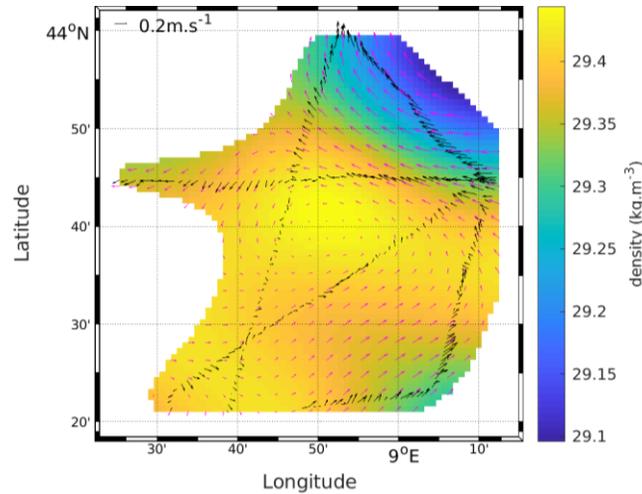
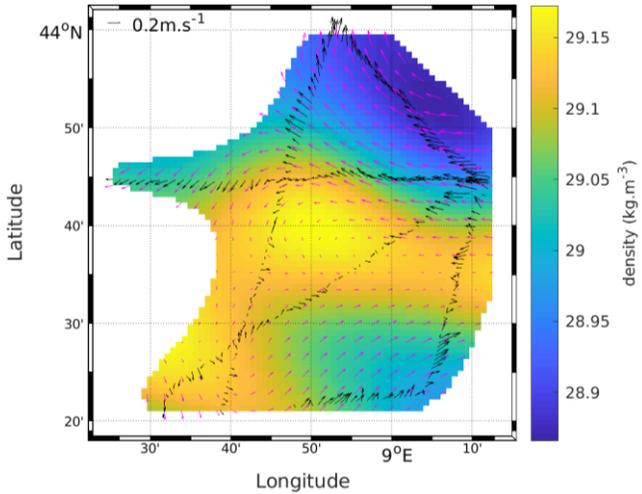
- structure d'intérêt zone Nord-Est

Haute résolution des données ADCP et MVP permettant d'appliquer l'équation et de reconstruire les champs 3D

50 m

u, v, ρ

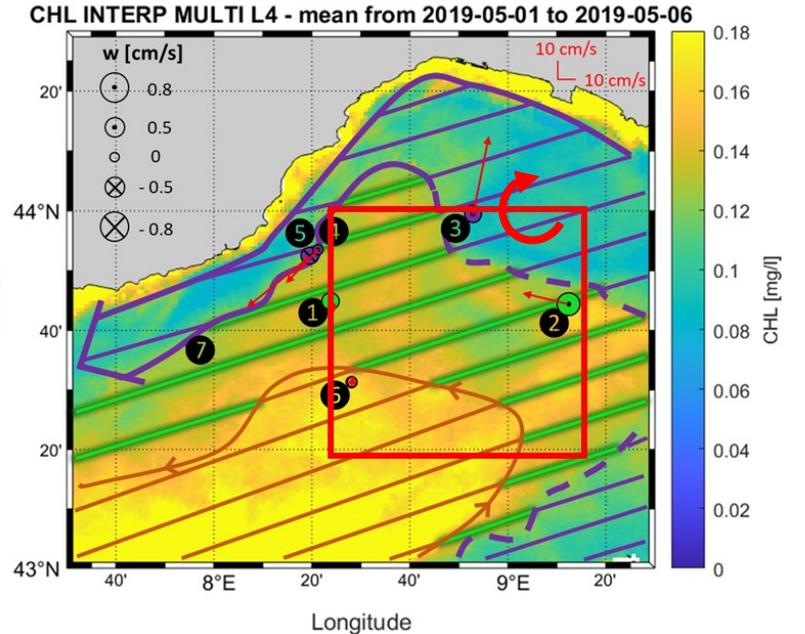
100 m



Objective mapping

Interpolation des courants et de la densité

- structure d'intérêt zone Nord-Est



- Concordance avec la délimitation

Courant Nord

Zone intermédiaire

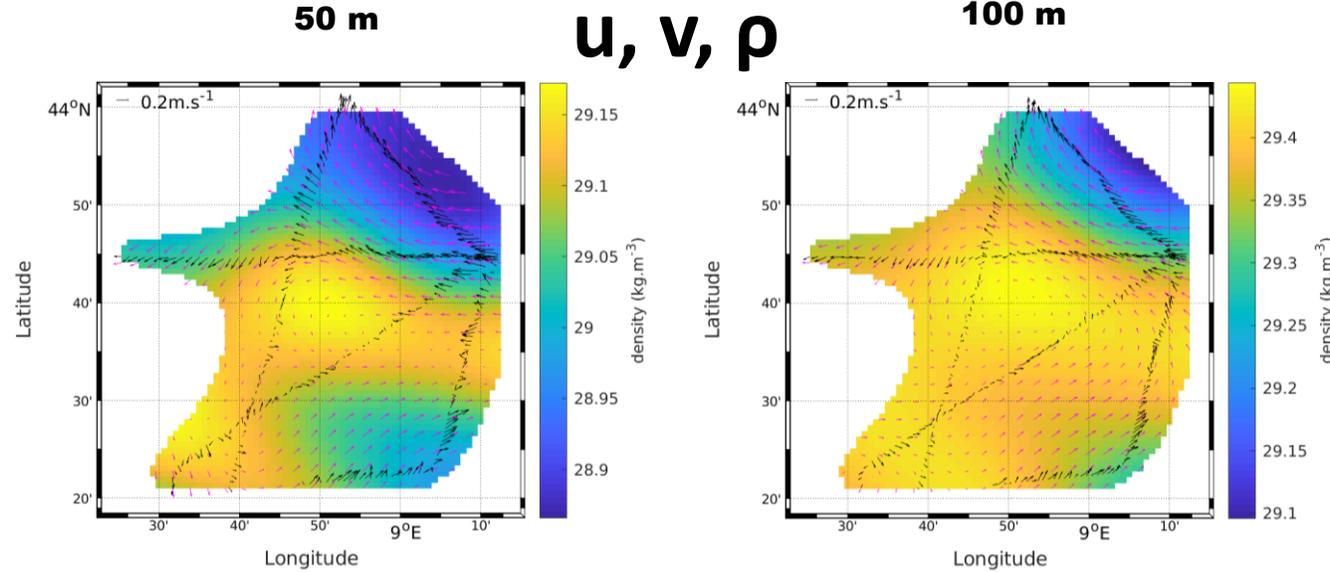
Comparaison possible avec les données in situ de vitesse verticale

1. Équation- ω

Contexte
 Matériel et méthode
Résultats principaux

2. Modèle SYMPHONIE

u, v, ρ



Objective mapping

Interpolation des courants et de la densité

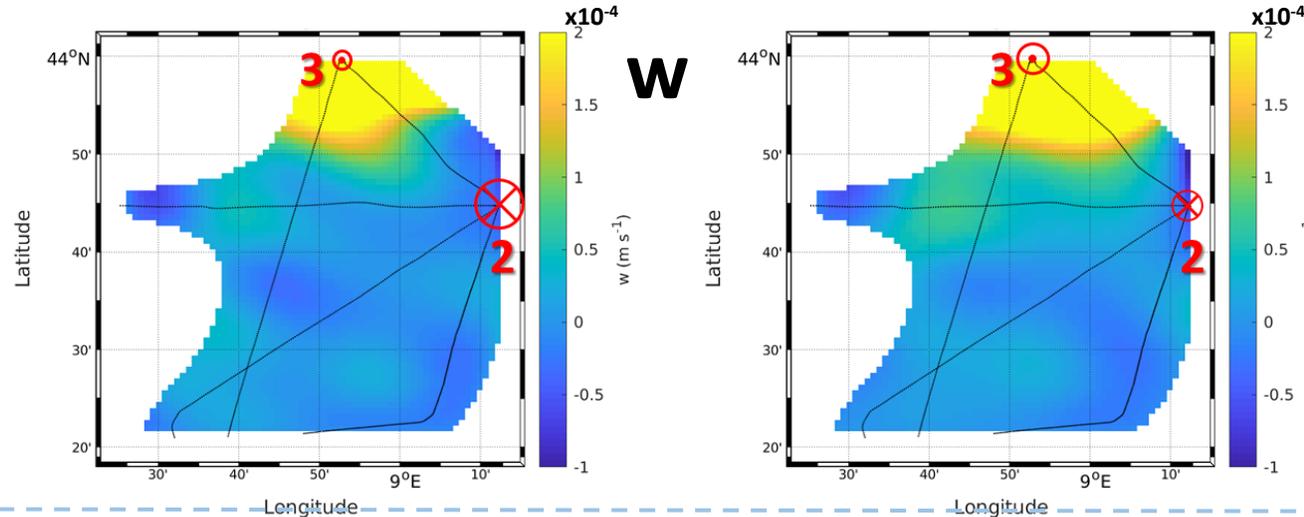
- structure d'intérêt zone Nord-Est
- concorde avec la délimitation
Courant Nord
Zone intermédiaire

FF-ADCP
w (m s⁻¹)

x10⁻³

- ⊙ 8
- ⊙ 4
- 0
- ⊗ -4
- ⊗ -8

W



Équation- ω

- Structure d'intérêt zone Nord-Est
- Tendances similaires
- $O(\text{équation-}\omega) < O(\textit{in situ})$
 $10^{-5} - 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ 10^{-3} m s^{-1}

Introduction

Dynamique océanique

Vitesses verticales état de l'art et stratégies de recherche

Campagne océanographique support : FUMSECK

Résultats des travaux de recherche

I. Mesures in situ ADCP

II.1 Estimation indirecte : équation- ω

II.2 Estimation indirecte : modèle SYMPHONIE

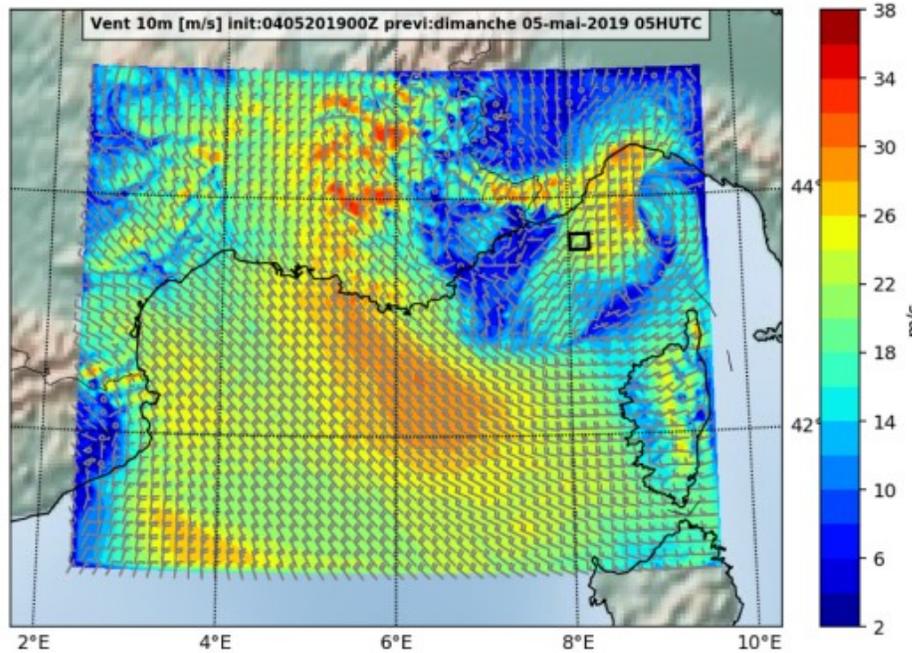
III. Mesure in situ VVP

IV. BIOSWOT-Med : aboutissement récent

Conclusion et perspectives

Synthèse personnelle

Barrillon *et al.* 2023 Biogeoscience

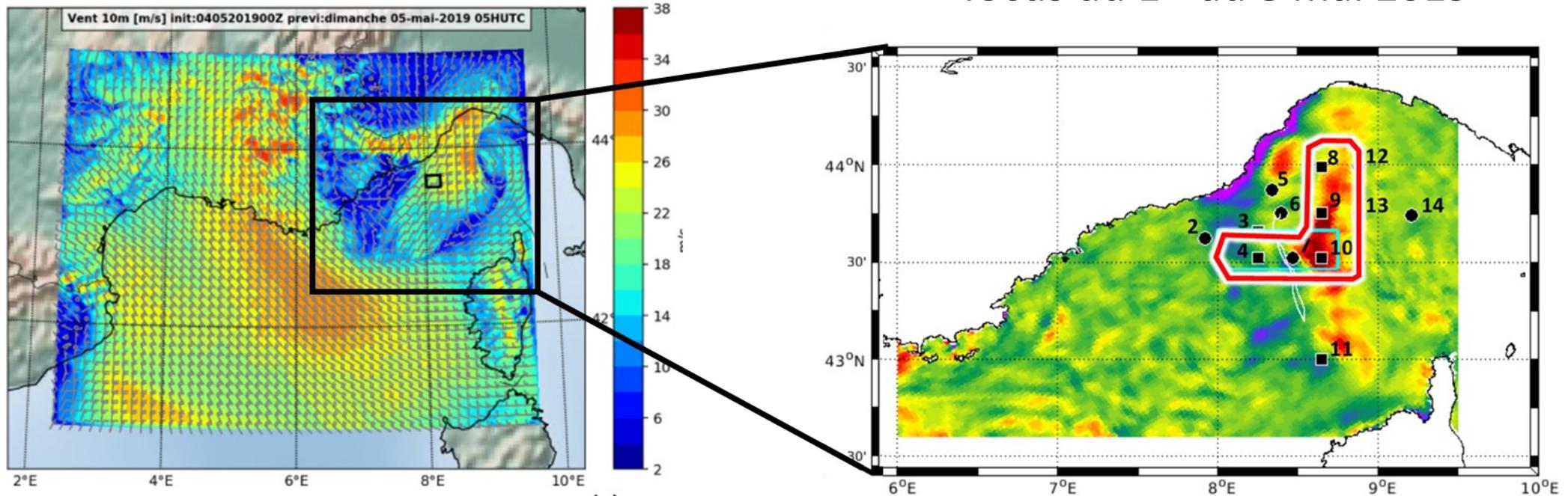


Évènement météorologique considéré comme exceptionnel

- 1 occurrence / 4 ans au printemps
- manque de données du 5 au 6 mai

utilisation modèle numérique
→ focus du 1^{er} au 8 mai 2019

Barrillon *et al.* 2023 Biogeoscience



Évènement météorologique considéré comme exceptionnel

- 1 occurrence / 4 ans au printemps
- manque de données du 5 au 6 mai

Analyse de l'hydrodynamisme
dans la **zone** affectée par la tempête

➤ **Caractéristiques** du modèle numérique

Type de modèle : **Hydrostatique**

Grille d'interpolation horizontale : **Arakawa C curvi-linéaire**

Grille d'interpolation verticale : **σ -hybride**

Résolution : **60 niveaux** (vert.), **2 – 4.5 km** (hor.), **200 s** (temporelle)

Méthode numérique: **différences finies + conservation de l'énergie** (Marsaleix et al. 2008)

Schéma de pas de temps : **Leap Frog + filtre Laplacien** (Marsaleix et al. 2012)

PGF : **Pressure Jacobian** (Marsaleix et al. 2009)

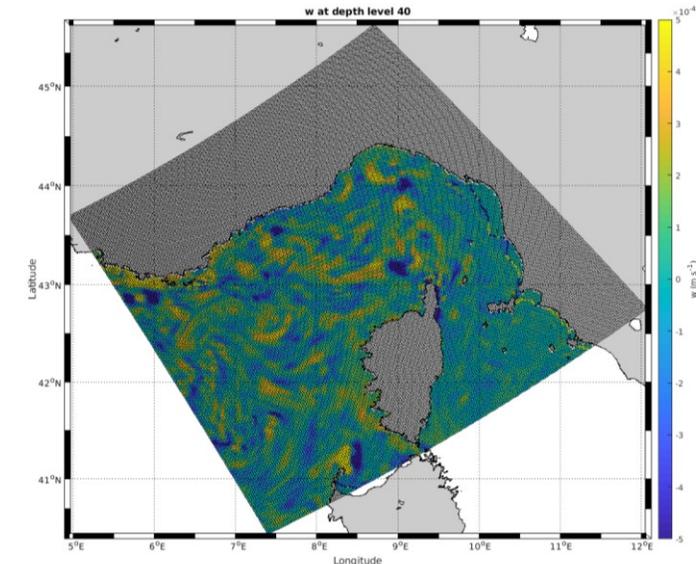
Utilisation de l'équation d'état **TEOS10** (Marsaleix et al. 2011)

et des **conditions aux limites** (Marsaleix et al. 2006, Estournel et al. 2009)

➤ **Couplage** avec le modèle biogéochimique Eco3M-S

(Ulses et al. 2016)

Travail en collaboration avec : P. Marsaleix, C. Estournel, C. Ulses

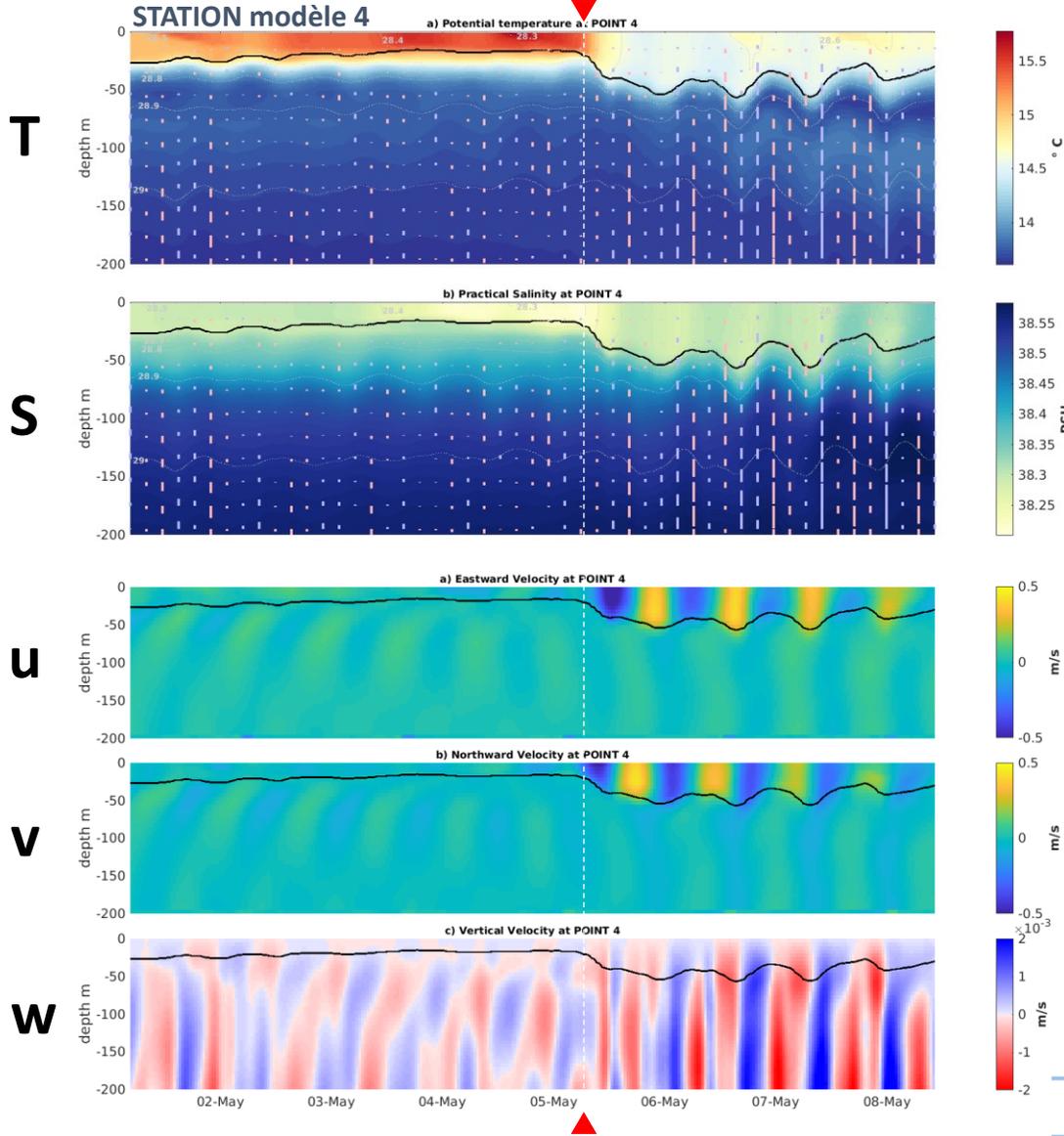


➤ **Caractéristiques** de la simulation numérique

Période de simulation : **septembre 2017 – mai 2019**

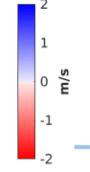
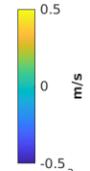
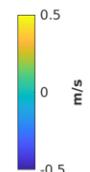
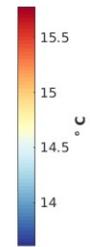
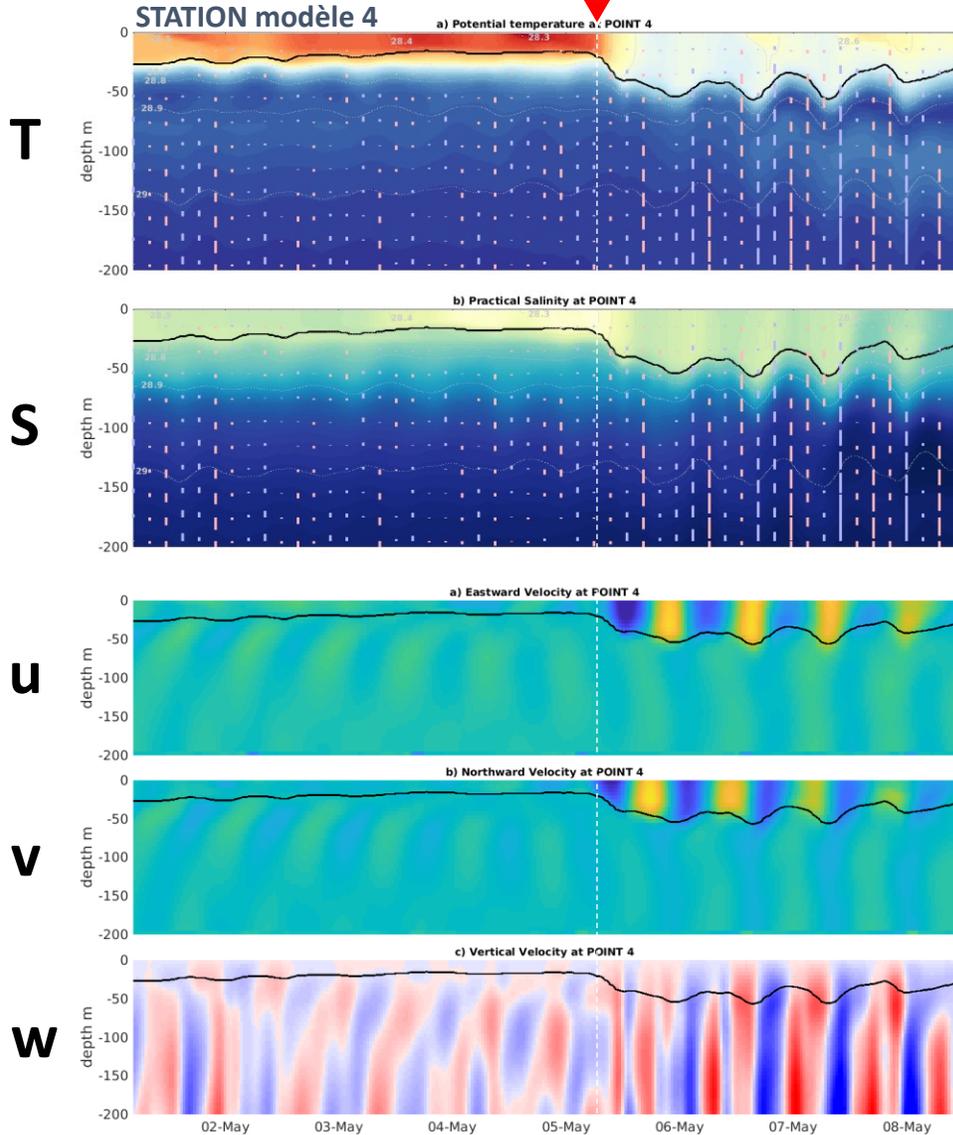
Forçage atmosphérique : **prévisions horaires ECMRWF**

Modèle de marée : **réaliste (FES2012)**

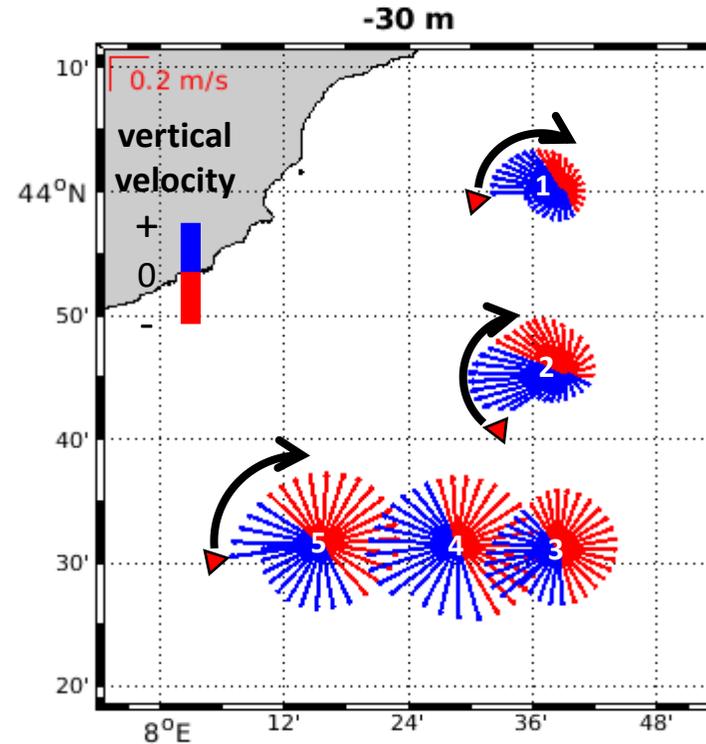


Impact de la tempête sur la dynamique de la colonne d'eau :

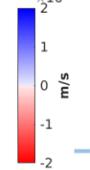
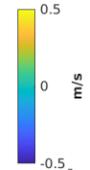
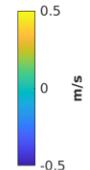
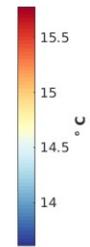
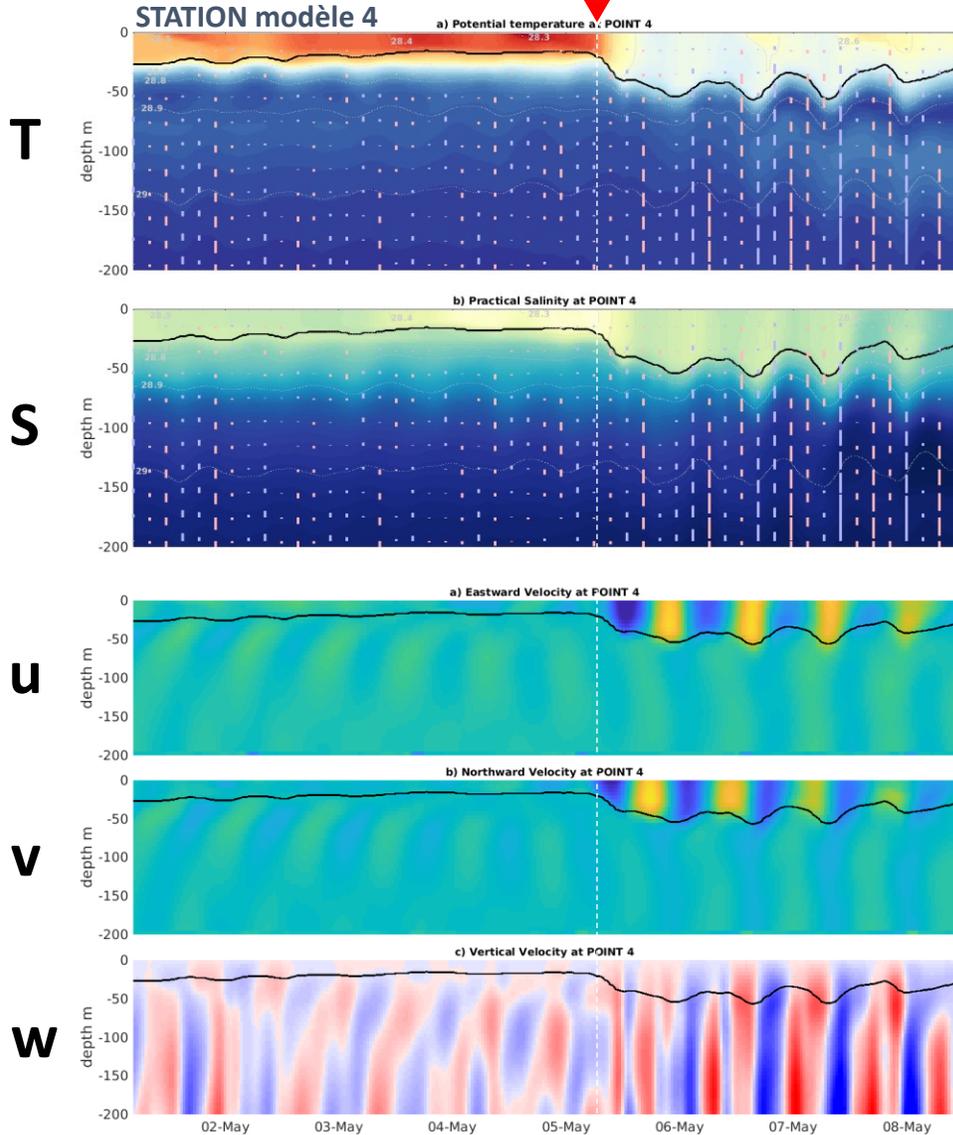
- 1) **Approfondissement** de la couche de mélange (MLD)
- 2) **Déclenchement d'oscillations** des 3 composantes du courant
- 3) **Intensification des vitesses** :
 u, v \rightarrow contenues dans la MLD
 w \rightarrow > 200 mètres



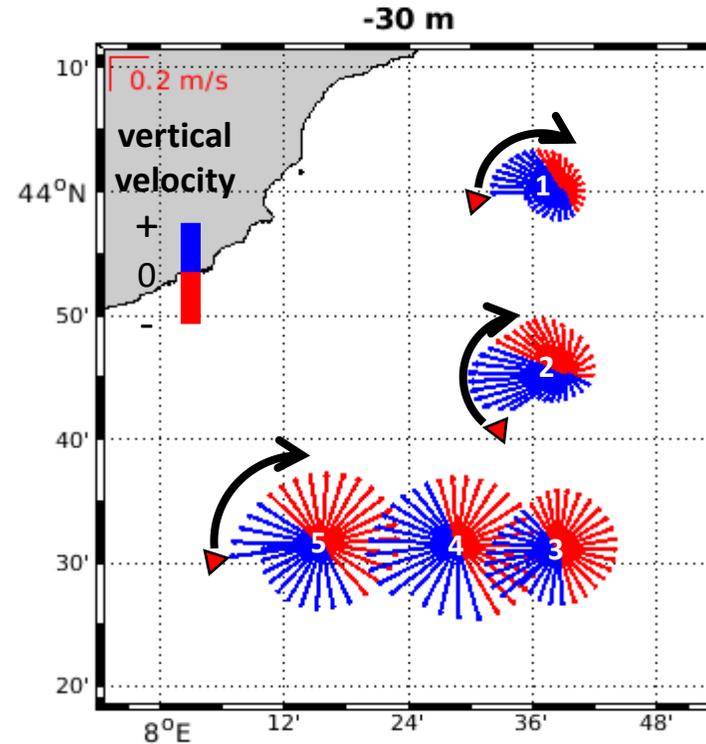
- 1) **Approfondissement** de la couche de mélange (MLD)
- 2) **Déclenchement d'oscillations** des 3 composantes du courant
- 3) **Intensification des vitesses** :
 - u, v → contenues dans la MLD
 - w → > 200 mètres



Ellipse 1^{ère} période
 Rotation horaire
 1 cycle u,v
 1 alternance de w +/-
Période = 17h20' – 18h30'



- 1) **Approfondissement** de la couche de mélange (MLD)
- 2) **Déclenchement d'oscillations** des 3 composantes du courant
- 3) **Intensification des vitesses** :
 - u, v → contenues dans la MLD
 - w → > 200 mètres

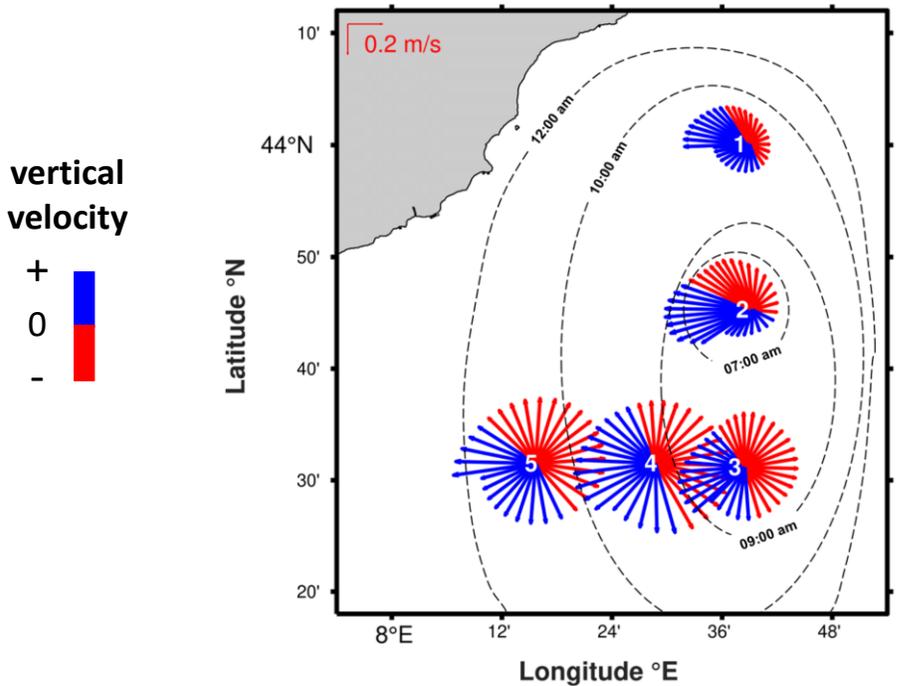


Ellipse 1^{ère} période
 Rotation horaire
 1 cycle u,v
 1 alternance de w +/-
Période = 17h20' – 18h30'

Proche de la période
 inertielle en
 Méditerranée Nord
 Occidentale

**Impulsion d'oscillations
 quasi-inertielles**

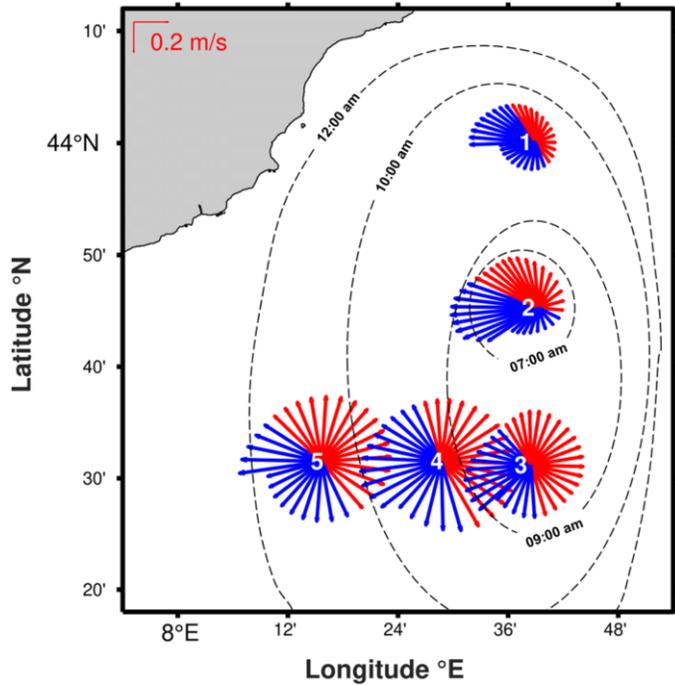
➤ **Évènement impulsionnel :**
Impact spatio-temporel



Comby *et al.* 2023 JWROS

- Déclenchement concentrique des OQI sous le forçage direct du vent
- Propagation d'Est en Ouest

➤ **Évènement impulsionnel :**
 Impact spatio-temporel

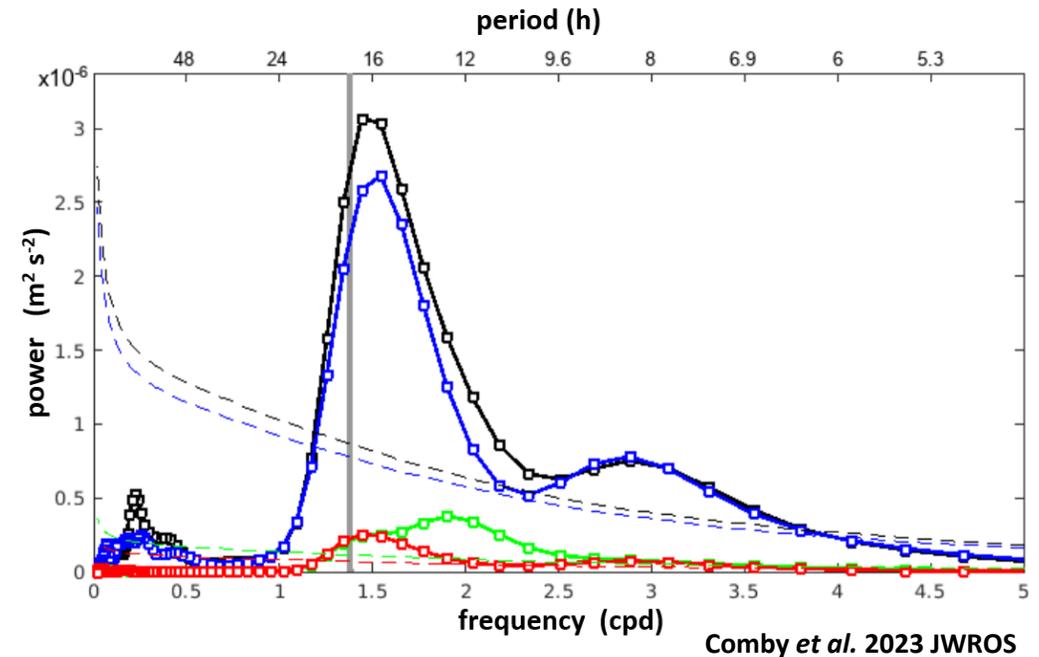


Comby *et al.* 2023 JWROS

- Déclenchement concentrique des OQI sous le forçage direct du vent
- Propagation d'Est en Ouest

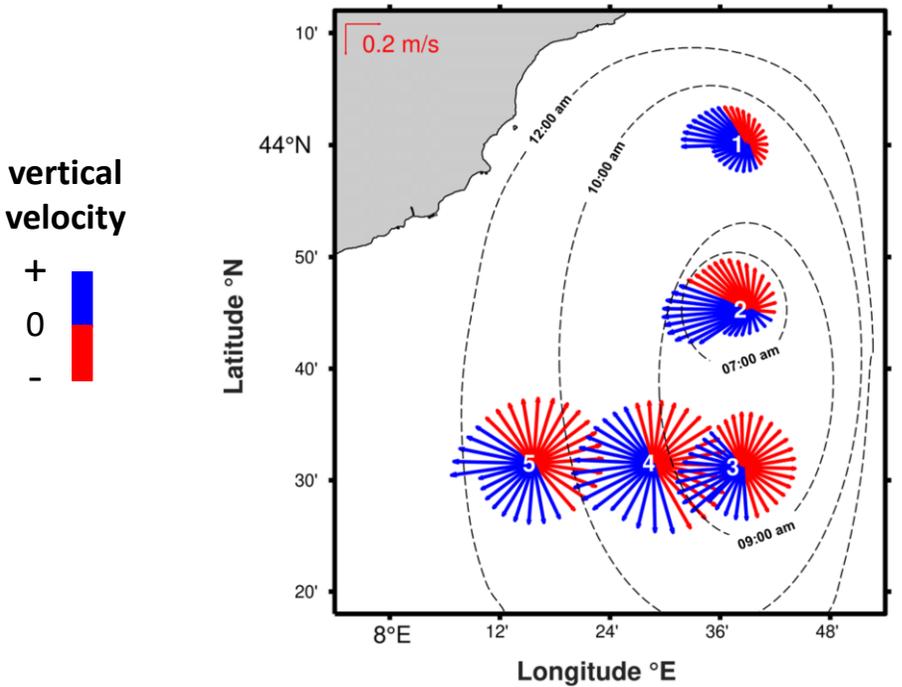
➤ **Tests de sensibilité :** simulation variable

Forçages	marée : +	marée : \emptyset
vent : +	Black	Blue
vent : \emptyset	Green	Red



Comby *et al.* 2023 JWROS

➤ **Évènement impulsionnel :**
 Impact spatio-temporel

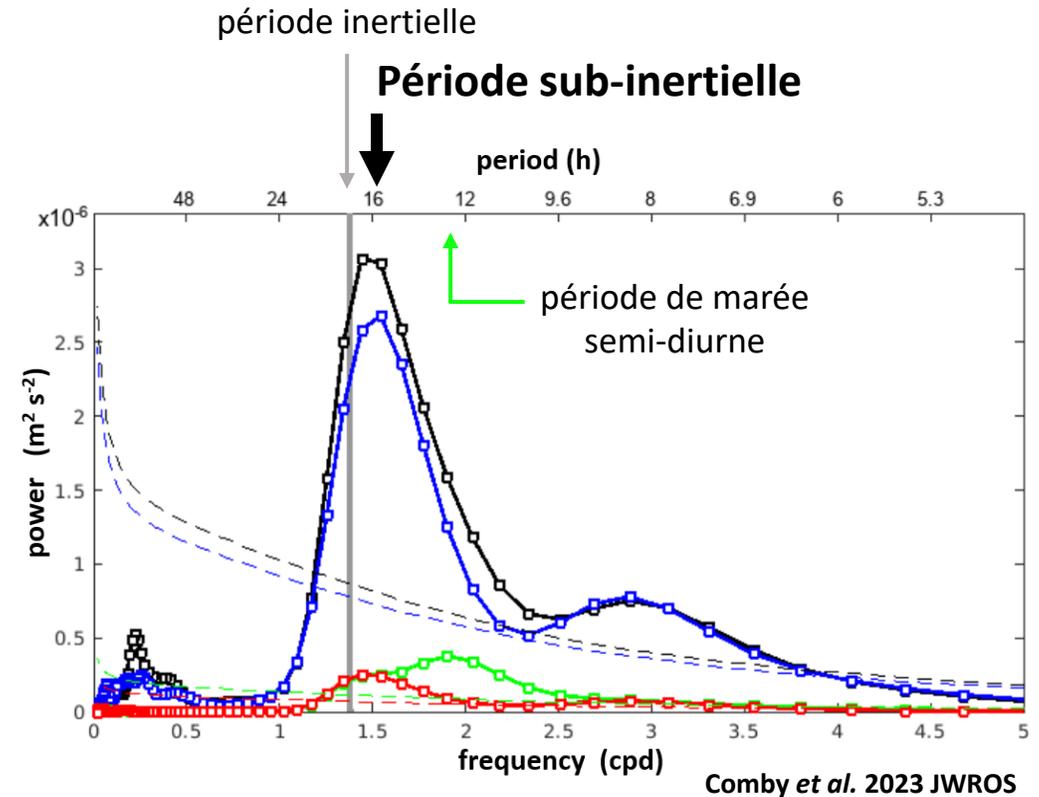


Comby et al. 2023 JWROS

- Déclenchement concentrique des OQI sous le forçage direct du vent
- Propagation d'Est en Ouest

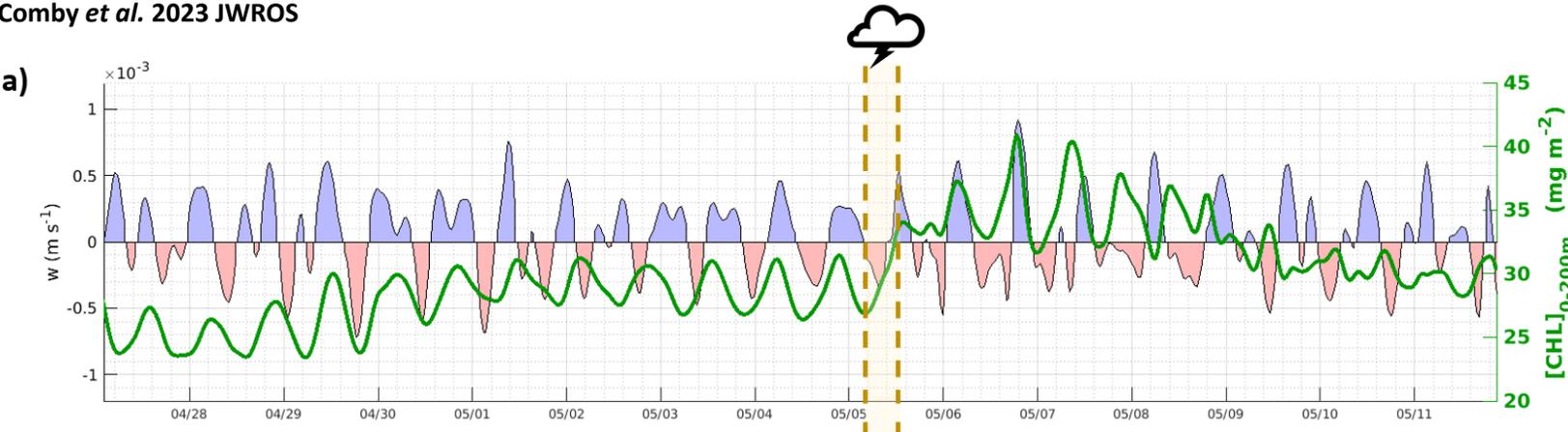
➤ **Tests de sensibilité :** simulation variable

Forçages	marée : +	marée : \emptyset
vent : +	Black	Blue
vent : \emptyset	Green	Red



Comby et al. 2023 JWROS

Comby *et al.* 2023 JWROS



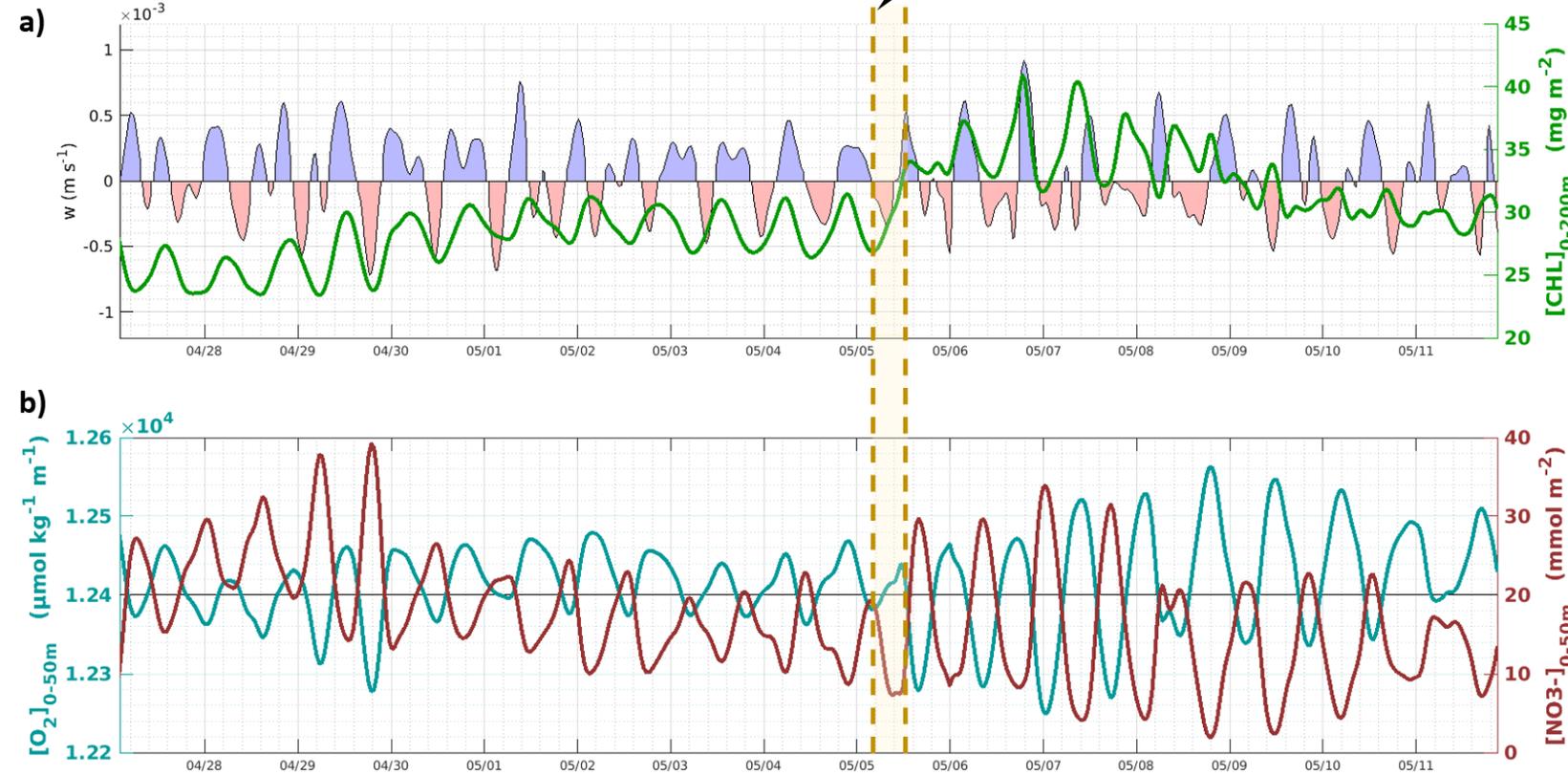
**Évènement impulsionnel :
effet sur les vitesses verticales**

$$|w| > 0.7 \cdot 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$$

Oscillations downward/upward
des w d'intensité $> 0.7 \text{ mm/s}$

- **Répercussion sur toute la colonne d'eau** contrairement aux vitesses horizontales dont les variations sont contenues dans la MLD
- **Persistance** des oscillations quasi-inertielles des w durant 4 à 6 périodes (**quelques jours**)
> oscillations des vitesses u, v
- **Augmentation de la concentration en CHLa** intégrée (0-200 m) d'un facteur 1.3

Comby et al. 2023 JWROS



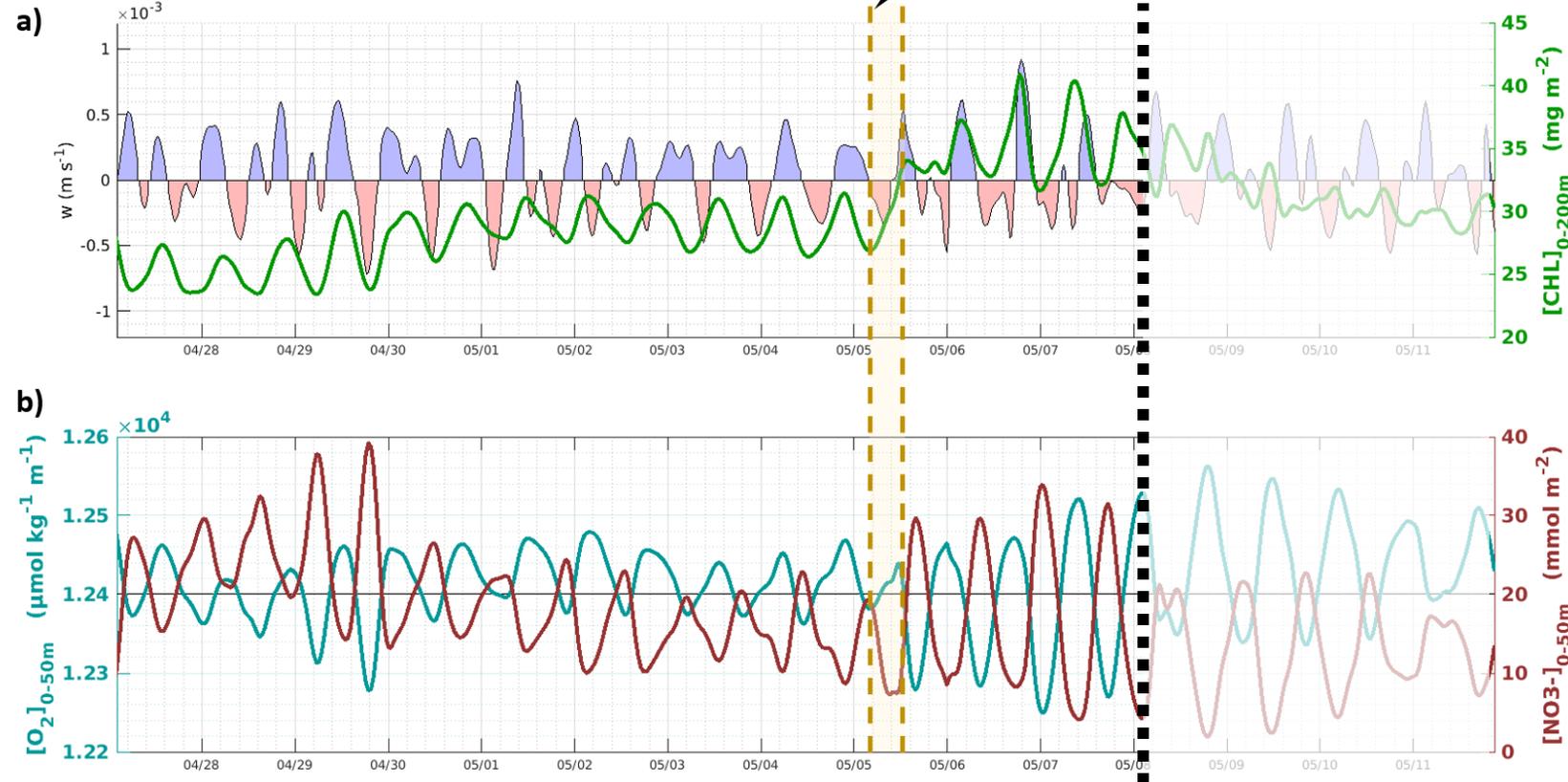
Évènement impulsionnel : effet sur les vitesses verticales

$$|w| > 0.7 \cdot 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$$

- Répercussion sur toute la colonne d'eau contrairement aux vitesses horizontales dont les variations sont contenues dans la MLD
- **Persistance** des oscillations quasi-inertielles des w durant 4 à 6 périodes (**quelques jours**)
> oscillations des u, v

- **Augmentation de la concentration en CHLa** intégrée (0-200 m) d'un facteur 1.3
- Augmentation de la **variabilité** des nutriments

Comby *et al.* 2023 JWROS



Évènement impulsionnel : effet sur les vitesses verticales

$$|w| > 0.7 \cdot 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$$

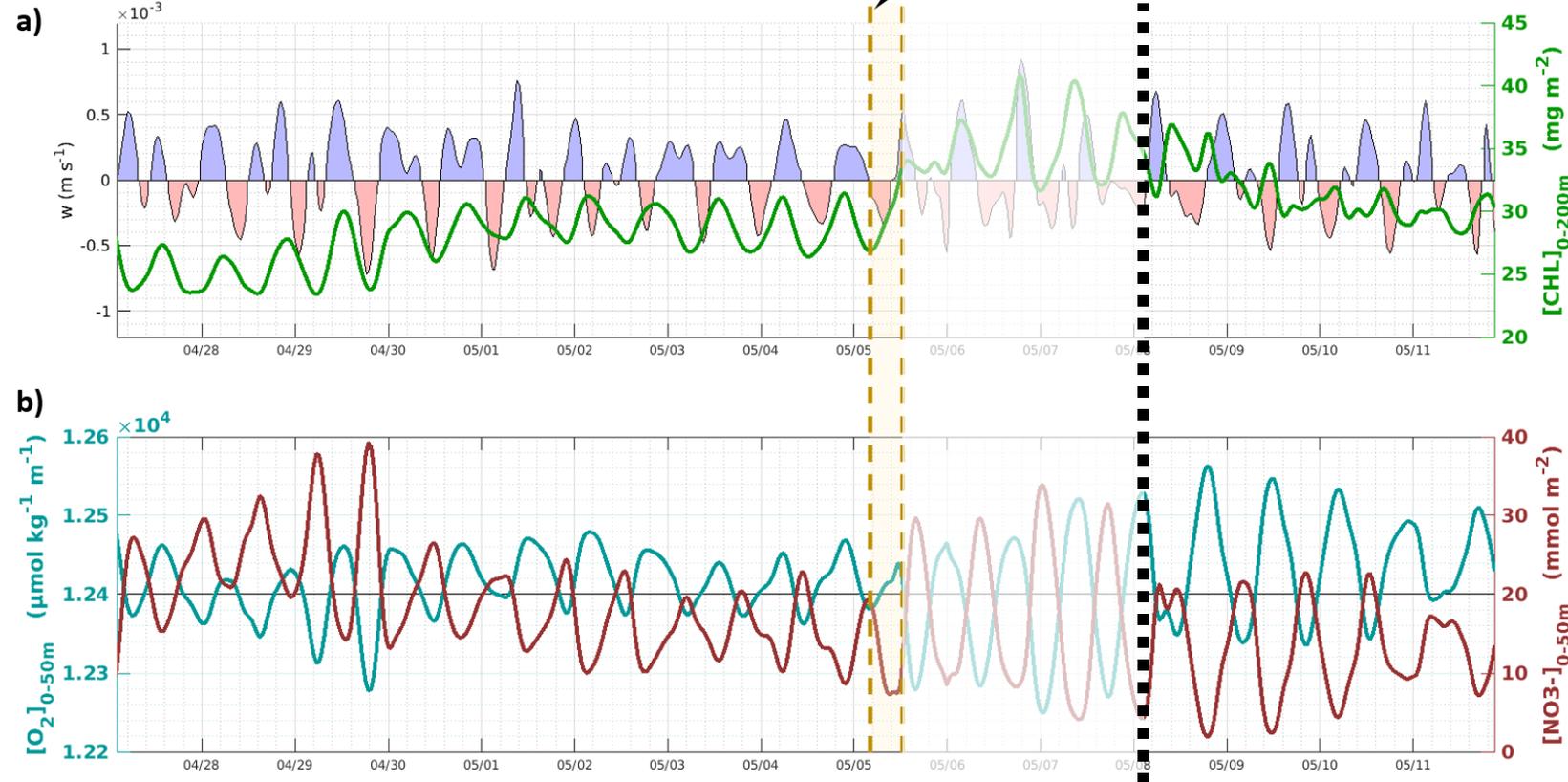
➤ Répercussion sur toute la colonne d'eau contrairement aux vitesses horizontales dont les variations sont contenues dans la MLD

➤ **Persistance** des oscillations quasi-inertielles des w durant 4 à 6 périodes (**quelques jours**)
> oscillations des u, v

➤ **Augmentation de la concentration en CHLa** intégrée (0-200 m) d'un facteur 1.3

➤ Augmentation de la **variabilité** des nutriments, variation des concentrations moyennes : **O₂ diminue**
NO₃⁻ augmente

Comby et al. 2023 JWROS



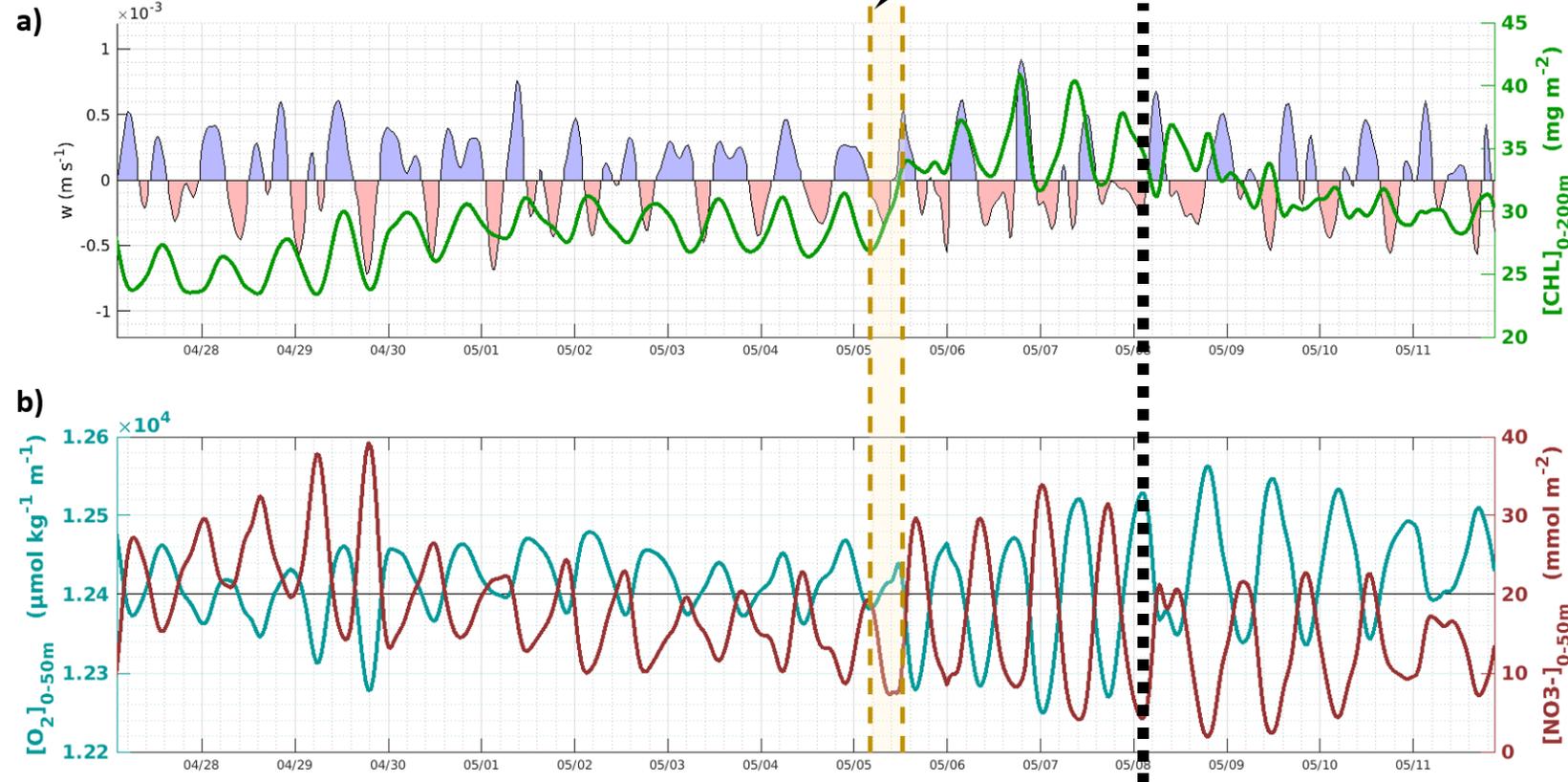
Évènement impulsionnel : effet sur les vitesses verticales

$$|w| > 0.7 \cdot 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$$

- Répercussion sur toute la colonne d'eau contrairement aux vitesses horizontales dont les variations sont contenues dans la MLD
- **Persistance** des oscillations quasi-inertielles des w durant 4 à 6 périodes (**quelques jours**)
> oscillations des u, v

- **Augmentation de la concentration en CHLa** intégrée (0-200 m) d'un facteur 1.3
- Augmentation de la **variabilité** des nutriments, variation des concentrations moyennes : O_2 diminue
 NO_3^- augmente, **puis inversion**

Comby et al. 2023 JWROS



Évènement impulsionnel : effet sur les vitesses verticales

$$|w| > 0.7 \cdot 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$$

- Répercussion sur toute la colonne d'eau contrairement aux vitesses horizontales dont les variations sont contenues dans la MLD
- **Persistance** des oscillations quasi-inertielles des w durant 4 à 6 périodes (**quelques jours**)
> oscillations des u, v

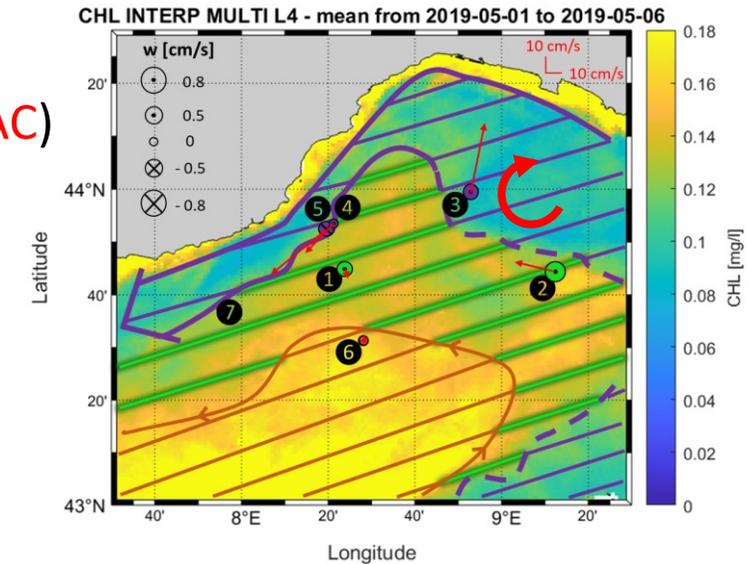
- **Augmentation de la concentration en CHLa** intégrée (0-200 m) d'un facteur 1.3
- Augmentation de la **variabilité** des nutriments, variation des concentrations moyennes : O_2 diminue
 NO_3^- augmente, puis inversion

Comby et al. 2023 JWROS

Conclusions

OMEGA

- Intensification de w dans la zone de front (bordure : **méandre** ou **tourbillon AC**)
- Ordres de grandeurs $10^{-5} - 10^{-3} \text{ m/s}$ → faibles mais liés aux approximations dans la théorie de l'équation- ω
- **Bon accord** entre w : équation- ω et *in situ*, au niveau des stations 2 et 3



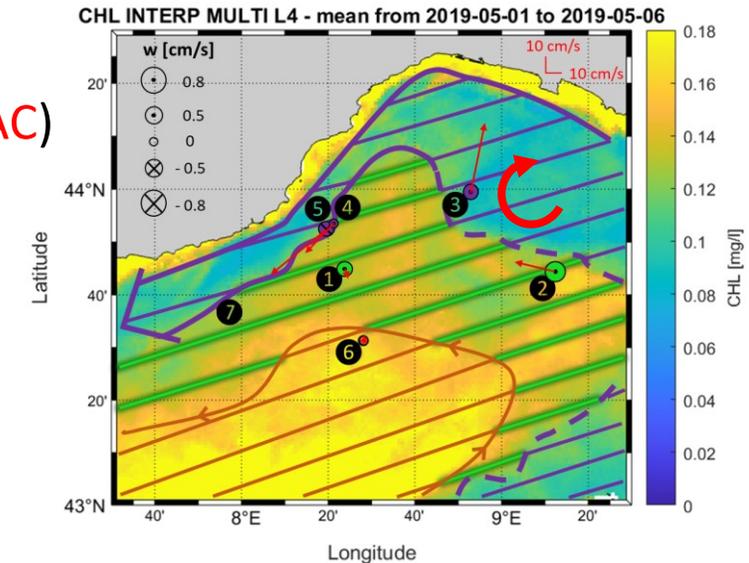
Conclusions

OMEGA

- Intensification de w dans la zone de front (bordure : **méandre** ou **tourbillon AC**)
- Ordres de grandeurs $10^{-5} - 10^{-3} \text{ m/s}$ → faibles mais liés aux approximations dans la théorie de l'équation- ω
- **Bon accord** entre w : **équation- ω** et ***in situ***, au niveau des stations 2 et 3

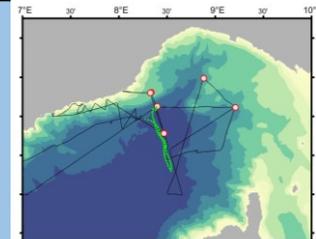
SYMPHONIE

- Identification et quantification des **oscillations quasi-inertielles** déclenchées par la tempête
- Impact sur la biogéochimie (chlorophylle a, oxygène dissous, nitrates)
- Ordres de grandeurs $10^{-5} - 10^{-4} \text{ m/s}$ → faibles mais liés aux approximations utilisées dans le modèle hydrostatique

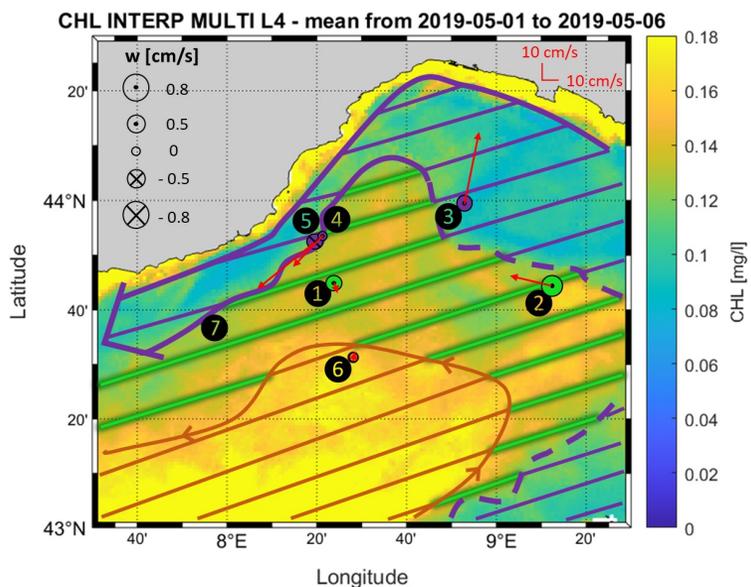


Comby, C., Petrenko, A., Estournel, C., Marsaleix, P., Ulses, C., Bosse, A., Doglioli, A. and Barrillon, S. (2023). **Near Inertial Oscillations and vertical velocities modulating phytoplankton after a storm in the Mediterranean Sea.** *Journal of Water Resources and Ocean Science*

Campagne support *FUMSECK*



Mesures ADCP in situ

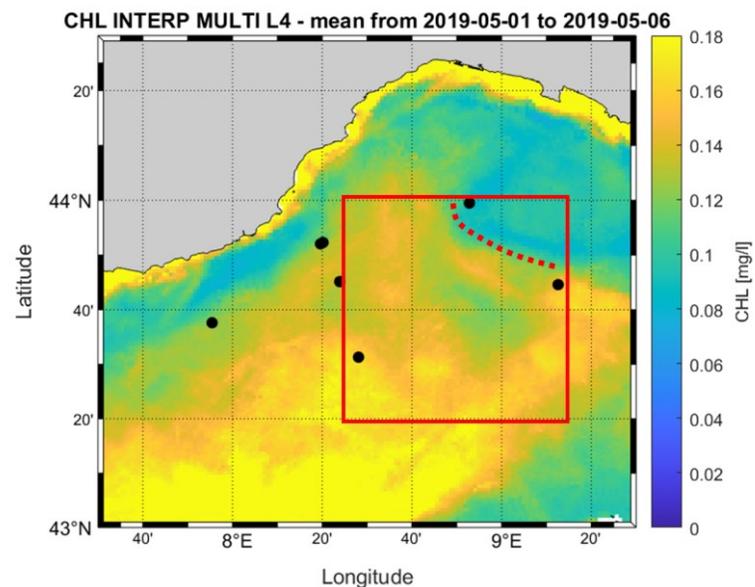


Comby et al. 2022 (*JAOT*)

Barrillon et al. 2023 (*Biogeoscience*)

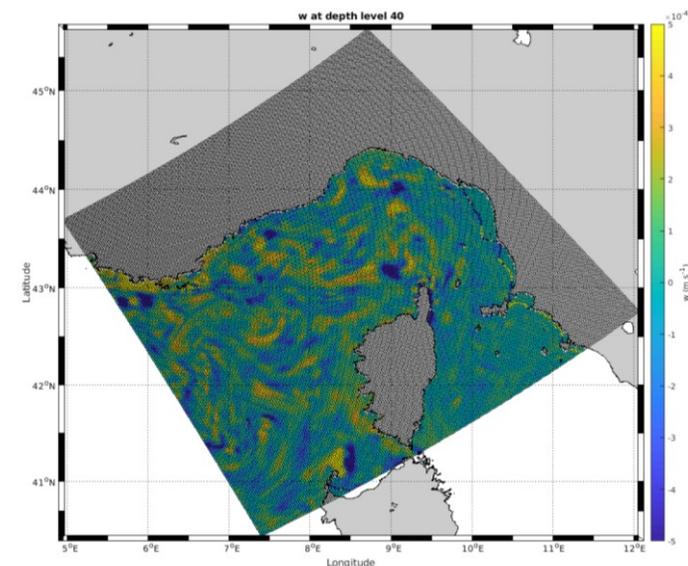
$$w \approx 10^{-3} \pm 1 \cdot 10^{-2} \text{ m s}^{-1}$$

Équation ω



$$w \approx [10^{-5} ; 10^{-3}] \text{ m s}^{-1}$$

Modèle SYMPHONIE



Comby et al. 2023 (*JWROS*)

$$w \approx [10^{-5} ; 10^{-4}] \text{ m s}^{-1}$$

Introduction

Dynamique océanique

Vitesses verticales état de l'art et stratégies de recherche

Campagne océanographique support : FUMSECK

Résultats des travaux de recherche

I. Mesures in situ ADCP

II.1 Estimation indirecte : équation- ω

II.2 Estimation indirecte : modèle SYMPHONIE

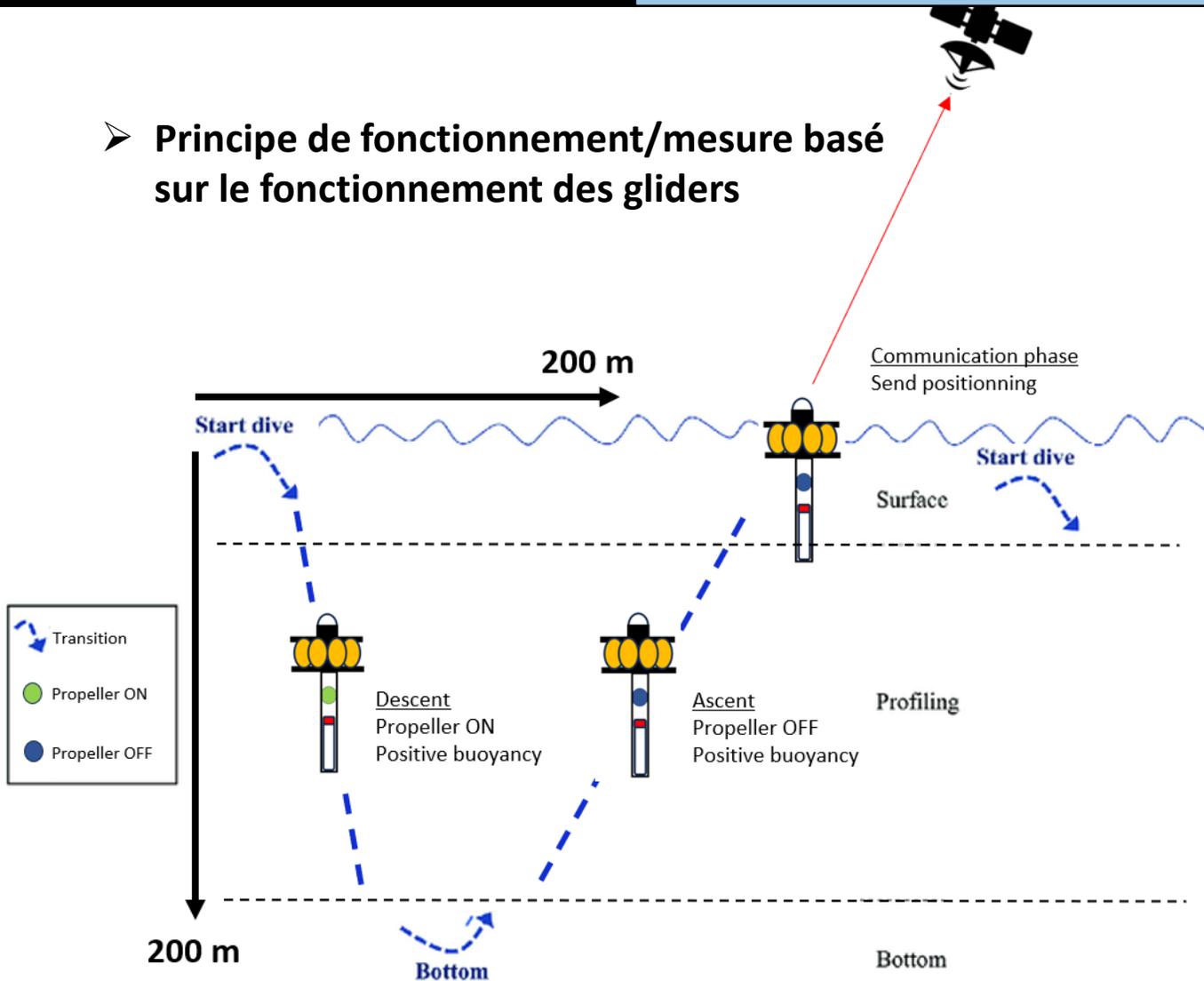
III. Mesure in situ VVP

IV. BIOSWOT-Med : aboutissement récent

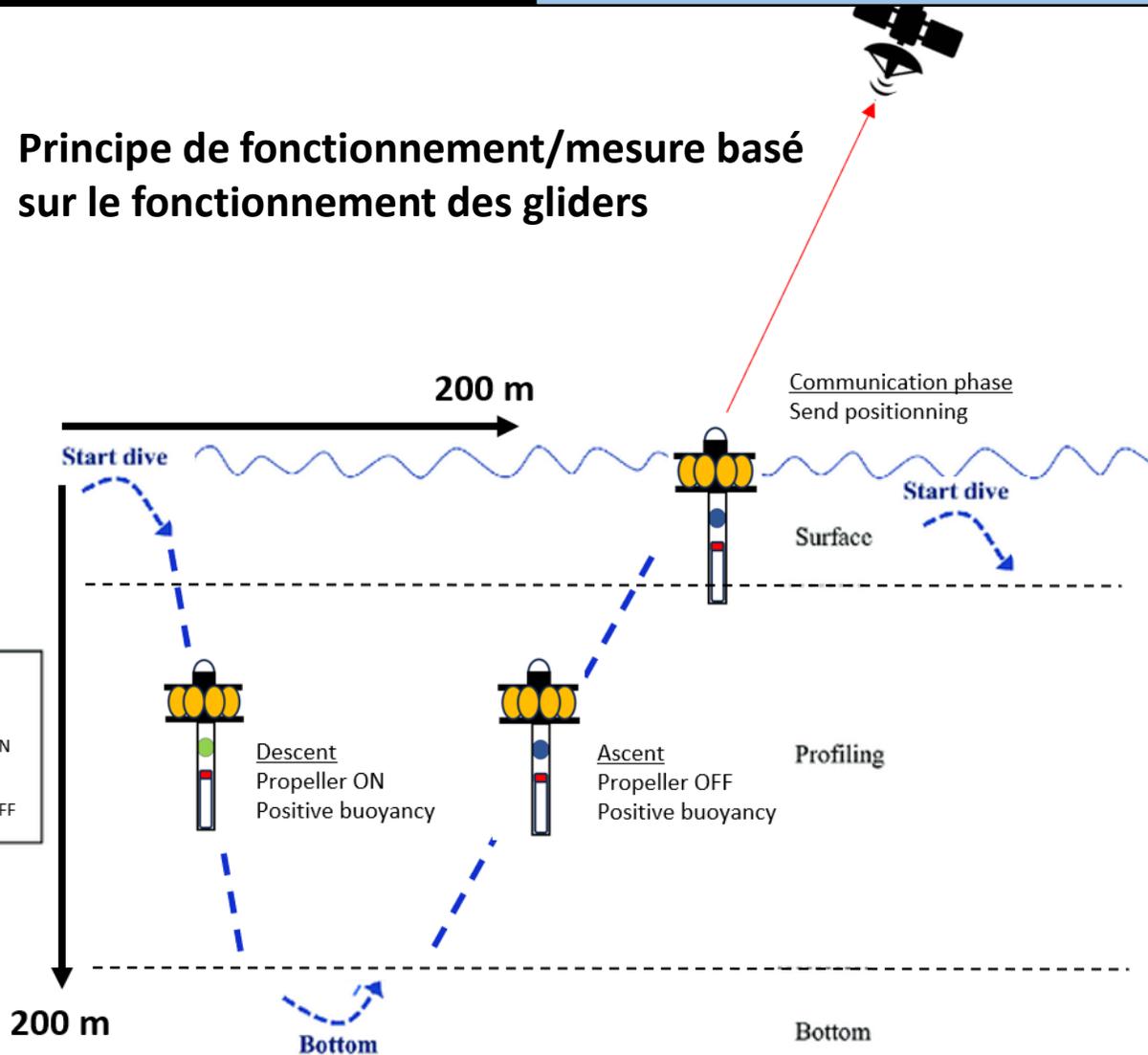
Conclusion et perspectives

Synthèse personnelle

➤ **Principe de fonctionnement/mesure basé sur le fonctionnement des gliders**



➤ **Principe de fonctionnement/mesure basé sur le fonctionnement des gliders**



Modèle de vol du *Vertical Velocity Profiler*

Fuda et al. 2023 (IEEE MetroSea)

- Accélération négligée :
équilibre statique à chaque instant

- **vitesse du VVP mesurée**
phase de remontée

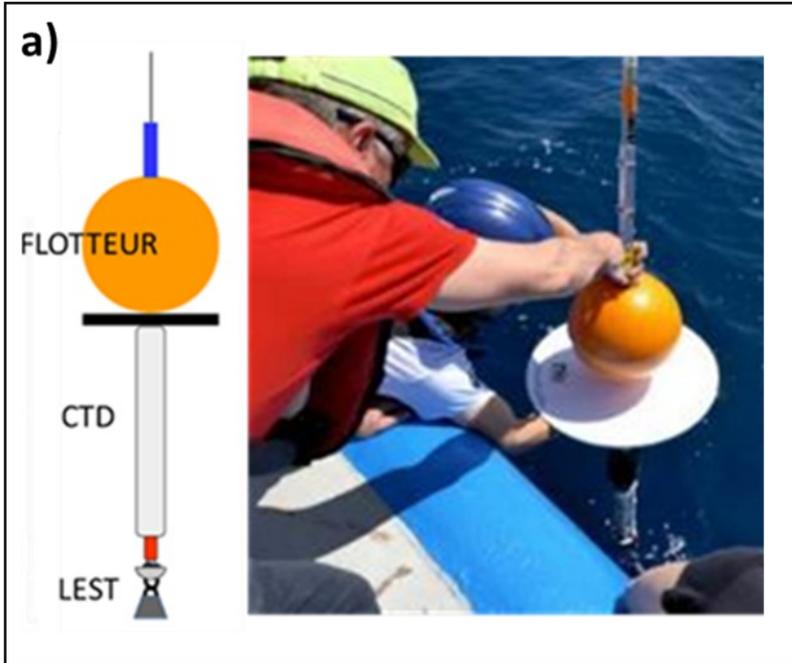
$$W_a = \frac{d\left(\frac{P}{\rho g}\right)}{d_t}$$

- **vitesse du VVP théorique**
phase de remontée

$$W_{th} = \sqrt{\frac{2(\rho V_0 (1 - \beta P) - M) g}{\rho \pi R^2 C_d}}$$

- **vitesse verticale océanique** $W_{oc} = W_{th} - W_a$

- **Avantage** : aucun effet de la biologie sur la mesure
 → variation par rapport au modèle de vol exclusivement due à un signal physique



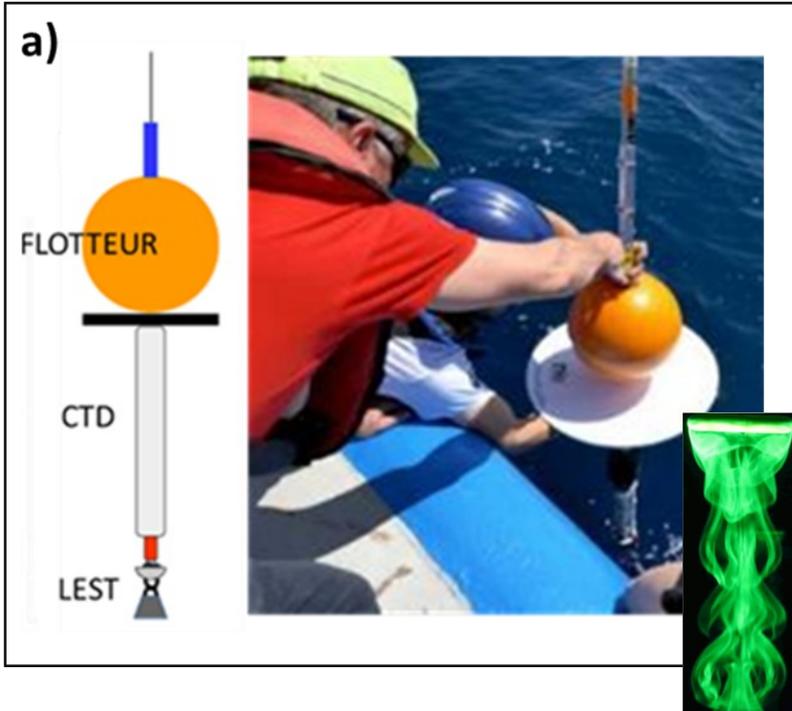
2019

2020

2022

2023

FUMSECK



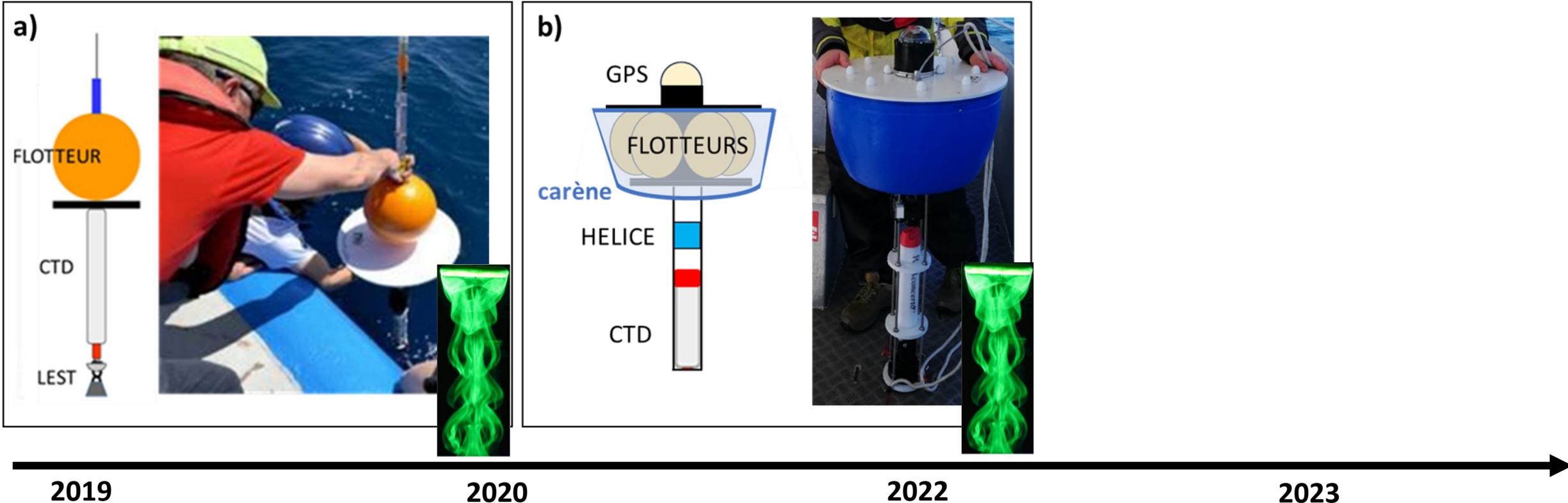
2019

2020

2022

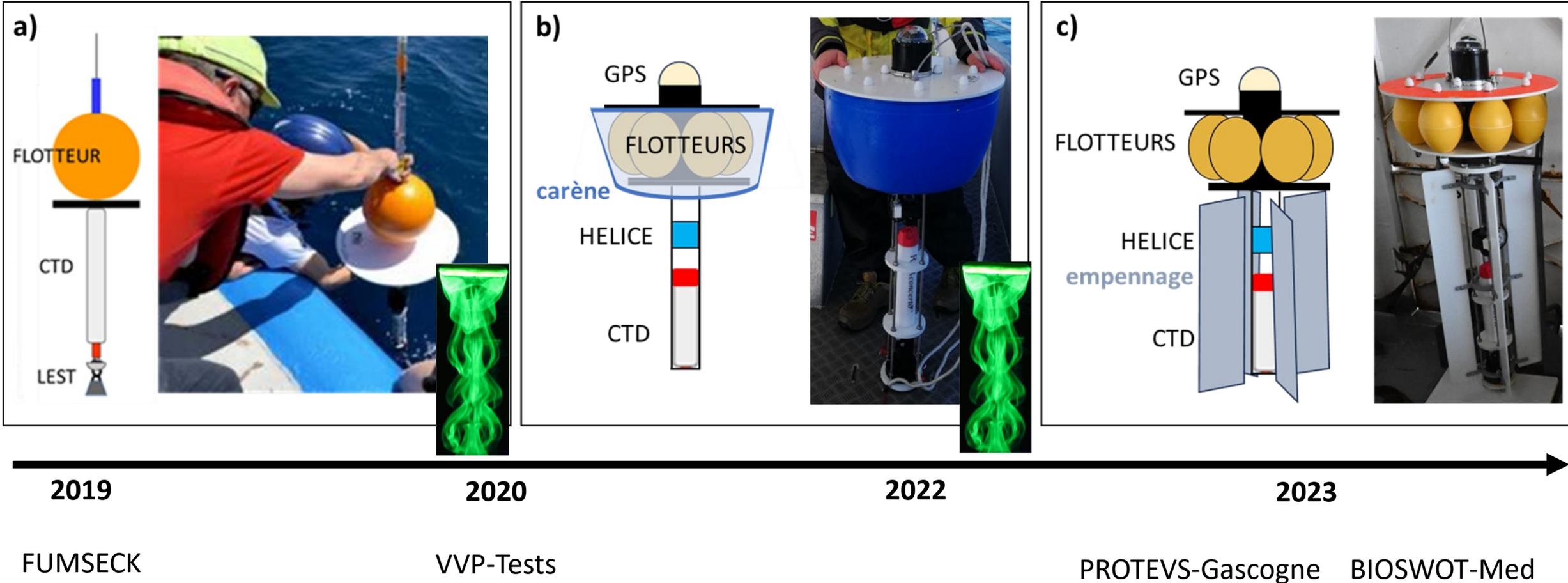
2023

FUMSECK



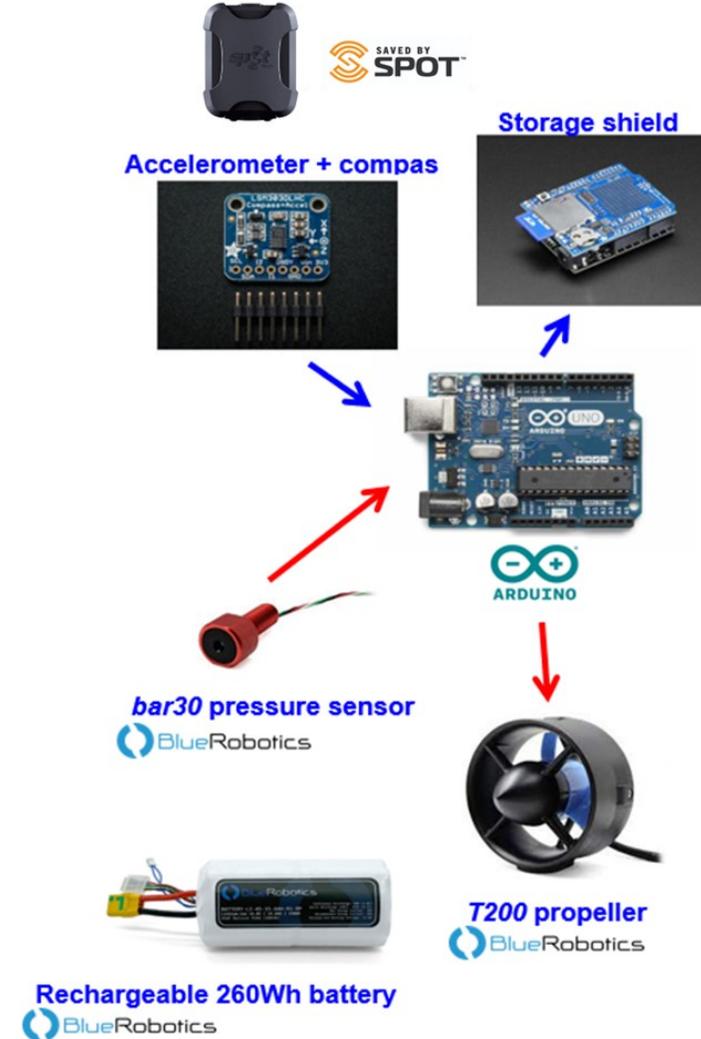
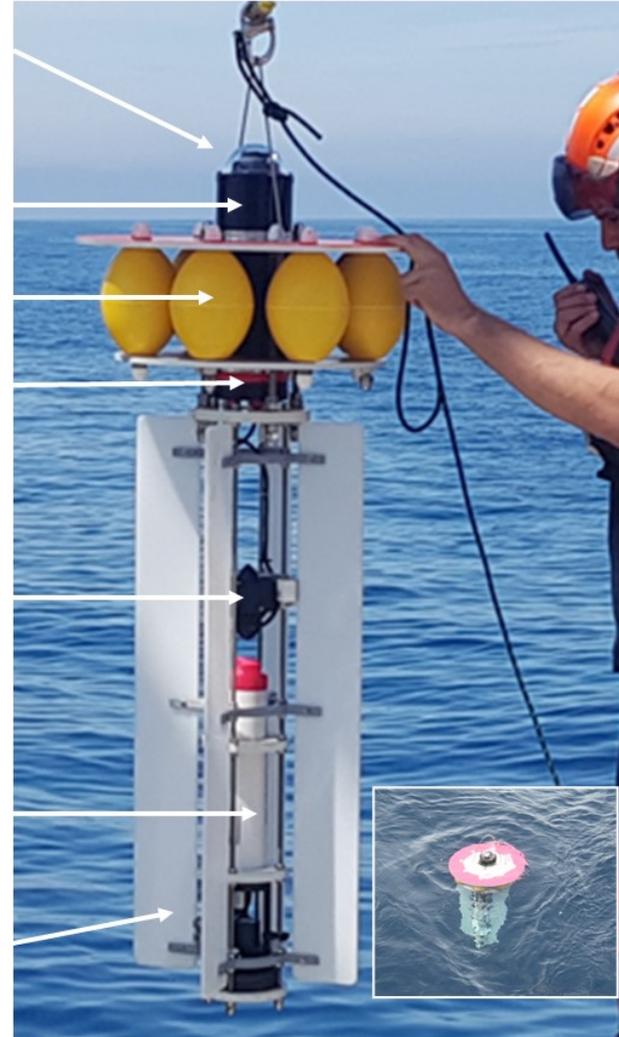
FUMSECK

VVP-Tests



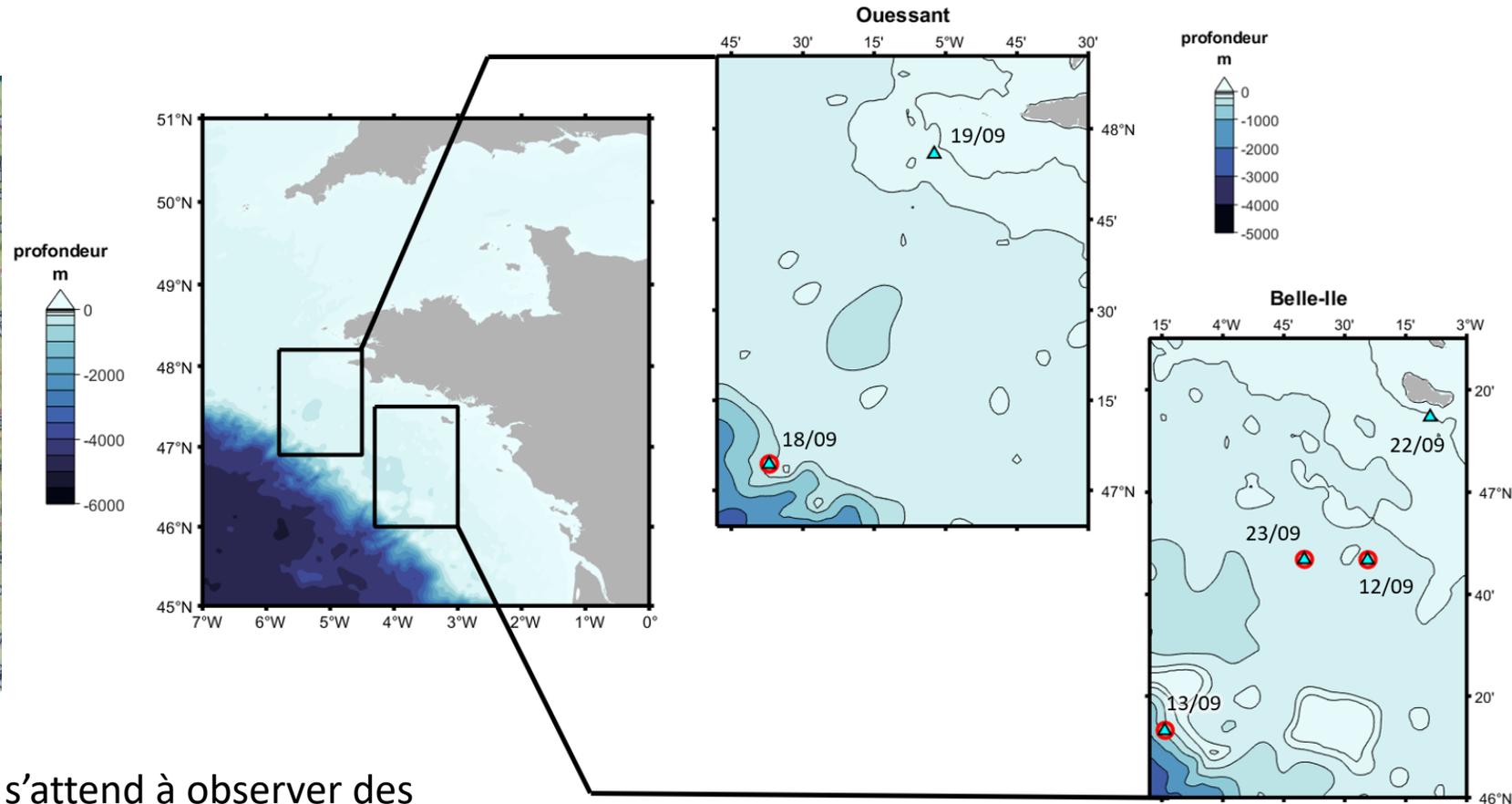
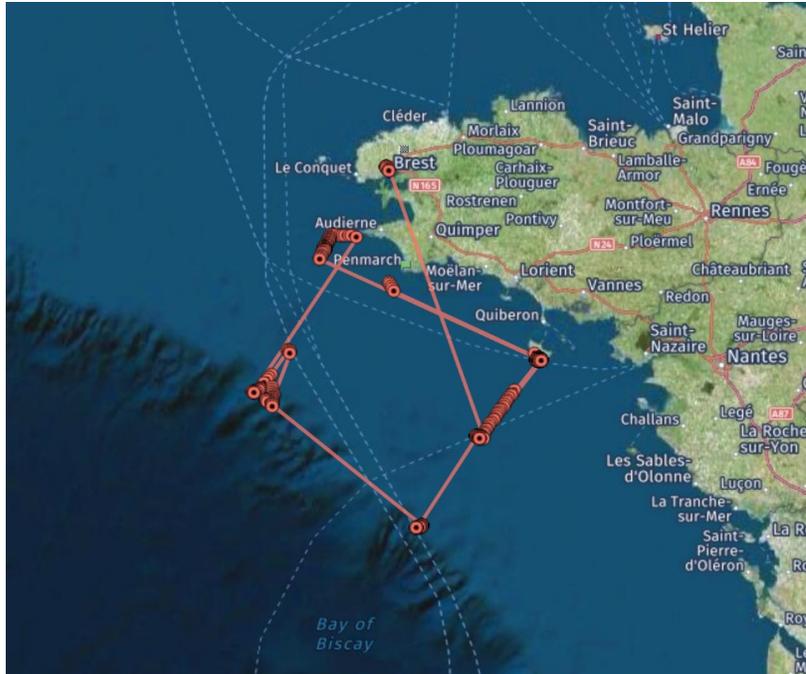
Structure externe

- GPS tracker + flashlight
- Caisson hermétique
- Flotteurs
- Capteur de pression
- Hélice électrique
- RBR CTD autonome
- Empennage

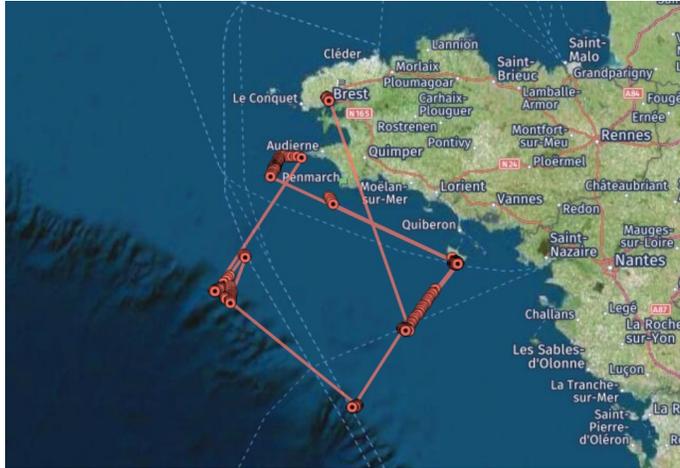


Composants électroniques

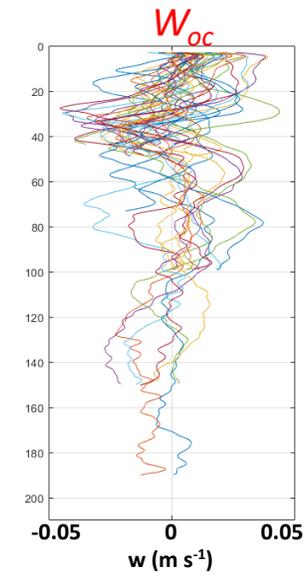
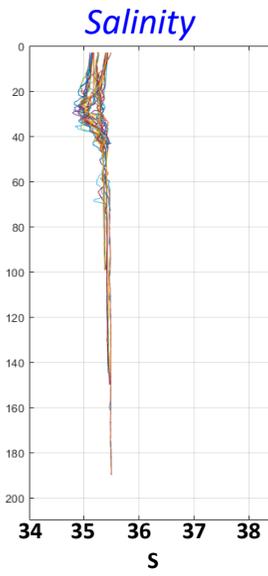
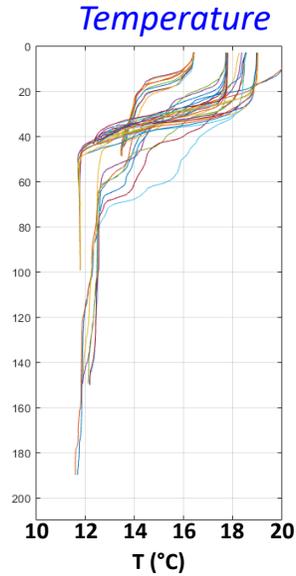
Conception et prototypage :
J.-L. Fuda
(MIO, CNRS)



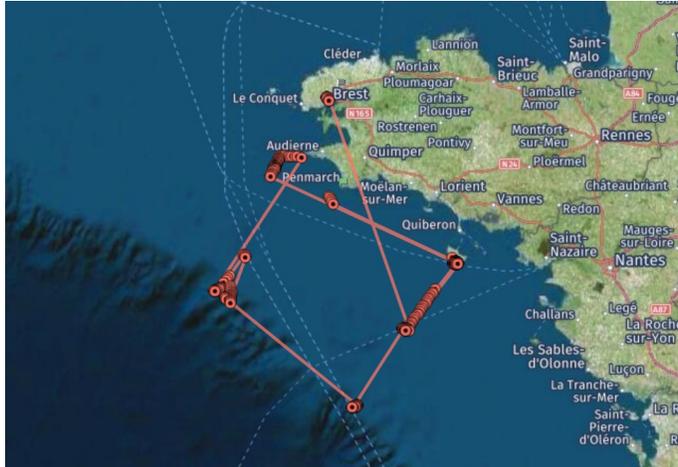
Océan Atlantique : très énergétique, on s'attend à observer des signaux de **vitesse verticales** plus intenses qu'en Méditerranée



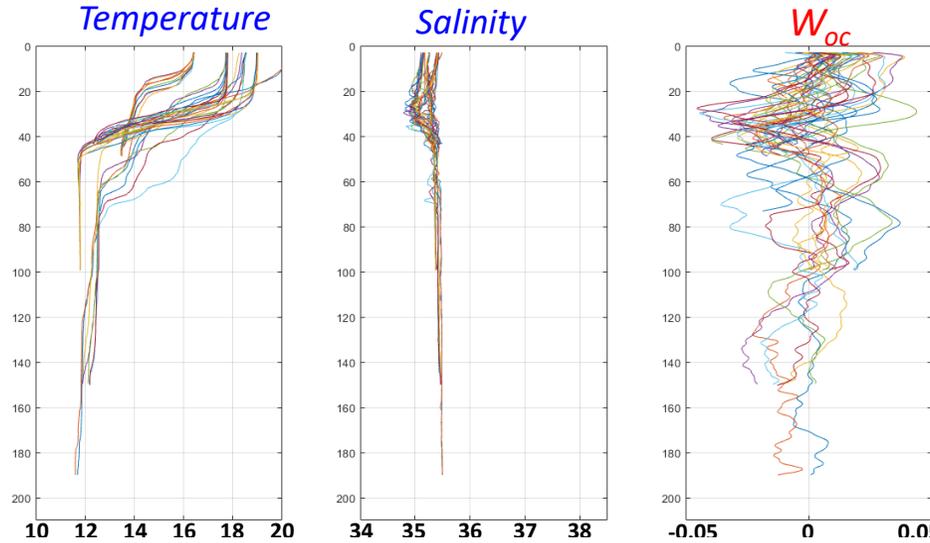
Gascogne 2022 cruise – Sept. 2022



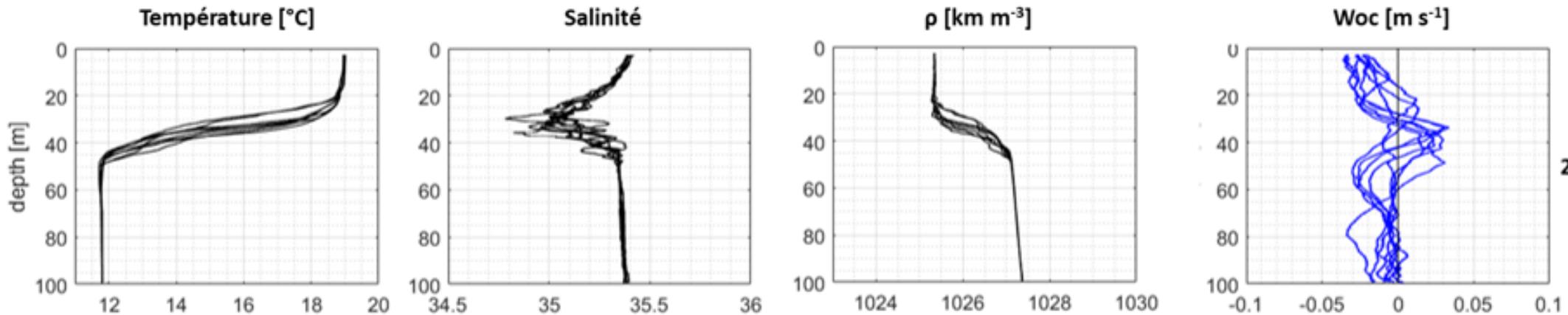
- Nette stratification en température et densité
- Forte hétérogénéité en salinité
- Vitesses verticales intenses



Gascogne 2022 cruise – Sept. 2022

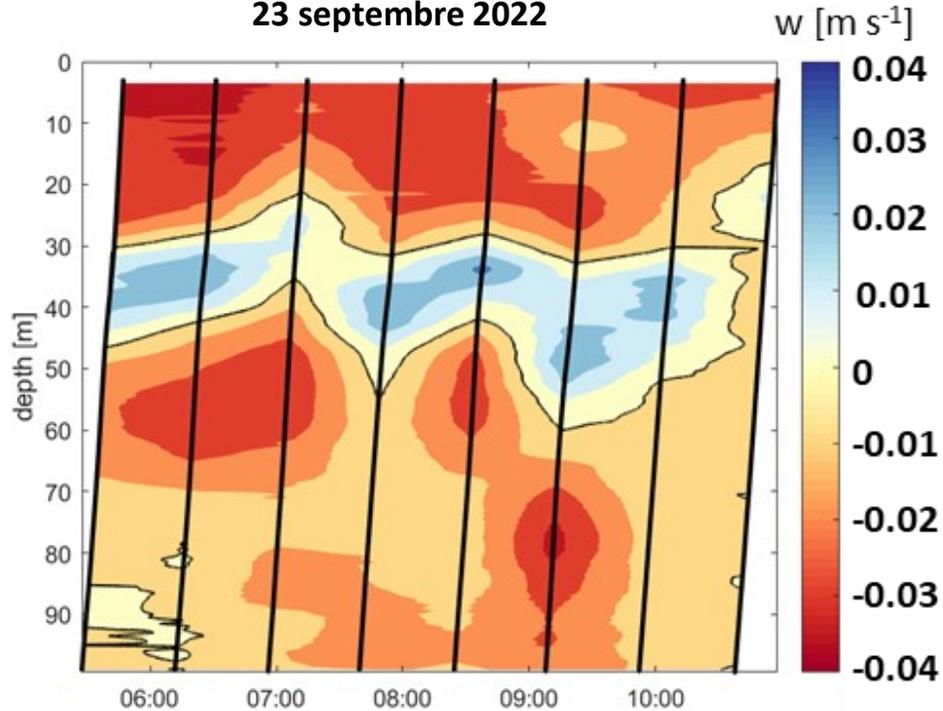


- Nette stratification en température et densité
- Forte hétérogénéité en salinité
- Vitesses verticales intenses



Signaux d'ondes internes puissants

23 septembre 2022



- Interpolation linéaire des profils verticaux de w mesurés par VVP lors des phases de remontées
- Présence d'un probable train d'onde interne (soliton) attendu dans la zone
- Environnement cisailé, cohérence de couche maintenue avec un signal intense \rightarrow variation $\pm 3 \cdot 10^{-2} \text{ m s}^{-1}$

- Poursuite nécessaire de l'analyse en collaboration avec les nombreuses autres mesures in situ (turbulence, hydrologie)
- Reconstitution en laboratoire de l'expérimentation en mer (projet SEALAB, IRPHE) en cours

- **Évolution** du prototype permettant l'élimination de l'effet de sillage
- Méthode indépendante des signaux liés à la biologie
- **Méthode permettant la mesure** des vitesses verticales lorsqu'elles sont présentes $O(10^{-3} - 10^{-2}) \text{ m s}^{-1}$
- Vitesse de remontée lente : **sous échantillonnage** des signaux et processus à **variation rapide**
- **Profileur vertical adaptable : plus value pour les campagnes hauturières avec stations verticales**
équipement par de multiples capteurs (mesures complémentaires possible),
haute résolution de mesures verticales, dériveur Lagrangien
- Prototype peu coûteux, très simple d'utilisation

Fuda **et al.** (2023) Estimating ocean vertical velocities using an autonomous multipurpose profiler. *MetroSea (IEEE)*

- **Couplage des approches directes** FF-ADCP et VVP : BIOSWOT-Med 2023

Introduction

Dynamique océanique

Vitesses verticales état de l'art et stratégies de recherche

Campagne océanographique support : FUMSECK

Résultats des travaux de recherche

I. Mesures in situ ADCP

II.1 Estimation indirecte : équation- ω

II.2 Estimation indirecte : modèle SYMPHONIE

III. Mesure in situ VVP

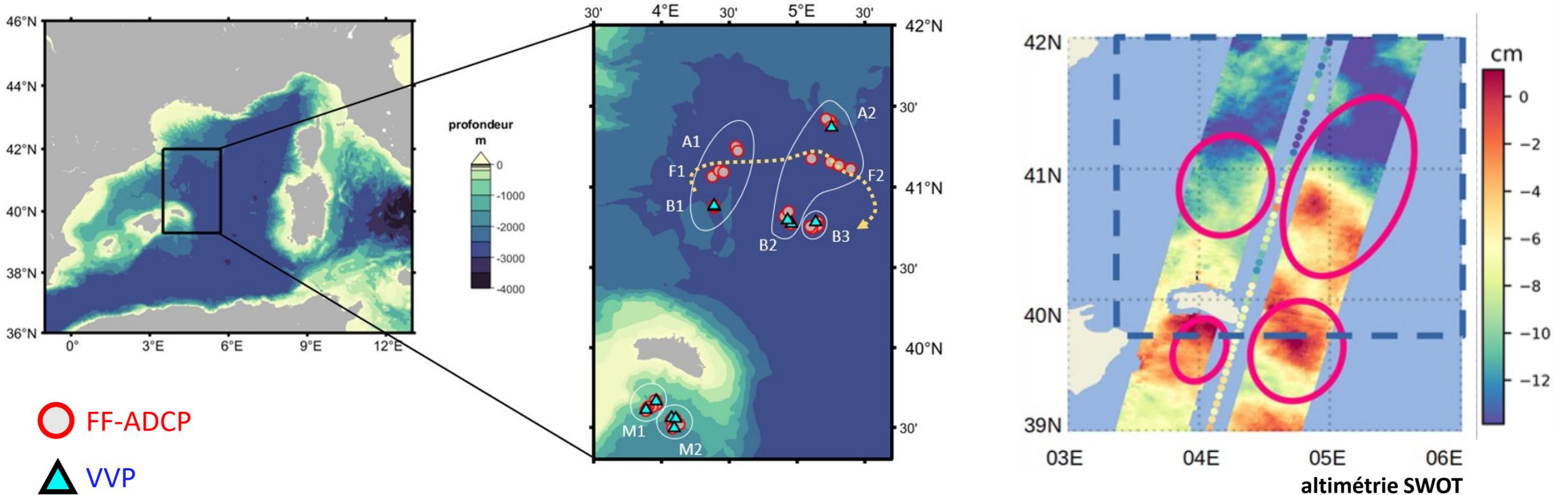
IV. BIOSWOT-Med : aboutissement récent

Conclusion et perspectives

Synthèse personnelle



- Méditerranée Occidentale (Nord îles Baléares), printemps 2023 – *fast sampling phase* (SWOT) **20 avril – 15 mai 2023**
- Stratégie d'échantillonnage adaptative ciblant un front de fine échelle
- Vaste ensemble de données : physiques, chimiques, biogéochimiques, microbiologique, génétique



○ FF-ADCP

▲ VVP

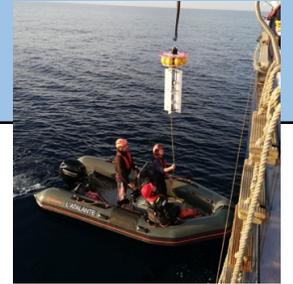
FF-ADCP



- 39 déploiements à 200 m → 190 profils de **w**

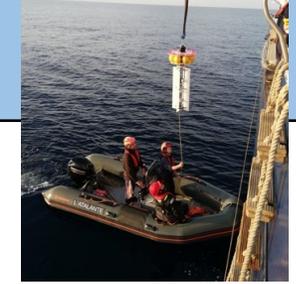
Couverture temporelle : matin / après-midi / soir / nuit

VVP



- 12 déploiements à 200 m → 45 profils de **w**

FF-ADCP



VVP

- 39 déploiements à 200 m → 190 profils de w

- 12 déploiements à 200 m → 45 profils de w

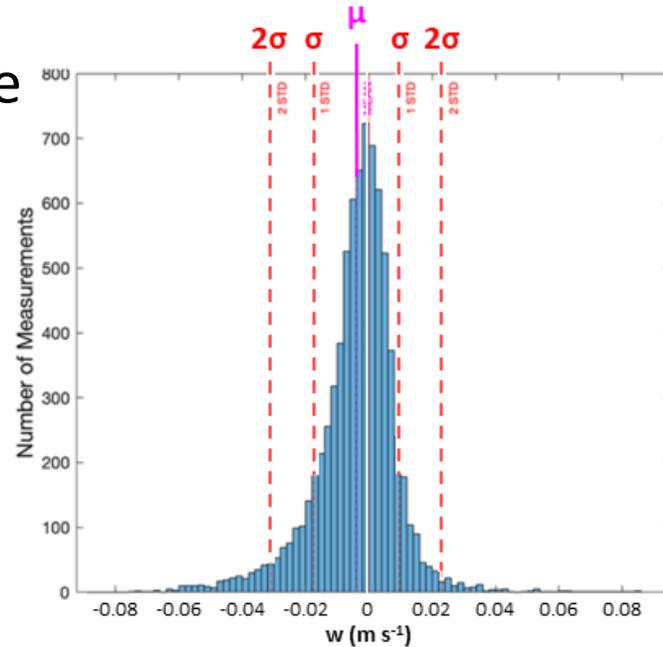
Couverture temporelle : matin / après-midi / soir / nuit

- Distribution globale des mesures de w

asymétrique



$$\sigma \pm 2 \cdot 10^{-2} \text{ m s}^{-1}$$

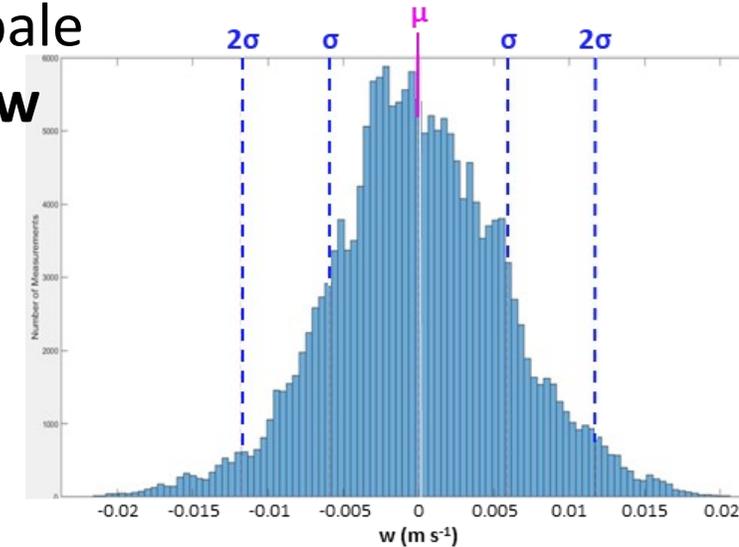


- Distribution globale des mesures de w

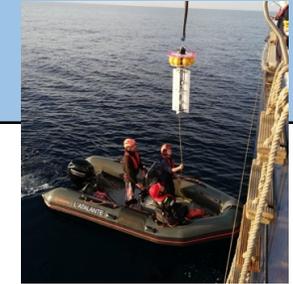
symétrique



$$\sigma \pm 5 \cdot 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$$



FF-ADCP



VVP

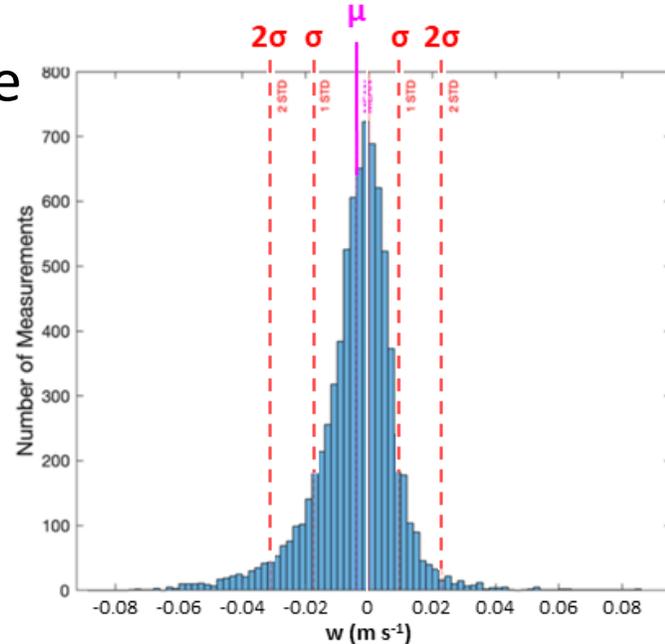
- 39 déploiements à 200 m → 190 profils de w
Couverture temporelle : matin / après-midi / soir / nuit

- Distribution globale des mesures de w

asymétrique



$$\sigma \pm 2 \cdot 10^{-2} \text{ m s}^{-1}$$



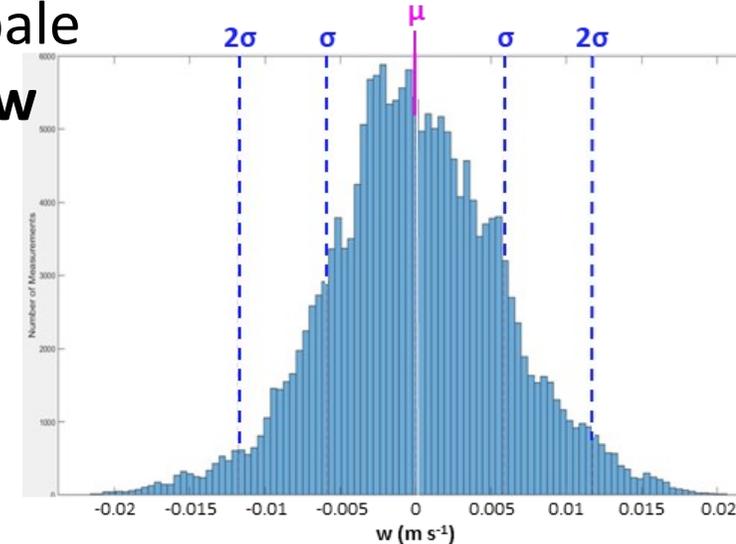
- 12 déploiements à 200 m → 45 profils de w

- Distribution globale des mesures de w

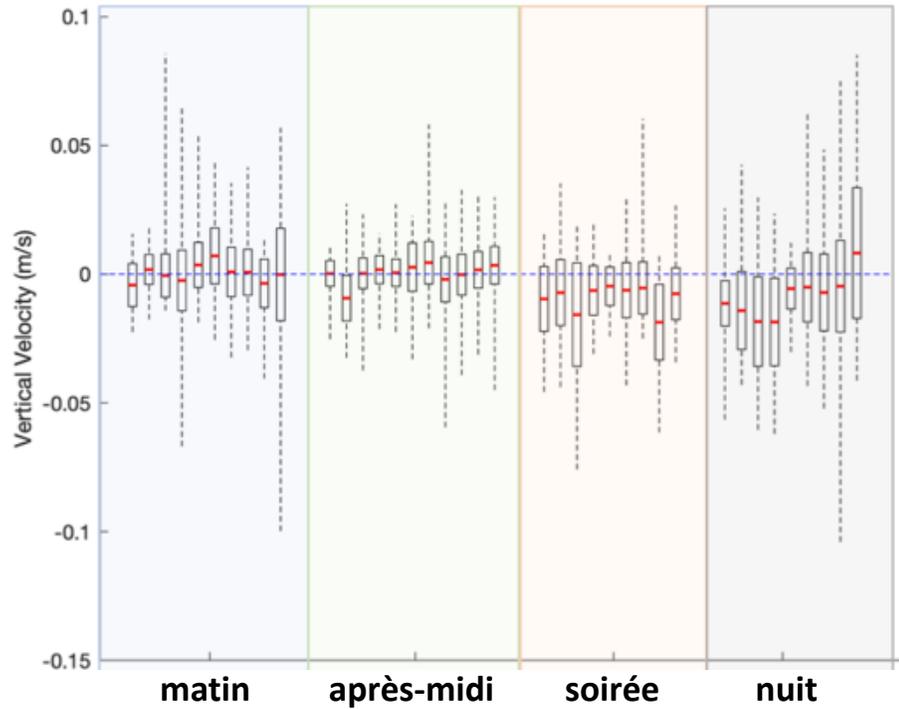
symétrique



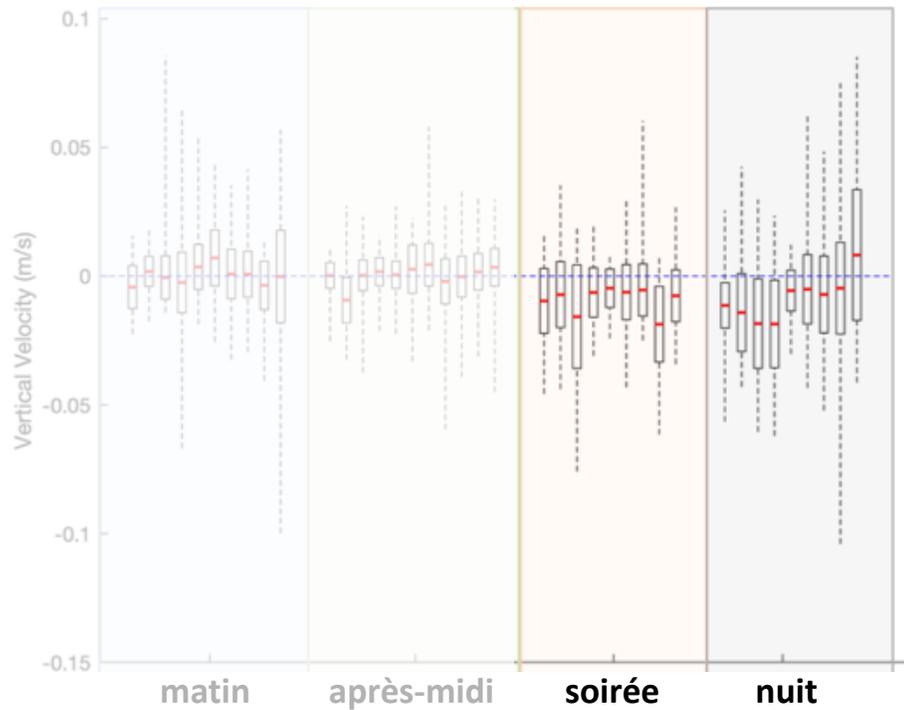
$$\sigma \pm 5 \cdot 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$$



- **Méditerranée** : globalement moins énergétique que Atlantique, on s'attend à des signaux de vitesses verticales peu intenses
Quelques exceptions notables entraînant une asymétrie des distributions de mesure par FF-ADCP : **quelle origine ?**

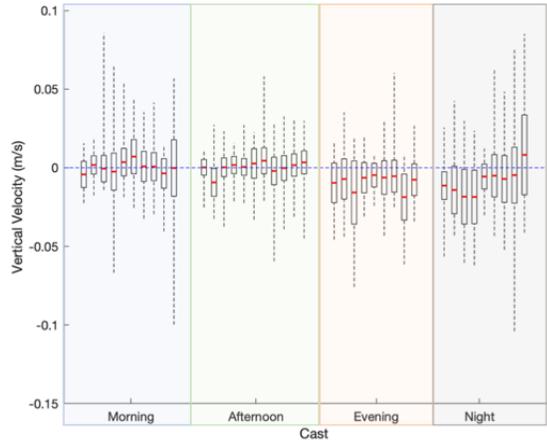


- Pas de tendance claire en fonction des stations
→ essentiellement une variabilité temporelle



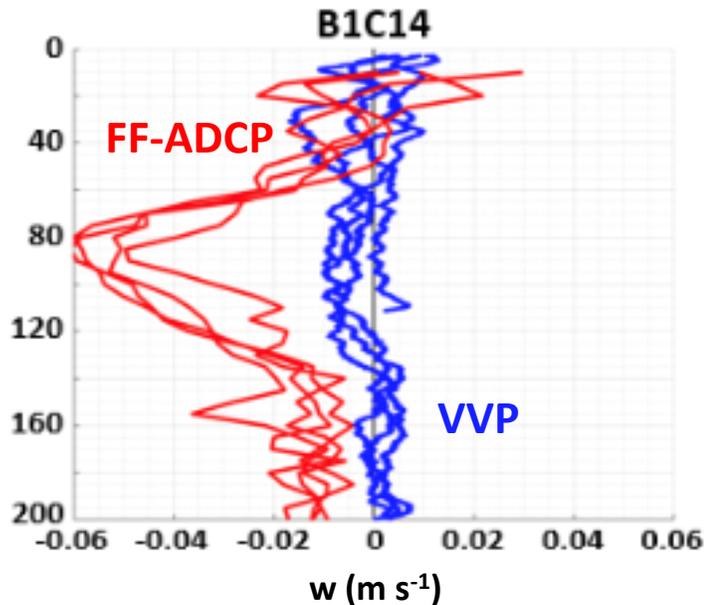
- Pas de tendance claire en fonction des stations
→ essentiellement une variabilité temporelle
- Asymétrie vers des moyennes négatives et variabilité des écarts-types pour les mesures de w nocturnes >> diurnes

Signal biologique probable : Utilisation de l'intensité d'écho pour s'assurer de la nature du signal mesuré par **FF-ADCP**

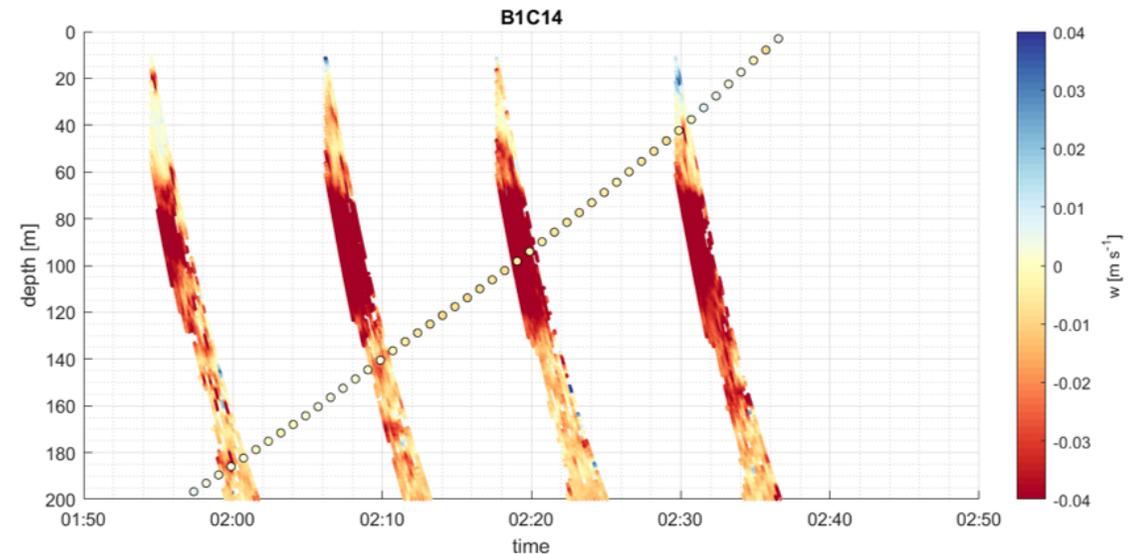


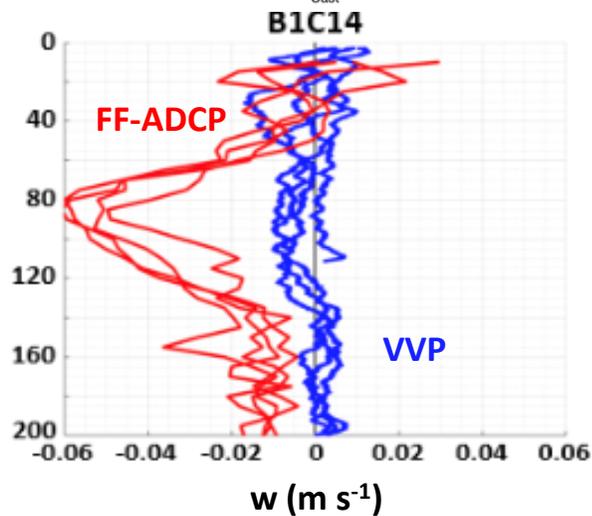
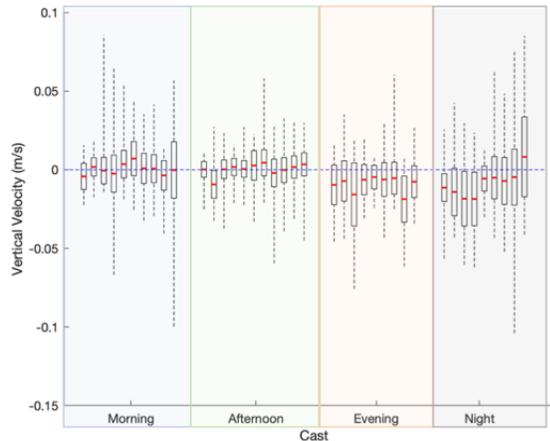
- Pas de tendance claire en fonction des stations
→ essentiellement une variabilité temporelle
- Asymétrie vers des moyennes négatives et variabilité des écarts-types pour les mesures de w nocturnes >> diurnes

Signal biologique probable : Utilisation de l'intensité d'écho pour s'assurer de la nature du signal mesuré par **FF-ADCP**



- Les mesures par **VVP** ne sont pas sensible à ce type de signal

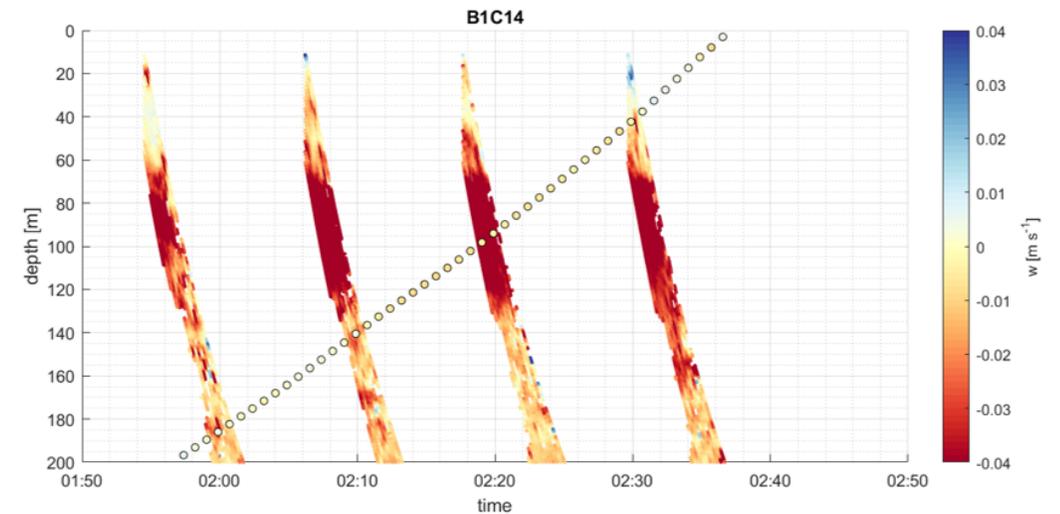




- Pas de tendance claire en fonction des stations
→ essentiellement une variabilité temporelle
- Asymétrie vers des moyennes négatives et variabilité des écarts-types pour les mesures de w nocturnes >> diurnes

Signal biologique probable : Utilisation de l'intensité d'écho pour s'assurer de la nature du signal mesuré par **FF-ADCP**

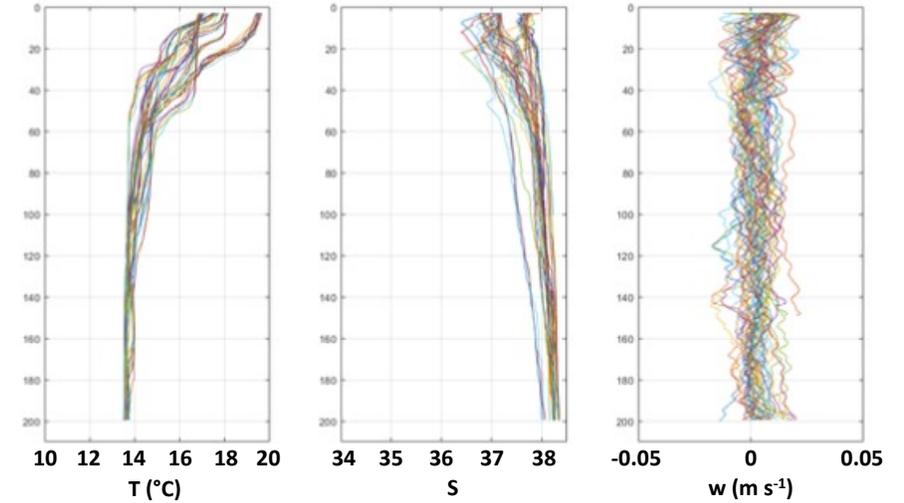
- Les mesures par **VVP** ne sont pas sensible à ce type de signal



En dehors de ces signaux, quelle(s) observation(s) pouvons-nous faire de la comparaison directe des deux méthodes ?

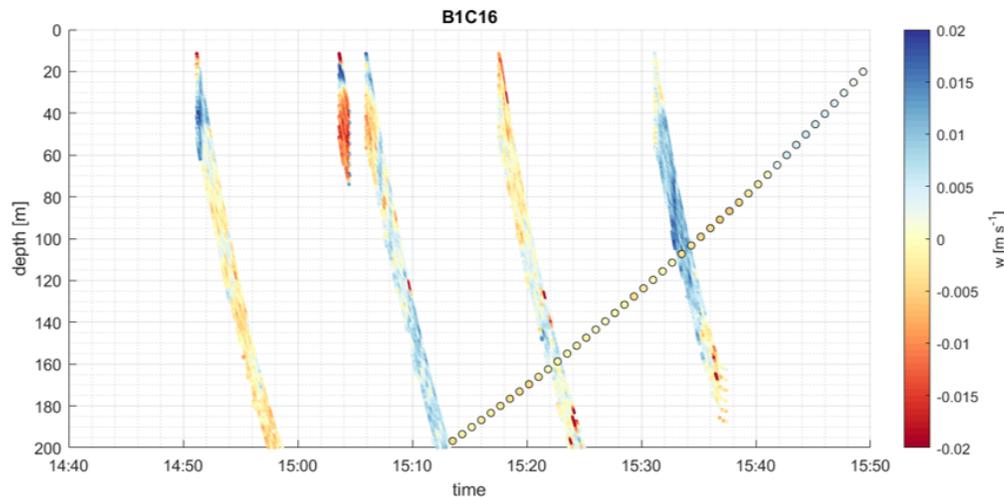
- NW-Méditerranée en avril/mai : **environnement peu stratifié**
- Globalement **peu énergétique** (hors phénomène météo)
→ **vitesses verticales peu intenses** ($\max < 2 \cdot 10^{-2} \text{ m s}^{-1}$)

Ensemble des profils de température, salinité et vitesse verticale (mesures VVP)

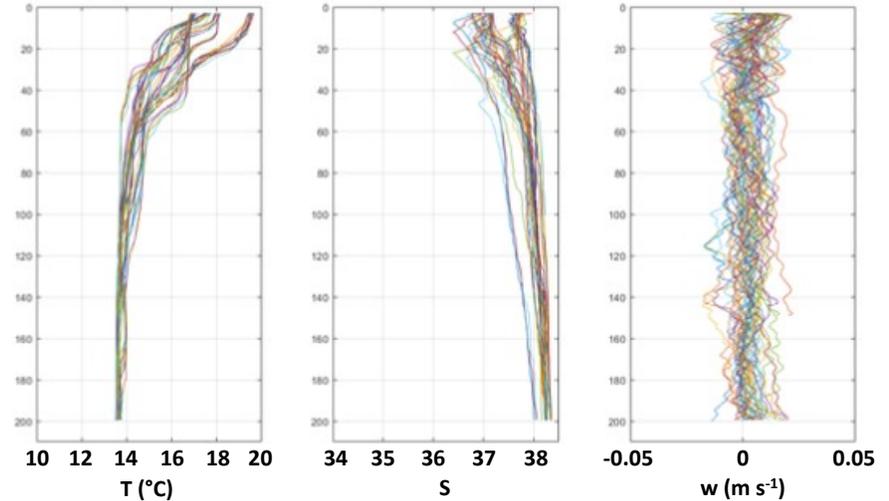


- NW-Méditerranée en avril/mai : **environnement peu stratifié**
- Globalement **peu énergétique** (hors phénomène météo)
→ **vitesses verticales peu intenses** ($\max < 2 \cdot 10^{-2} \text{ m s}^{-1}$)

Comparaison des méthodes de mesure in situ :



Ensemble des profils de température, salinité et vitesse verticale (mesures VVP)



- Mesures **non co-localisées** mais **recouvrement temporel** des échantillonnages
- **Fréquence** des signaux échantillonnés **différentes**
- Ordres de grandeurs similaires : $w \approx 10^{-3} - 10^{-2} \text{ m s}^{-1}$

Complémentarité des approches : FF-ADCP et VVP

- **Première analyse** comparative des résultats obtenus pour chacune des deux méthodes développées
- Ordre de grandeur cible des vitesses verticales océaniques : **quelques 10^{-3} m s^{-1}**
→ **atteints par les deux techniques développées**
- **Différence majeure** observable réside dans la **fréquence d'échantillonnage** des signaux de vitesses verticales : échantillonnage de signaux rapides **FF-ADCP >> VVP**
- La mesure par VVP n'est pas impactée par les signaux biologiques
- **Complémentarité** des techniques ***Free-Fall ADCP*** et ***Vertical Velocity Profiler***

Introduction

Dynamique océanique
Vitesses verticales état de l'art et stratégies de recherche
Campagne océanographique support : FUMSECK

Résultats des travaux de recherche

- I. Mesures in situ ADCP
- II.1 Estimation indirecte : équation- ω
- II.2 Estimation indirecte : modèle SYMPHONIE
- III. Mesure in situ VVP
- IV. BIOSWOT-Med : aboutissement récent

Conclusion et perspectives

Synthèse personnelle

➤ Comment et avec quelle précision mesurer in situ les courants marins verticaux pour la compréhension de la dynamique océanique à haute fréquence spatio-temporelle ?

Free Fall ADCP et Vertical Velocity Profiler : précision cible de w atteignable 10^{-3} m s^{-1}

FF-ADCP : très peu sensible à l'état de mer

VVP : totalement autonome pour l'acquisition des mesures

Systemes peu coûteux, déploiements simple et généralisables à toutes les campagnes optant pour des stratégies d'échantillonnage adaptatives Lagrangiennes

➤ Comment et avec quelle précision mesurer in situ les courants marins verticaux pour la compréhension de la dynamique océanique à haute fréquence spatio-temporelle ?

Free Fall ADCP et Vertical Velocity Profiler : précision cible de w atteignable 10^{-3} m s^{-1}

FF-ADCP : très peu sensible à l'état de mer

VVP : totalement autonome pour l'acquisition des mesures

Systemes peu coûteux, déploiements simple et généralisables à toutes les campagnes optant pour des stratégies d'échantillonnage adaptatives Lagrangiennes

➤ Comment mieux comprendre la dynamique de fine échelle dans sa globalité ? Et quelles sont les implications de ces vitesses verticales de fine échelle pour la biologie ?

Equation oméga : ordre de grandeur des w estimées = 10^{-5} à 10^{-4} m s^{-1}

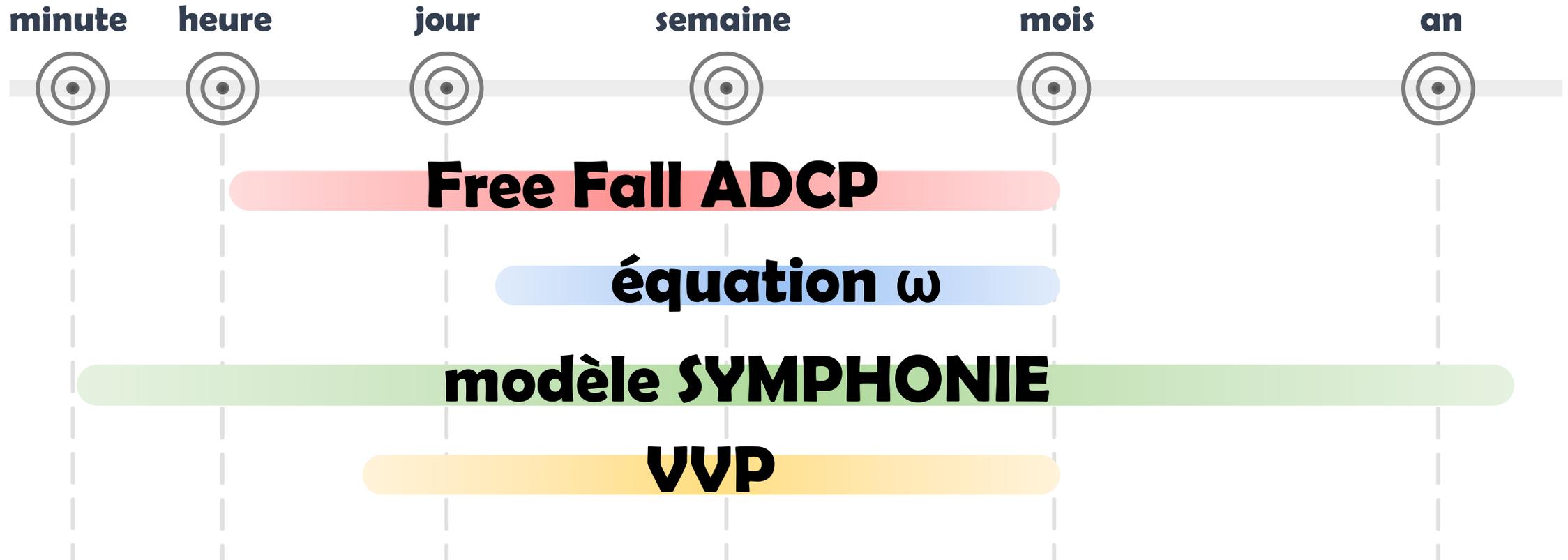
Vision synoptique de la bordure Sud-Ouest d'une structure de fine échelle bien plus stable, à la fois dans sa durée de vie et dans sa dynamique

Modèle numérique SYMPHONIE : ordre de grandeur des w modélisées = 10^{-5} à 10^{-3} m s^{-1}

Étude de l'influence d'une tempête courte mais intense sur la colonne d'eau : déclenchement d'oscillations quasi-inertielles, intensification de la composante verticale, influence sur les paramètres de BGC.

➤ Quelle(s) approches(s) envisager ? Pour l'étude de quelle(s) dynamique(s) ?

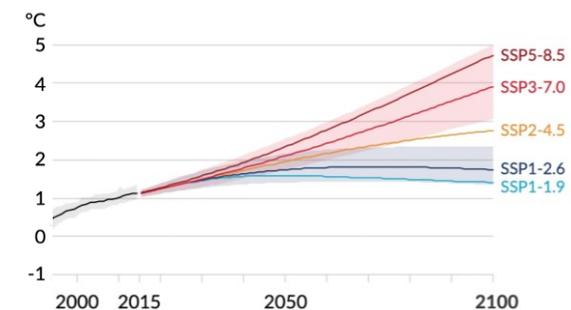
Fréquence d'échantillonnage / fréquence processus échantillonné



- Analyse data PROTEVS-Gascogne et BIOSWOT-Med en collaboration avec les différentes équipes impliquées
- Poursuite du développement instrumental : protocole de déploiement du VVP en couche fine, en flottilles
synergie VVP - ADCP nouvelle génération
- Projets à venir :
 - Projets HOPE-vv** → étude de la capacité des océans tropicaux à séquestrer du CO₂ via des systèmes de pompes de carbone alternatifs, au moyen d'outils innovants
axe de recherche sur la dynamique verticale (projet AMIDEX Blanc, 2023-27, PI: A. Petrenko)
 - Projet SEALAB** → reconstitution en laboratoire des environnements de campagne océanographiques (PROTEVS-Gascogne, BIOSWOT-Med) et des structures océaniques de fine échelle observées
axe de recherche sur la dynamique verticale
- Poursuite directe de travaux de recherche :
 - thèse de M. Arnaud (2023-2026, MIO)
 - post-doc de M. Aulnette (2023 – 2025+, IRPHE) & post-doc HOPE-vv (2024 – 2027, MIO)

Couplage avec les environnements de données de biologie et biogéochimie permettant :

1. Une meilleure compréhension des processus physiques océaniques
2. Une ré-évaluation des grand flux BGC et de la pompe biologique
Une meilleure compréhension des dynamiques de communautés planctoniques
3. Une analyse plus précise du changement climatique
Une meilleure compréhension de ses processus de rétroaction
Ainsi que de meilleures prévisions de ses retombées



GIEC, 2023

Publications

- Comby et al 2022, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*
- Comby et al 2023, *Journal of Water Resource and Ocean Science*
- Barrillon et al 2023, *Biogeoscience*
- Fuda et al 2023, *MetroSea (IEEE)*
- Penven et al, *in prep.*

Conférences

- **EGU 2021, EGU 2022**
- **Ocean Sciences Meeting 2022**
- **Workshop Interaction Océan – Atmosphère 2021**
- **Congrès des doctorants (ED251) 2021**
- Journées médiation scientifique 2021, 2022

Campagnes en Mer

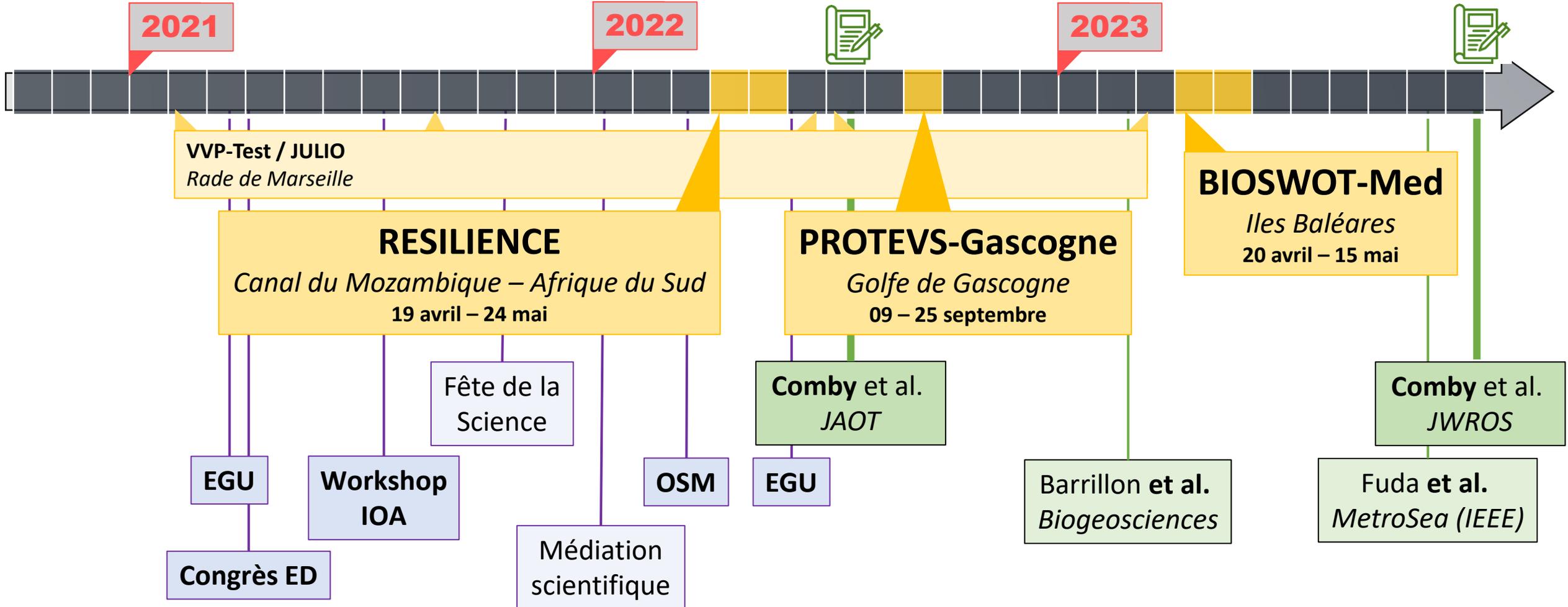
- **RESILIENCE 2022** : Canal du Mozambique – Afrique du Sud
- **PROTEVS-Gascogne 2022** : Golfe de Gascogne
- **BIOSWOT-Med 2023** : Iles Baléares
- **VVP-Test / JULIO 2021 à 2023** : Rade de Marseille

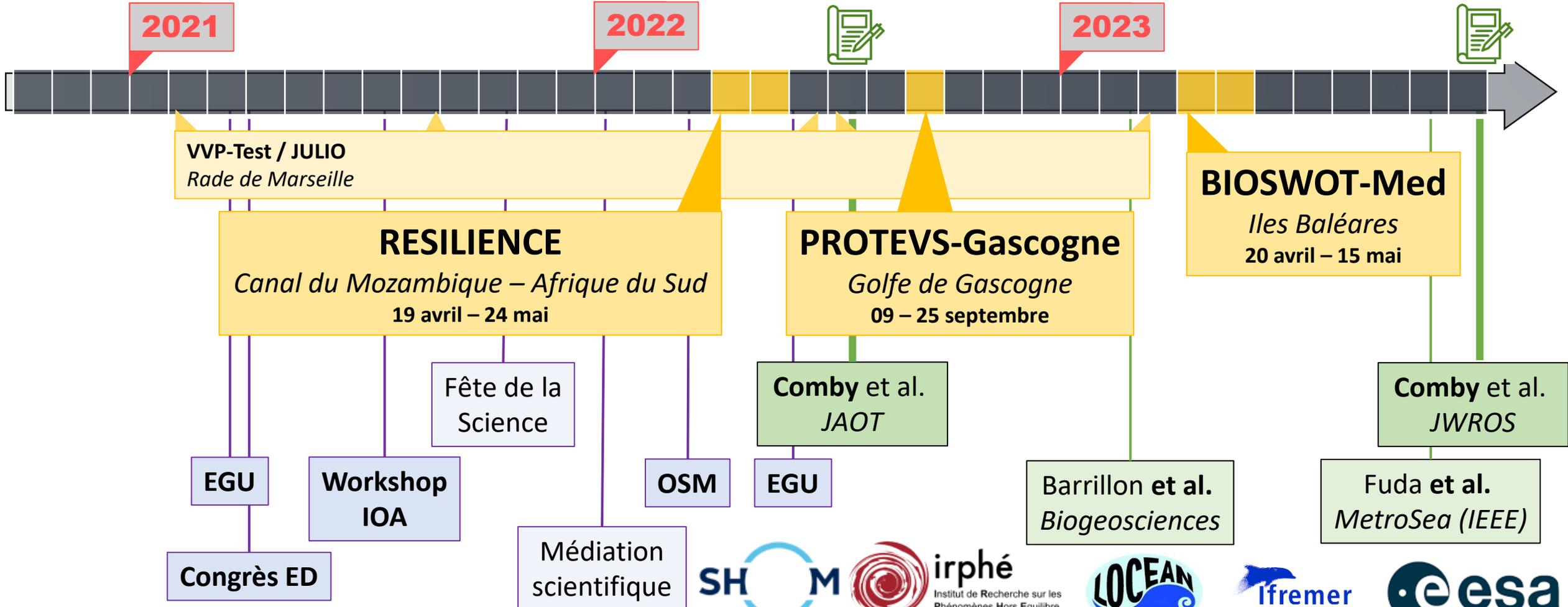
Développement instrumental

- VVP : **atelier SAM / soufflerie / piscine**
(fosse COMEX) / **mer** (rade de Marseille)
- FF-ADCP : **atelier SAM / mer** (rade de Marseille)

Encadrement

Stagiaires du niveau Licence au Master





Collaborations



Merci de votre attention !

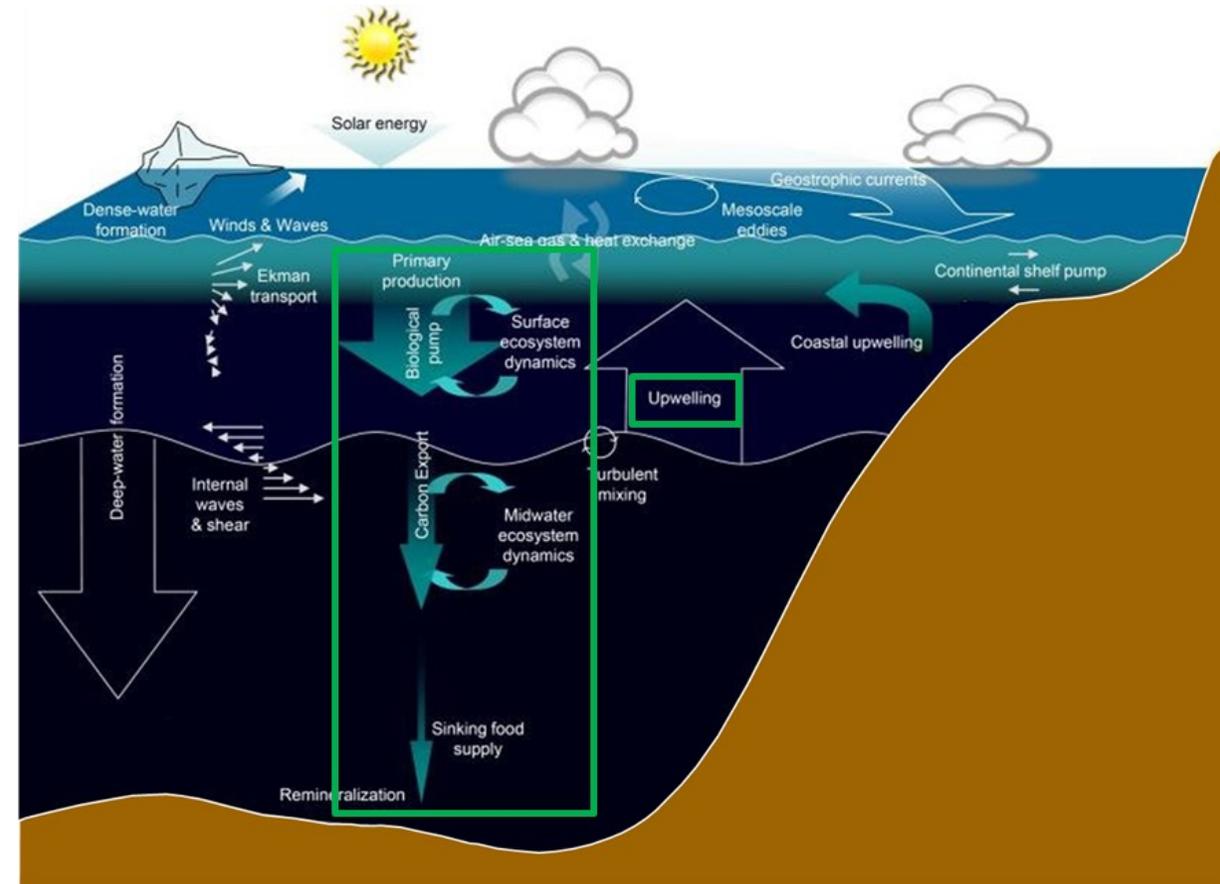
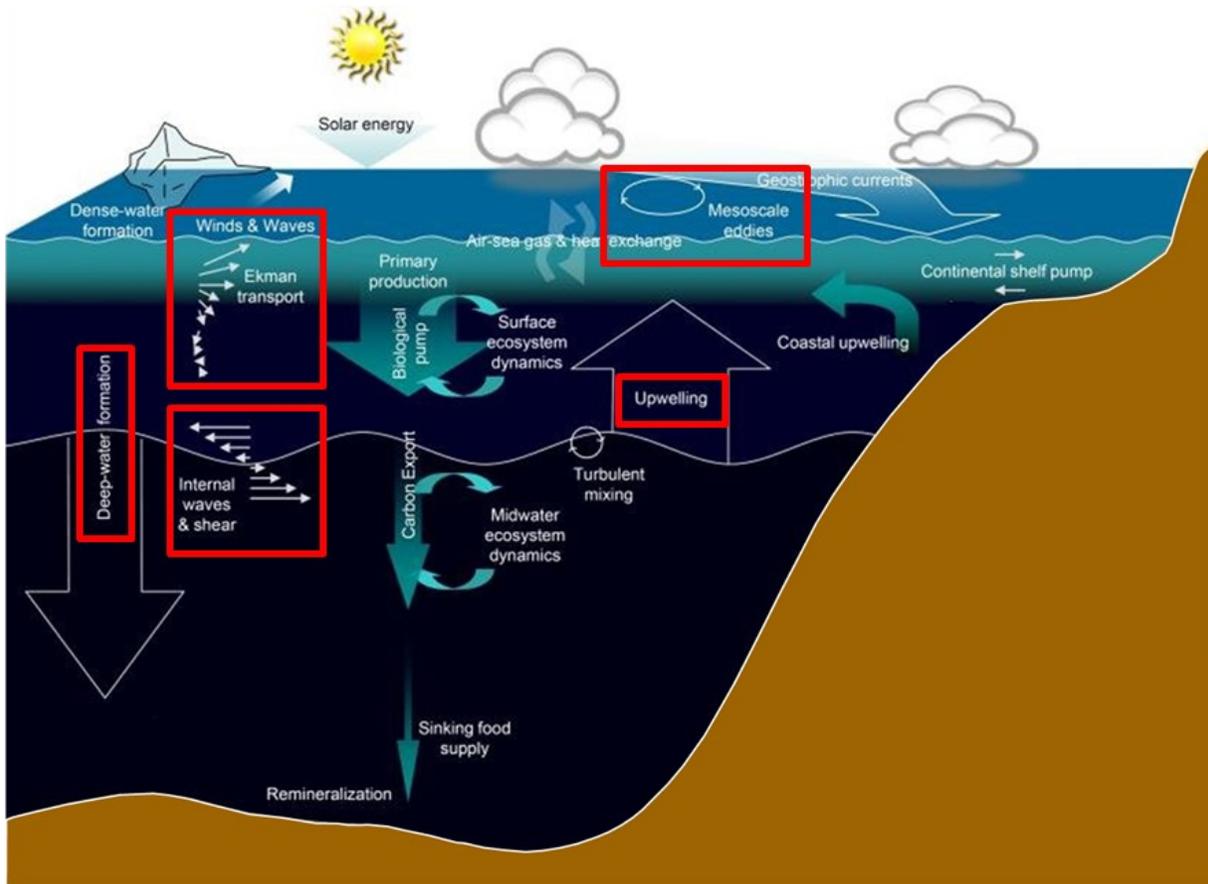


Extra-slides

Processus océaniques générant/influencés par la présence de vitesses verticales

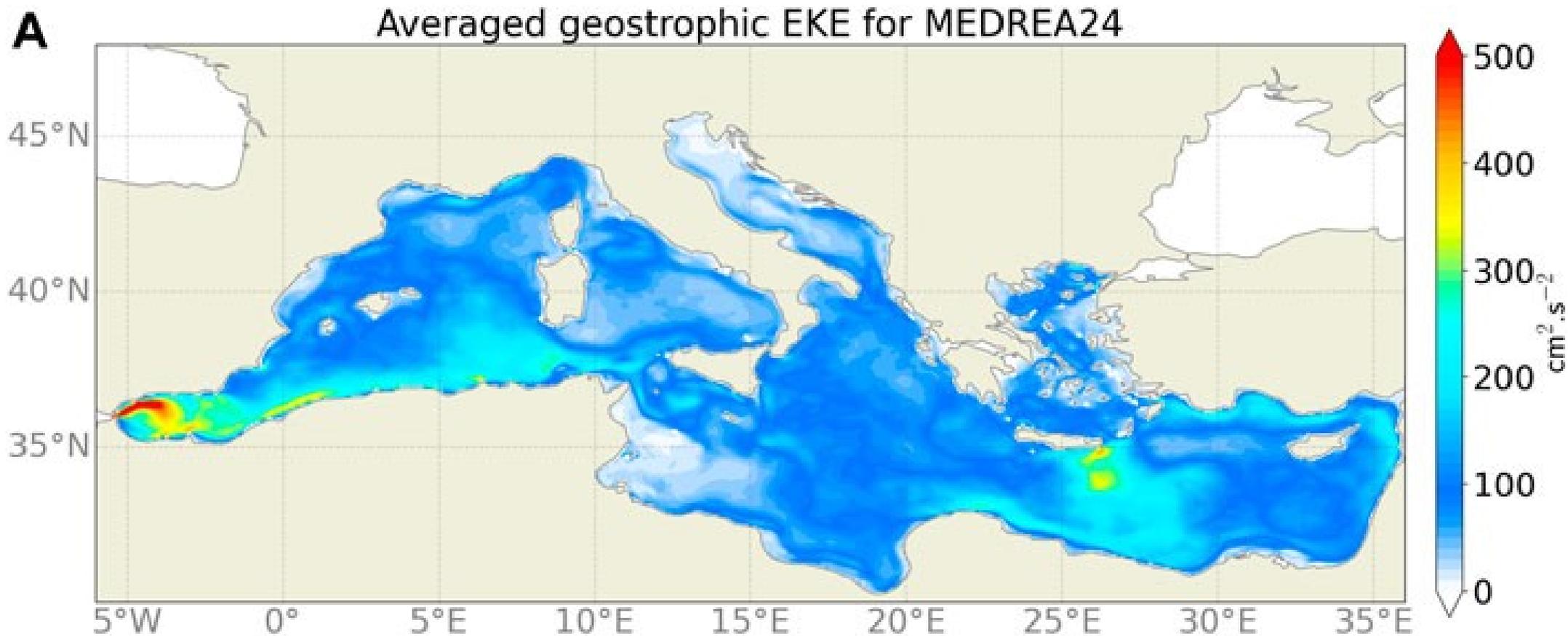
Physique

Biologie et biogéochimie



Adapté de Toma et al. 2013

Carte paramètre EKE - *Eddy Kinetic Energy*



Mesure des w avec SWOT

(1/4)

By generalizing the \mathbf{Q} -vector form of the QG omega equation of Hoskins et al. (1978) to include all other ageostrophic processes, Giordani et al. (2006) show that the 3D vertical velocity ω in the primitive equation oceanic system can be inverted from:

$$f^2 \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} + \nabla_h (N^2 \cdot \nabla_h \omega) = \nabla_h \cdot \mathbf{Q}, \quad (1)$$

where $N^2 = -(g/\rho_0)\partial p/\partial z$ is squared buoyancy frequency, ∇_h is the horizontal gradient operator, and the \mathbf{Q} vector is composed of contributions from six physical processes:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{Q}_{th} + \mathbf{Q}_{dm} + \mathbf{Q}_{tg} + \mathbf{Q}_{tag} + \mathbf{Q}_{dag} + \mathbf{Q}_{dr}, \quad (2)$$

\mathbf{Q}_{th} denotes the turbulent buoyancy forcing,

\mathbf{Q}_{dm} the turbulent momentum forcing,

\mathbf{Q}_{tg} the geostrophic kinematic deformation,

\mathbf{Q}_{tag} the ageostrophic kinematic deformation,

\mathbf{Q}_{dag} the thermal wind imbalance deformation

\mathbf{Q}_{dr} the material derivative of the thermal wind imbalance (TWI)

Qiu, B., Chen, S., Klein, P., Torres, H., Wang, J., Fu, L., & Menemenlis, D. (2020). Reconstructing Upper-Ocean Vertical Velocity Field from Sea Surface Height in the Presence of Unbalanced Motion, *Journal of Physical Oceanography*, 50(1), 55-79. from <https://journals.ametsoc.org/view/journals/phoc/50/1/jpo-d-19-0172.1.xml>

Qiu et al. (2020)

$$\mathbf{Q}_{th} = -\frac{g}{\rho_0} \nabla_h \left(\frac{\partial F_{x_i}}{\partial x_i} \right) \quad (\text{A6})$$

denotes the forcing by turbulent buoyancy fluxes, and

$$\mathbf{Q}_{dm} = -\frac{f}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial z} \left(\mathbf{k} \times \frac{\partial \boldsymbol{\tau}_{x_i}}{\partial x_i} \right) \quad (\text{A7})$$

denotes the forcing by turbulent momentum fluxes.

In contrast to the above turbulent mixing forcings, the remaining four vectors in Eq. (A5) represent dynamic forcing. Specifically,

$$\mathbf{Q}_{tg} = \frac{2g}{\rho_0} (\nabla_h \mathbf{u}_g)^T \cdot \nabla_h \rho \quad (\text{A8})$$

denotes the kinematic deformation caused by the geostrophic horizontal flow and is known as the QG \mathbf{Q} vector, or the frontogenesis vector (Hoskins et al. 1978). Similarly,

$$\mathbf{Q}_{tag} = \frac{2g}{\rho_0} (\nabla_h \mathbf{u}_{ag})^T \cdot \nabla_h \rho \quad (\text{A9})$$

denotes the kinematic deformation caused by the ageostrophic horizontal flow. In Eq. (A5), \mathbf{Q}_{dag} de-

notes deformation caused by the thermal wind imbalance $f \partial \mathbf{u}_{ag} / \partial z$:

$$\mathbf{Q}_{dag} = -f [\nabla_h (\mathbf{k} \times \mathbf{u})]^T \cdot \frac{\partial \mathbf{u}_{ag}}{\partial z}. \quad (\text{A10})$$

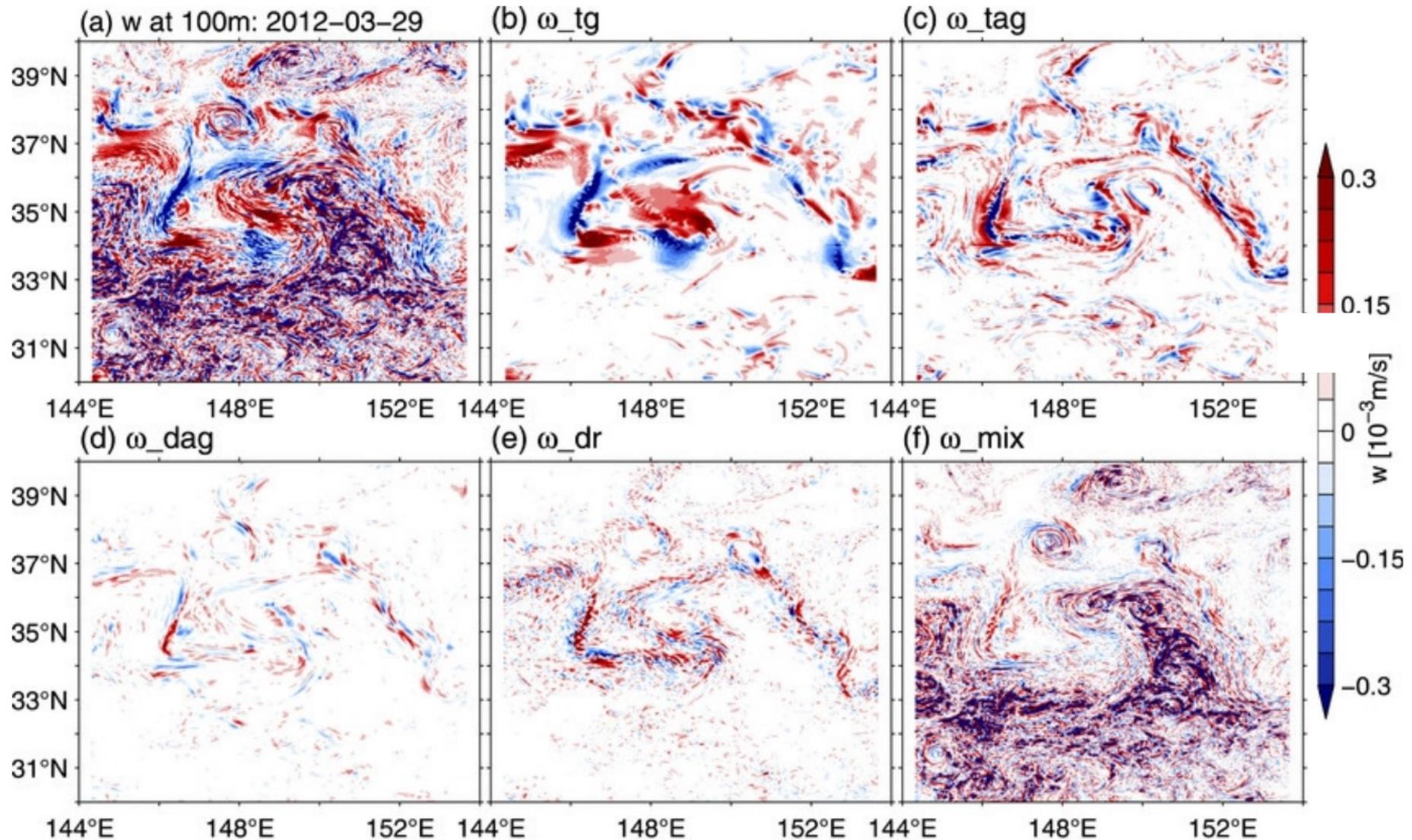
As noted in Giordani et al. (2006), the \mathbf{Q}_{dag} forcing represents the stretching and reorientation by the total \mathbf{u} field of the preexisting ageostrophic horizontal pseudovorticity. Last, \mathbf{Q}_{dr} in Eq. (A5) denotes the forcing by the material derivative of the thermal wind imbalance and is given by

$$\mathbf{Q}_{dr} = -f \mathbf{k} \times \frac{D}{Dt} \left(\frac{\partial \mathbf{u}_{ag}}{\partial z} \right). \quad (\text{A11})$$

Mesure des w avec SWOT

(3/4)

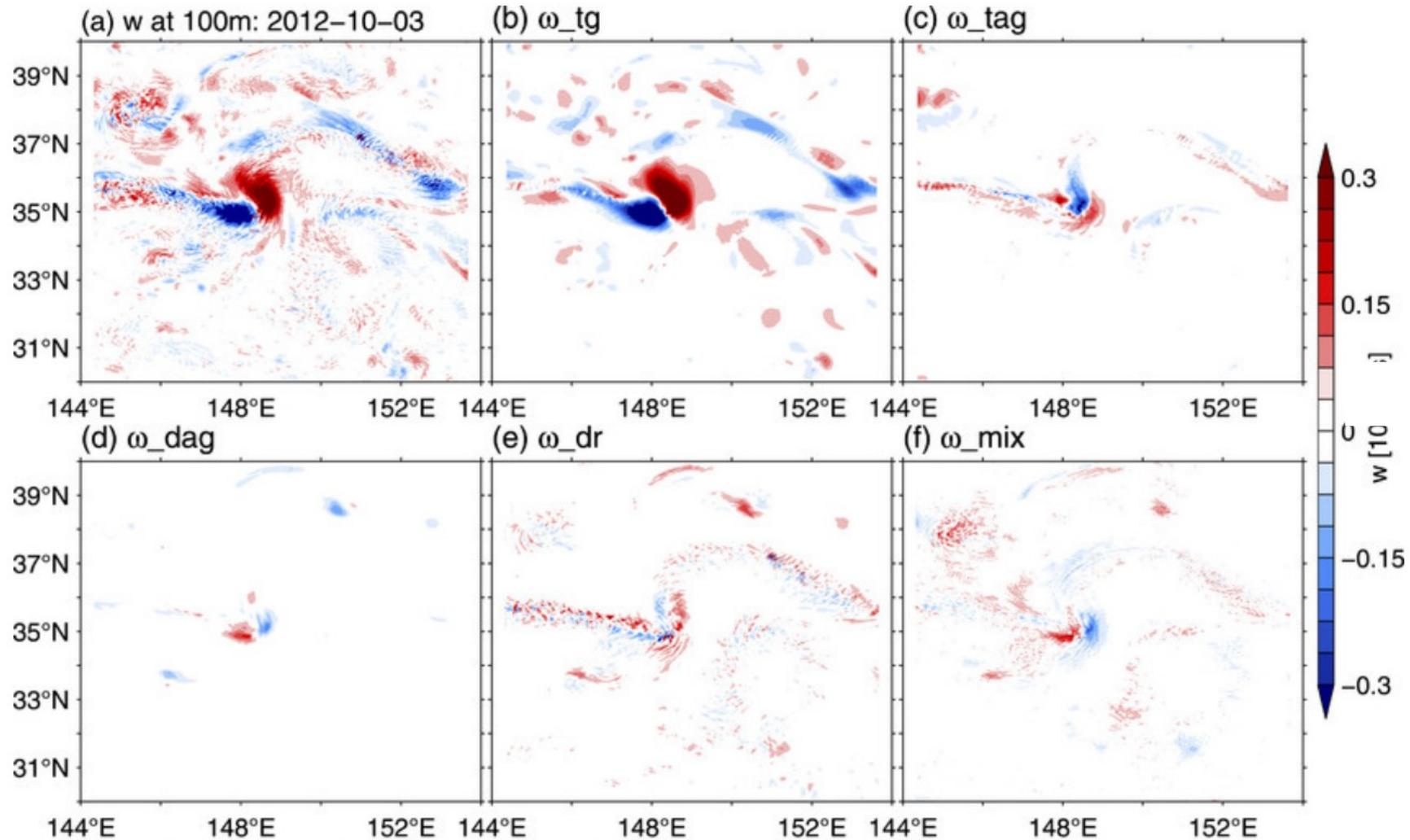
Qiu et al. (2020)



Mesure des w avec SWOT

(4/4)

Qiu et al. (2020)



Typical summertime low-pass filtered (a) vertical velocity from LLC4320 and (b)–(f) its components from the ω Eq. (2) at 100-m depth, centered on Oct 2012. (g)–(l) As in (a)–(f), but at 400-m depth.

Analyse sur les sources d'erreur (comby et al. 2022)

(1/3)

Source d'erreur (écart-type observé : $O(10^{-2})$ m/s) : quelle(s) origine(s) ?

Tableau synthétisant les différentes configurations de simulation d'erreurs de mesures

σ_{err}		-2 °	-1.5 °	-1 °	-0.5 °	0	+0.5 °	+1 °	+1.5 °	+2 °
0 (i.e. cste)	Ai. Tilt accuracy	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
0.05°	Aib. pitch/roll	A1b	A2b	A3b	A4b	A5b	A6b	A7b	A8b	A9b
$3 \cdot 10^{-3}$ m/s	Aic. u/v	A1c	A2c	A3c	A4c	A5c	A6c	A7c	A8c	A9c
$3 \cdot 10^{-3}$ m/s	Aid. w_s	A1d	A2d	A3d	A4d	A5d	A6d	A7d	A8d	A9d
	Aibcd. all	A1bcd	A2bcd	A3bcd	A4bcd	A5bcd	A6bcd	A7bcd	A8bcd	A9bcd

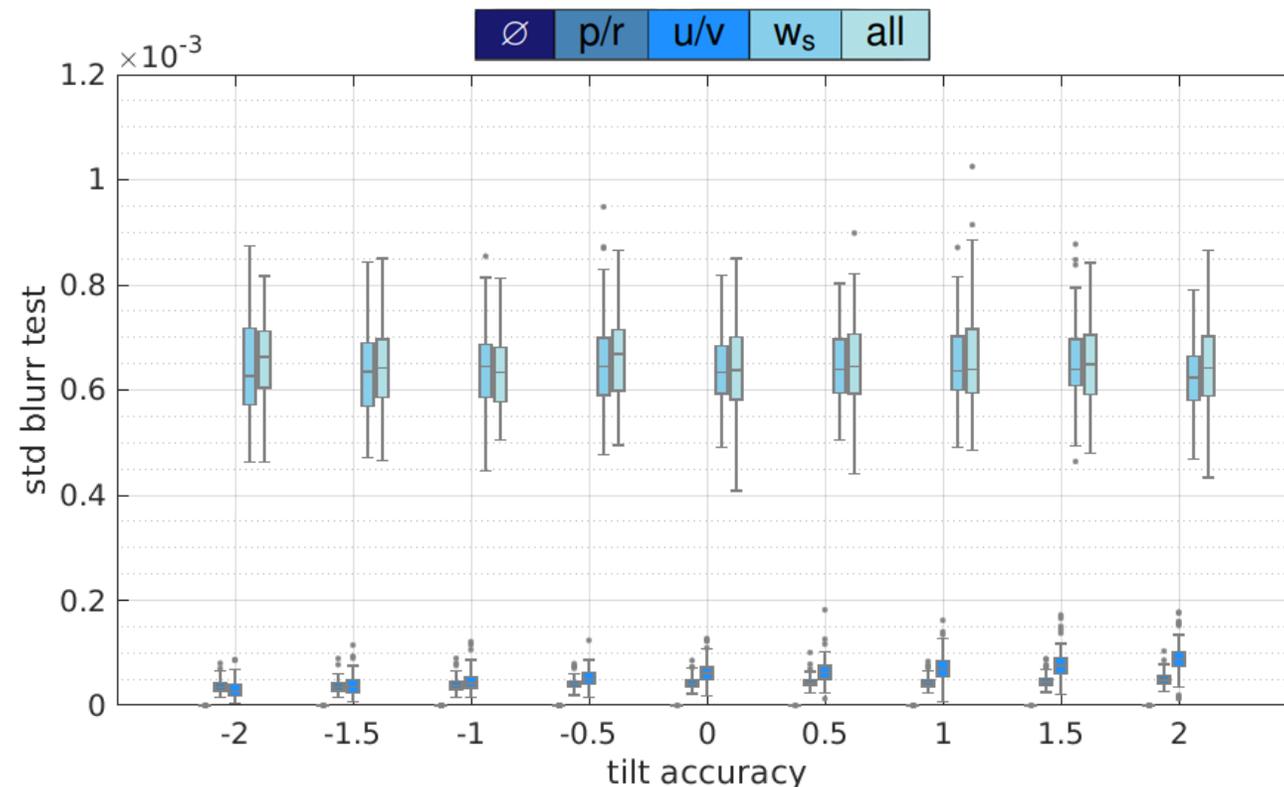
➔ Génération de 45 tests x 6 stations x 100 tirages x 500 valeurs artificielles = $135 \cdot 10^5$ données

Échantillonnage artificiel pour **tester la réponse du traitement aux variations aléatoires de mesure** → bilan des sources d'erreur

Analyse sur les sources d'erreur (comby et al. 2022)

(2/3)

Source d'erreur (écart-type observé : $O(10^{-2})$ m/s) : quelle(s) origine(s) ?



Distribution des écart-types

→ Étude de l'influence de chaque source d'erreur sur l'écart-type observé après traitement de w

→ w_s : 0.5 – 1 . 10^{-3} m/s

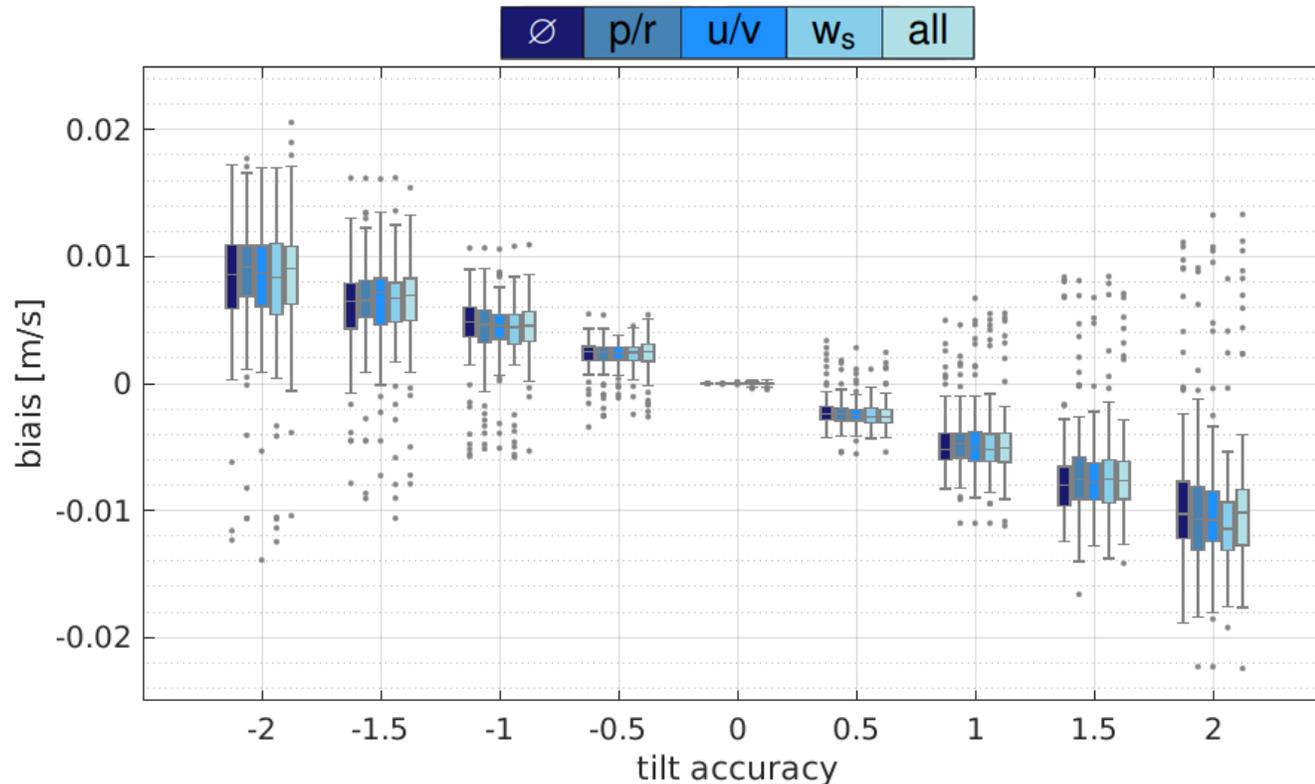
→ p/r et u/v : 0.1 . 10^{-3} m/s

Les erreurs de mesures instrumentales basées sur les données constructeur ne contribuent pas significativement à l'écart-type observé sur la mesure de w .

Analyse sur les sources d'erreur (comby et al. 2022)

(3/3)

Source d'erreur (écart-type observé : $O(10^{-2})$ m/s) : quelle(s) origine(s) ?



biais dans l'inclinaison
des dalles acoustiques

→ Étude des différences

$\text{biais} = w_{\text{ocean}} - \text{distrib}_{\text{artificielle}}$

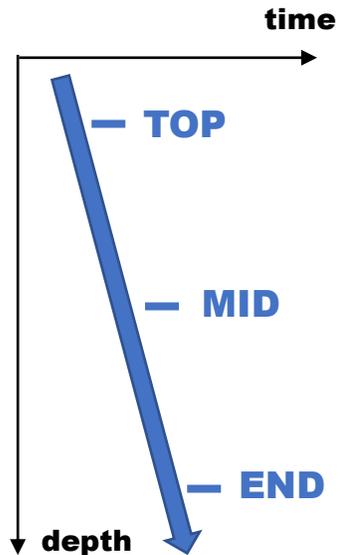
→ $\pm 1.5 \cdot 10^{-2}$ m/s

Principale contribution à l'erreur de mesure : **justesse des tilts**
Information constructeur $\pm 2^\circ$ → on observe $O(1 \cdot 10^{-2})$ m/s soit $\pm 1^\circ$

Évaluation de la propagation d'erreur sur la mesure de pression

Étude sur 3 pings : **Plongée 1**, position **TOP, MID, END**

Station SENTINEL (5th beam) : n°1 , bin n°2



1. TIRAGE ALÉATOIRE SUR LA MESURE DE PRESSION

Étude des variations en phase FIXE : $\sigma_{CTD} = [m]$

Bruit aléatoire par tirage randn : $\sigma = \sigma_{CTD}$

NB. Erreur **maximale** sur la mesure de pression

→ Observation des variations sur les histogrammes de w

2. TIRAGE ALÉATOIRE SUR LA MESURE DE PRESSION (w_{CTD})

1 Utilisation du bruit en phase FIXE (24 Hz) : $\sigma_{CTD} = 0.2139 m$

- $\sigma = O(2 \cdot 10^{-1}) m/s$
- $\sigma = O(4 \cdot 10^{-2}) m/s$

NB. Résultats identiques en utilisant les caractéristiques SeaBird : $\pm 0.015\%$ of full scale (1400m)

2 Utilisation du bruit en phase FIXE (1 Hz) : $\sigma_{CTD} = 0.1616 m$

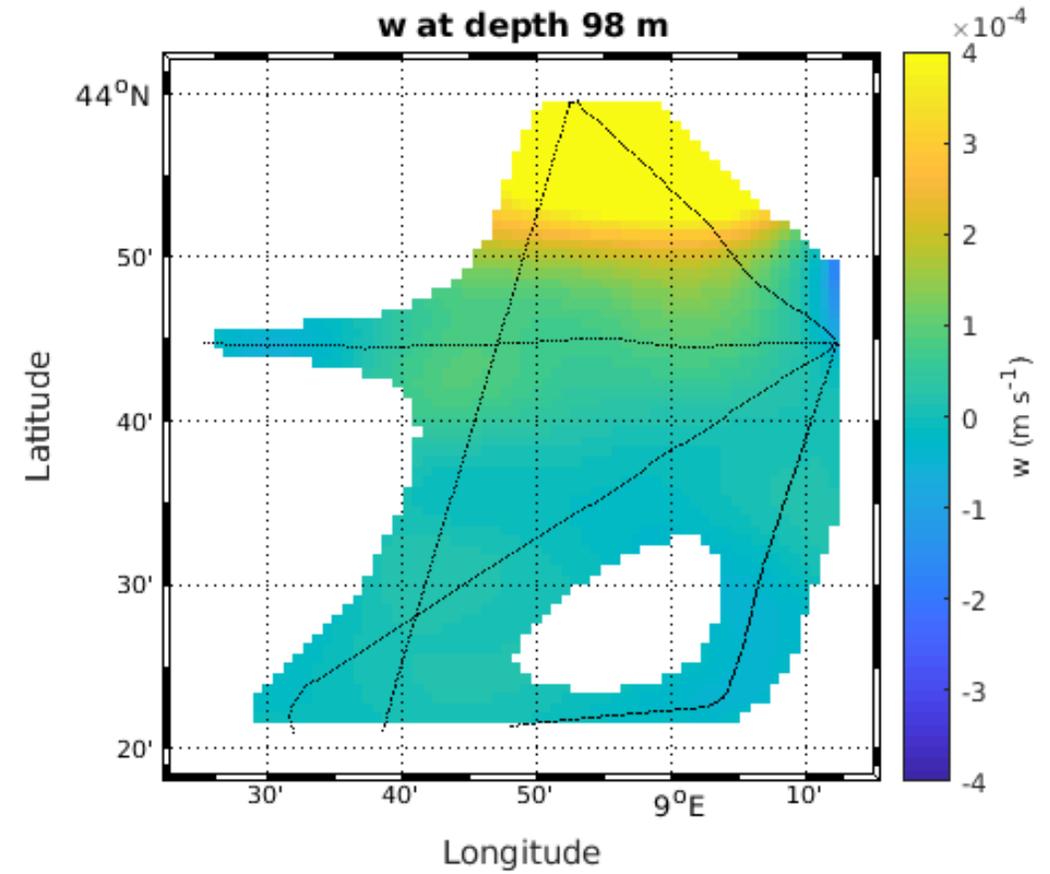
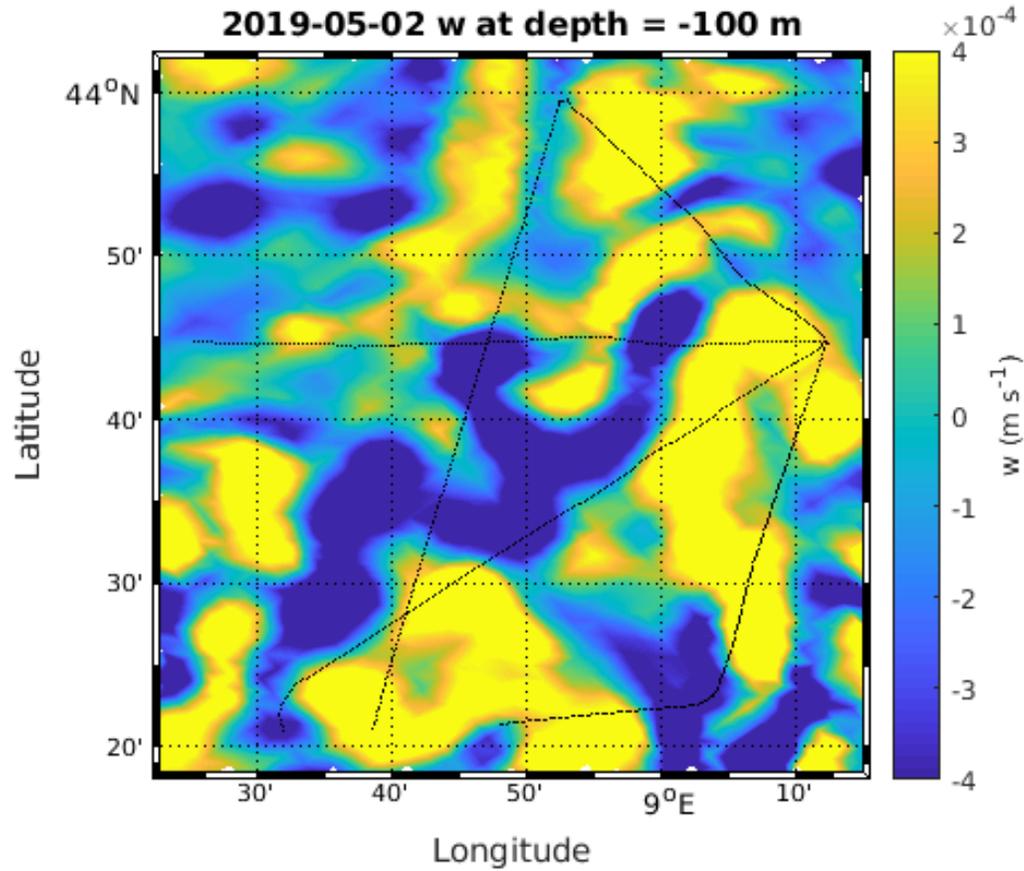
- $\sigma = O(1 \cdot 10^{-1}) m/s$
- $\sigma = O(3 \cdot 10^{-2}) m/s$

1) Le **bruit aléatoire** utilisée dans le calcul correspond à l'**erreur maximale** sur la mesure de pression → les variations obtenues sont **supérieures** au **cm/s** observé.

2) La **précision** dans la mesure de w_{CTD} doit être améliorée avec un **traitement des raw data** SeaBird **plus élémentaire**

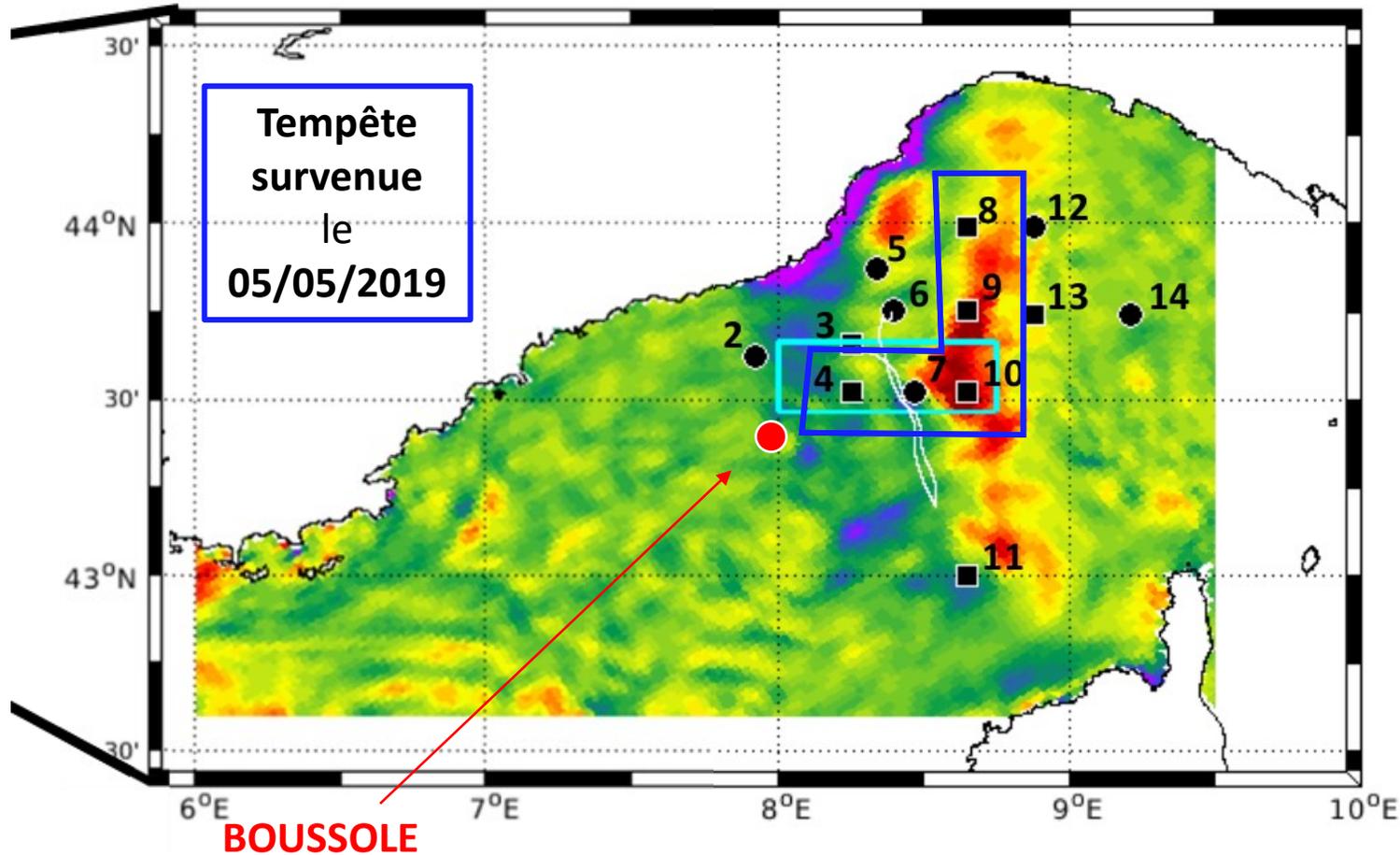
SYMPHONIE – équation- ω

Comparaison avec des estimations



SYMPHONIE – FUMSECK

Comparaison avec les données in situ



Comparaison en station

- Courantologie : u, v, w
- Hydrologie : T, S, ρ
- Mesures entre 0 – 200 m

Comparaison en transect

- Cytométrie
- MVP
- TSG
- Glider : fluorescence

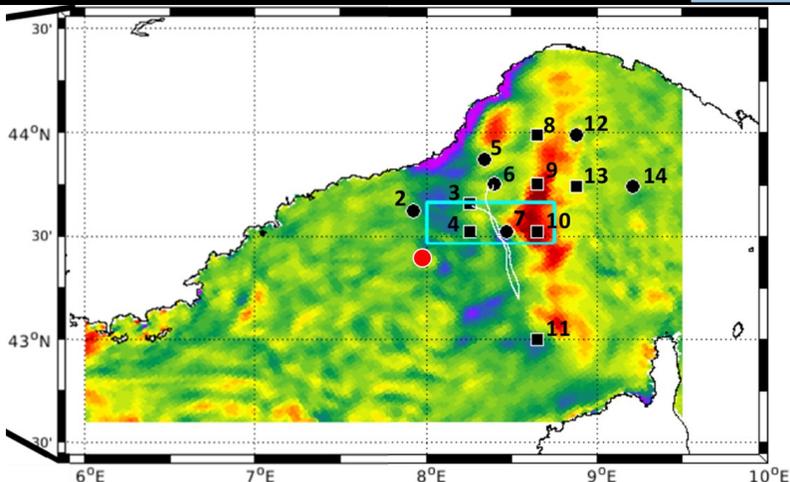
Comparaison au point **BOUSSOLE**

- Séries temporelles de propriétés optiques
- appui de la recherche en bio-optique
 - étalonnage des observations par satellite de la couleur de l'océan
 - validation des produits dérivés de ces observations

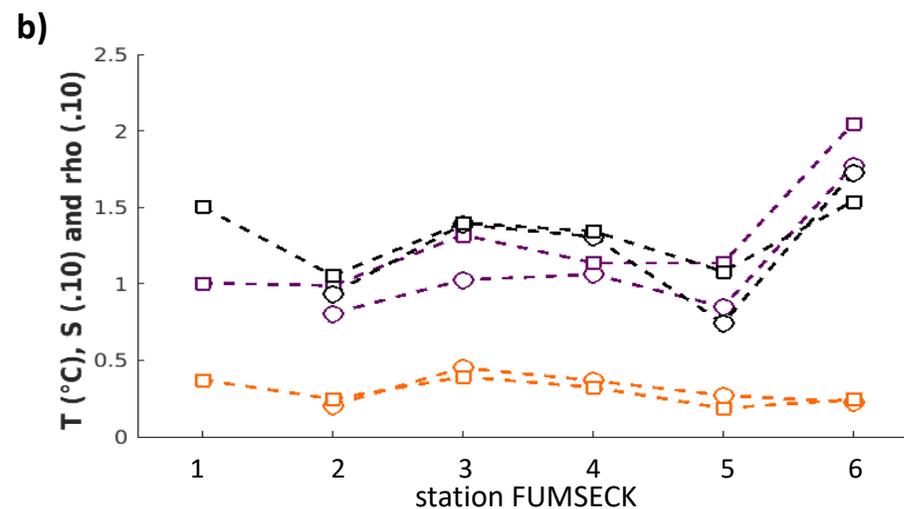
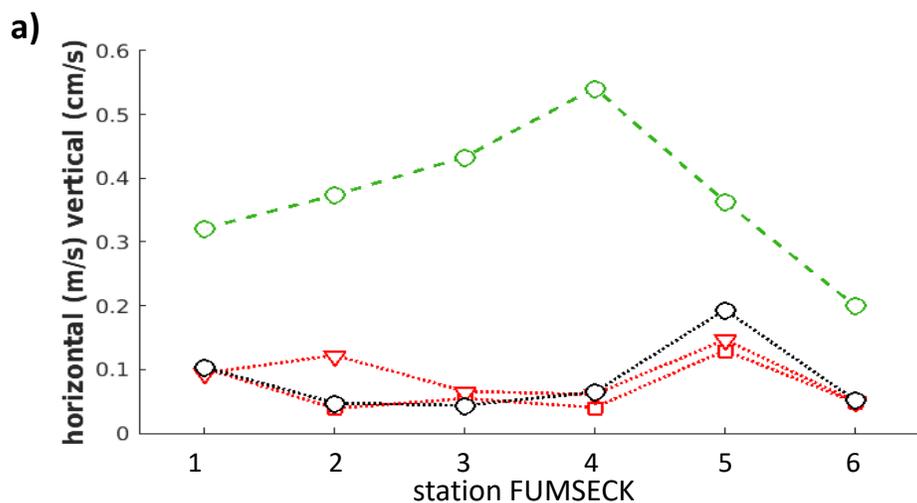
SYMPHONIE - FUMSECK

Comparaison en station ●

**Tempête
survenue
le
05/05/2019**



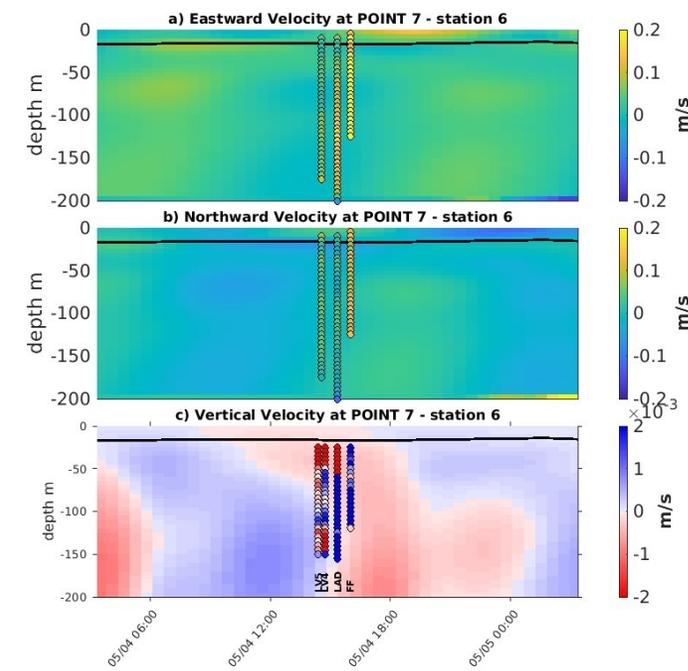
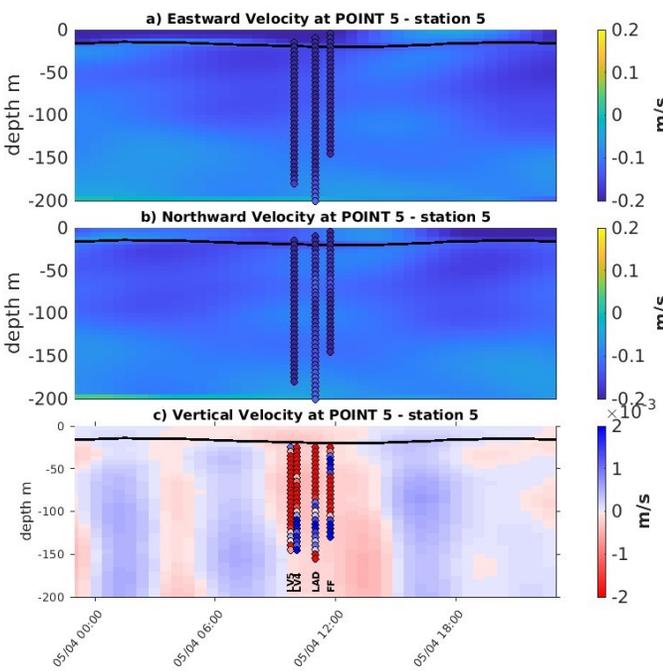
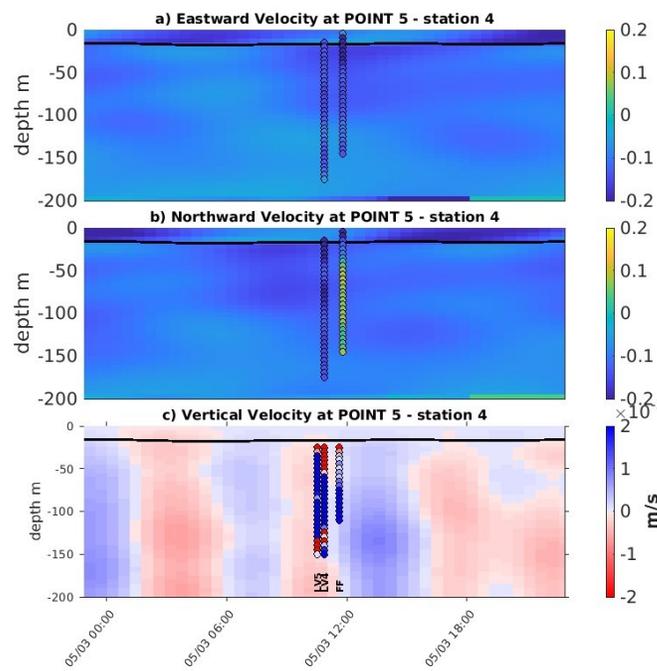
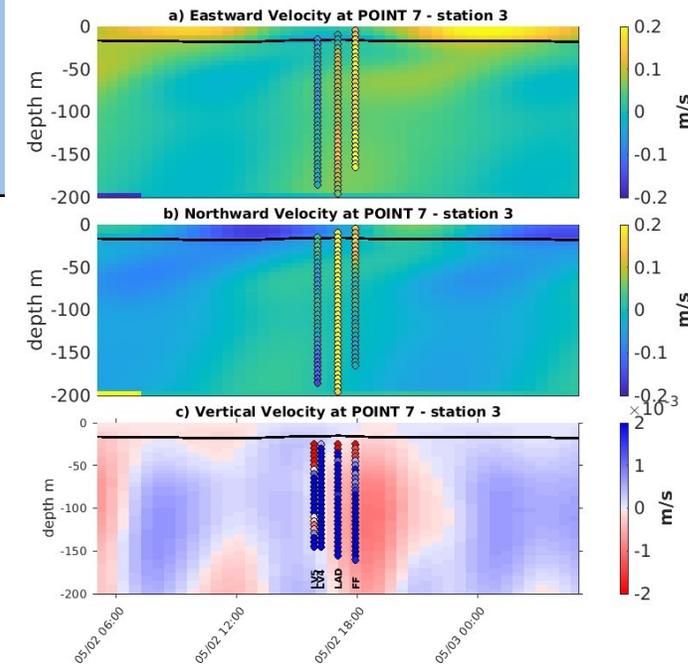
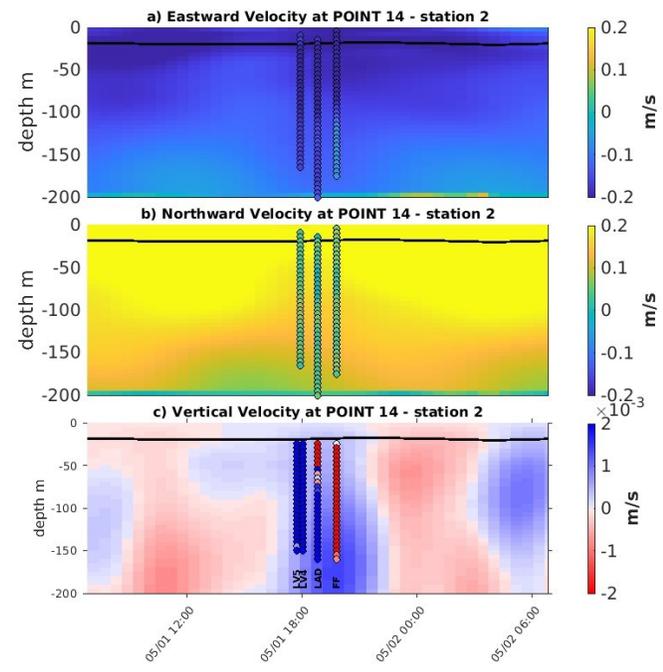
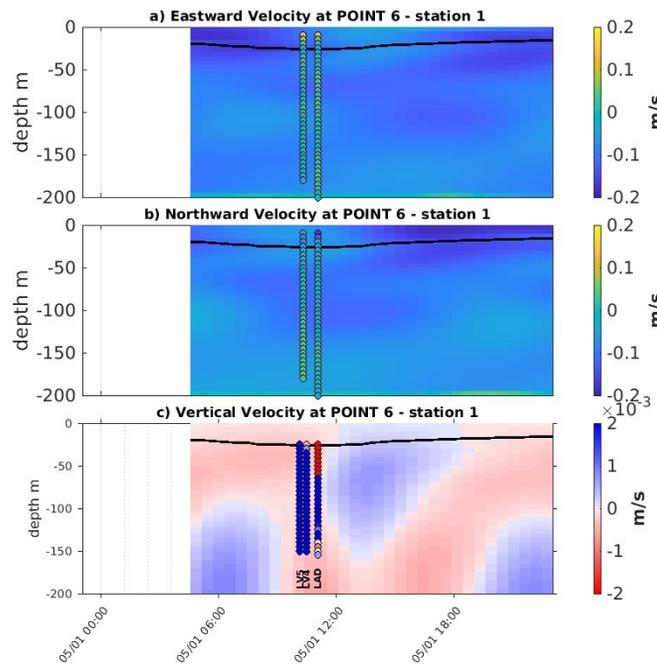
point SYMPHONIE	Station FUMSECK	Date échantillonnage
6	1	01/05/2019
14	2	01/05/2019
12	3	02/05/2019
5	4	03/05/2019
	5	04/05/2019
7	6	04/05/2019



Root Mean Square Deviation

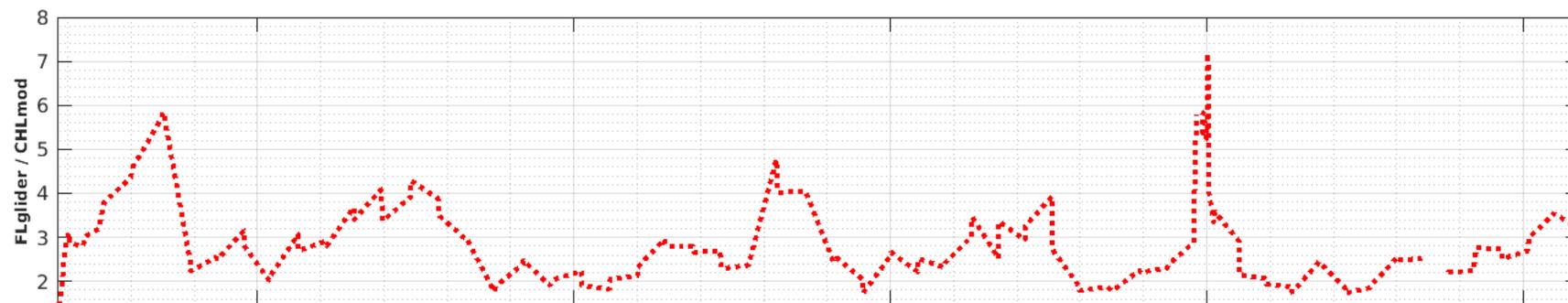
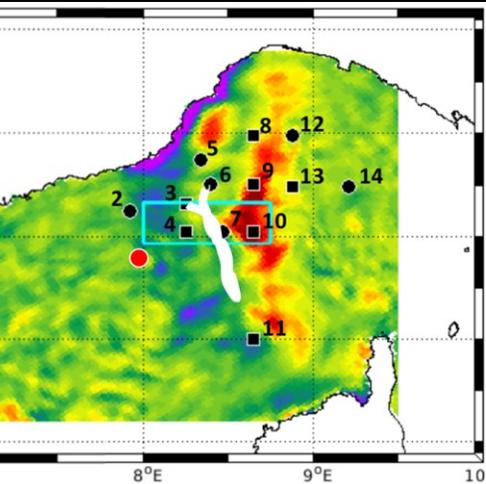
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum^{N_{obs}} (Y_{model} - Y_{obs})^2}{N_{obs}}}$$

- (a) RMSD des paramètres de **courantologie** : **u** (carrés), **v** (triangles), **||u+v||**, et **w**
 (b) RMSD des paramètres de **d'hydrologie** : **température**, **salinité**, **masse volumique**

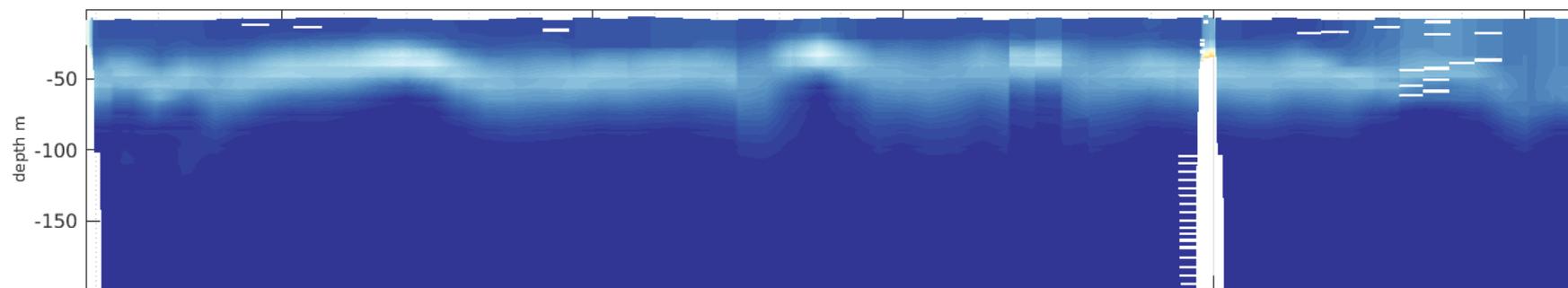
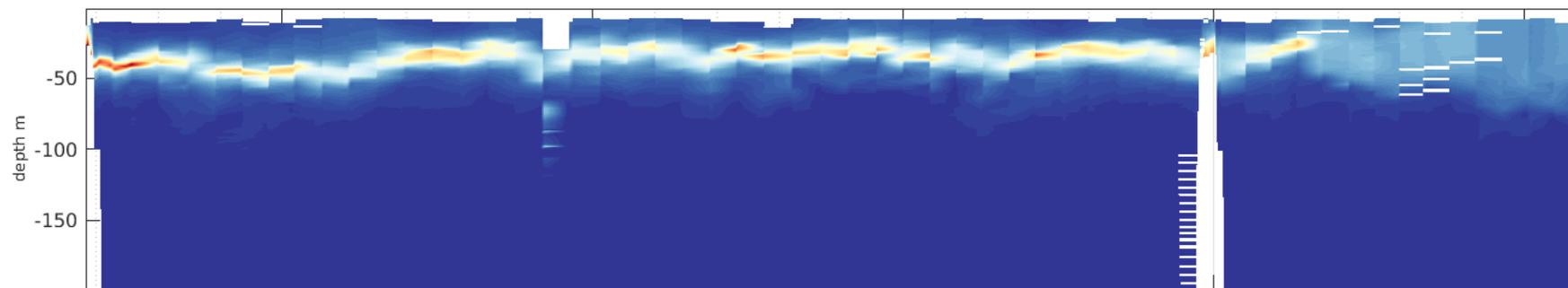
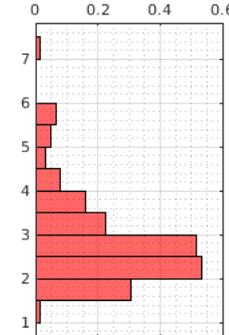


Eco3M-S - FUMSECK

Comparaison avec le glider

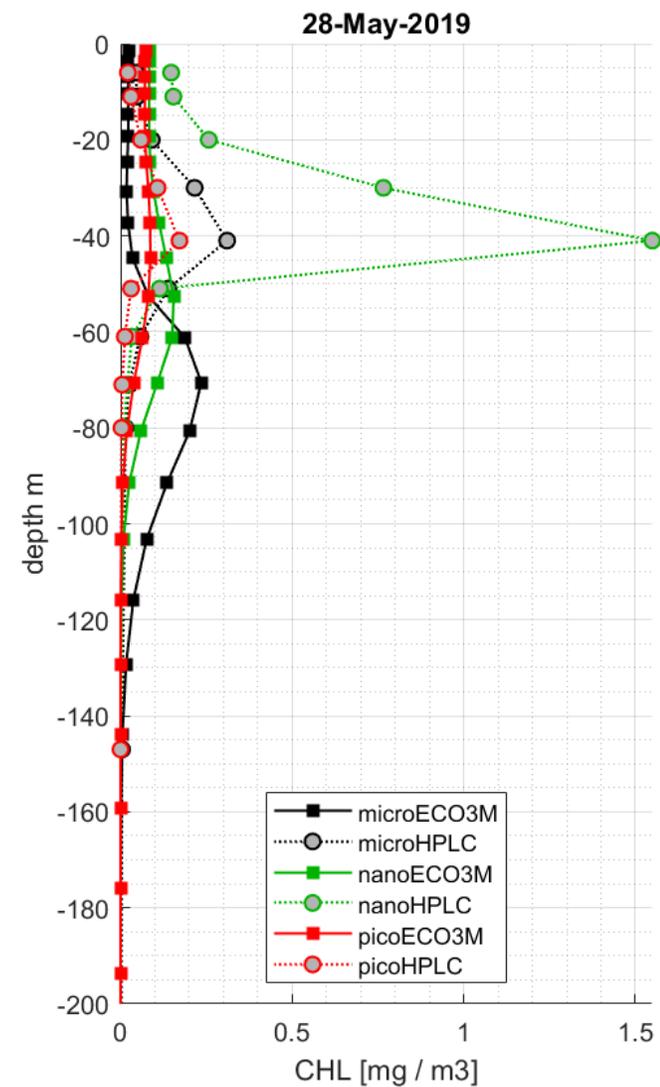
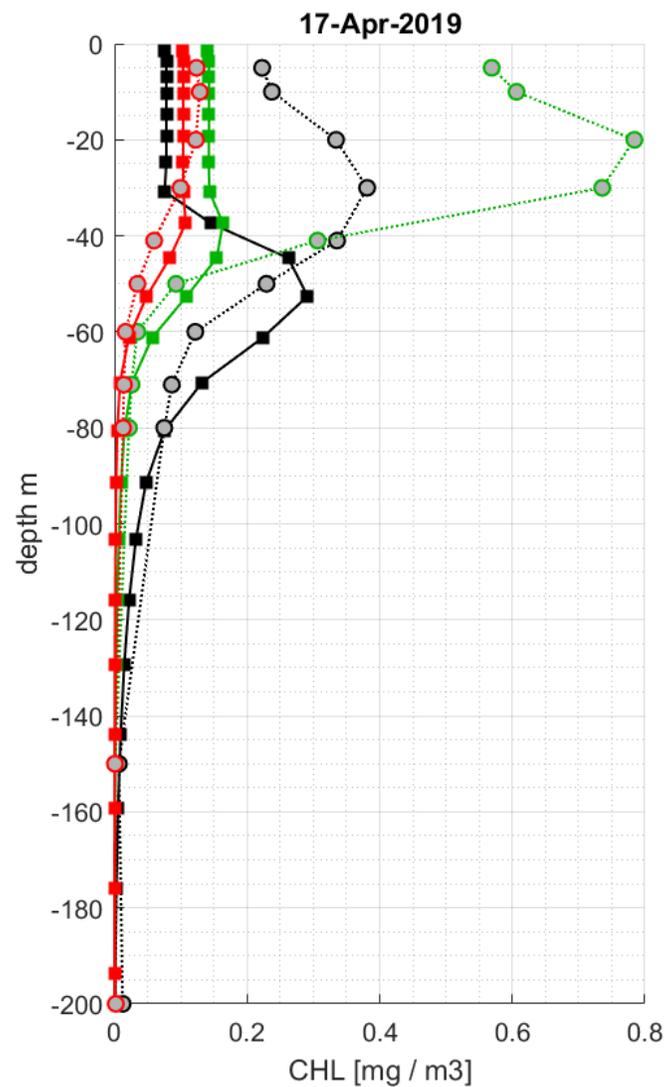
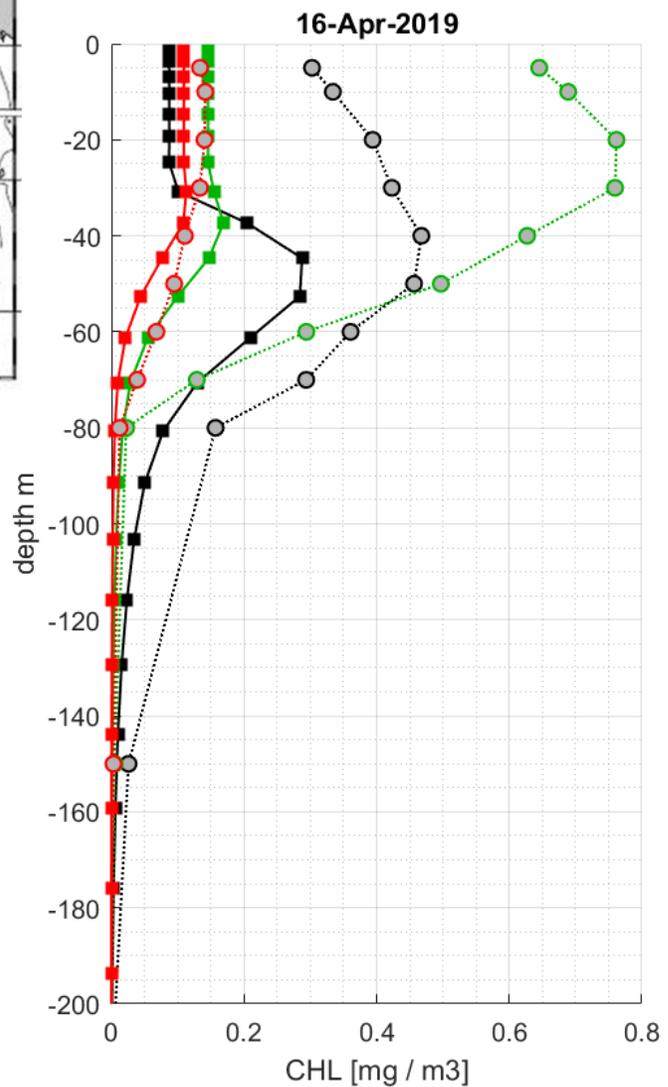
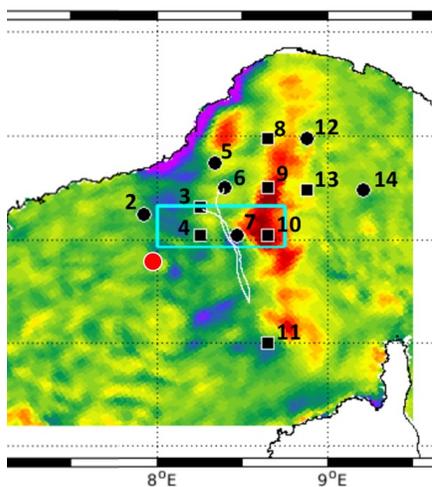
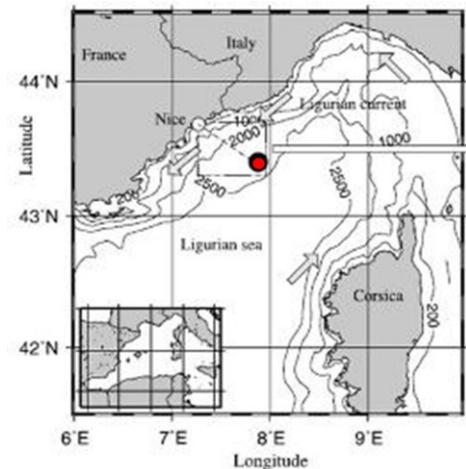


probability density function

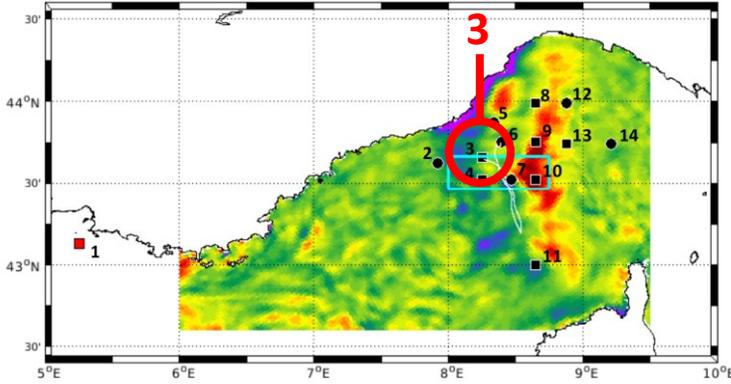


Eco3M-S - FUMSECK

Comparaison au point **Boussole** ●

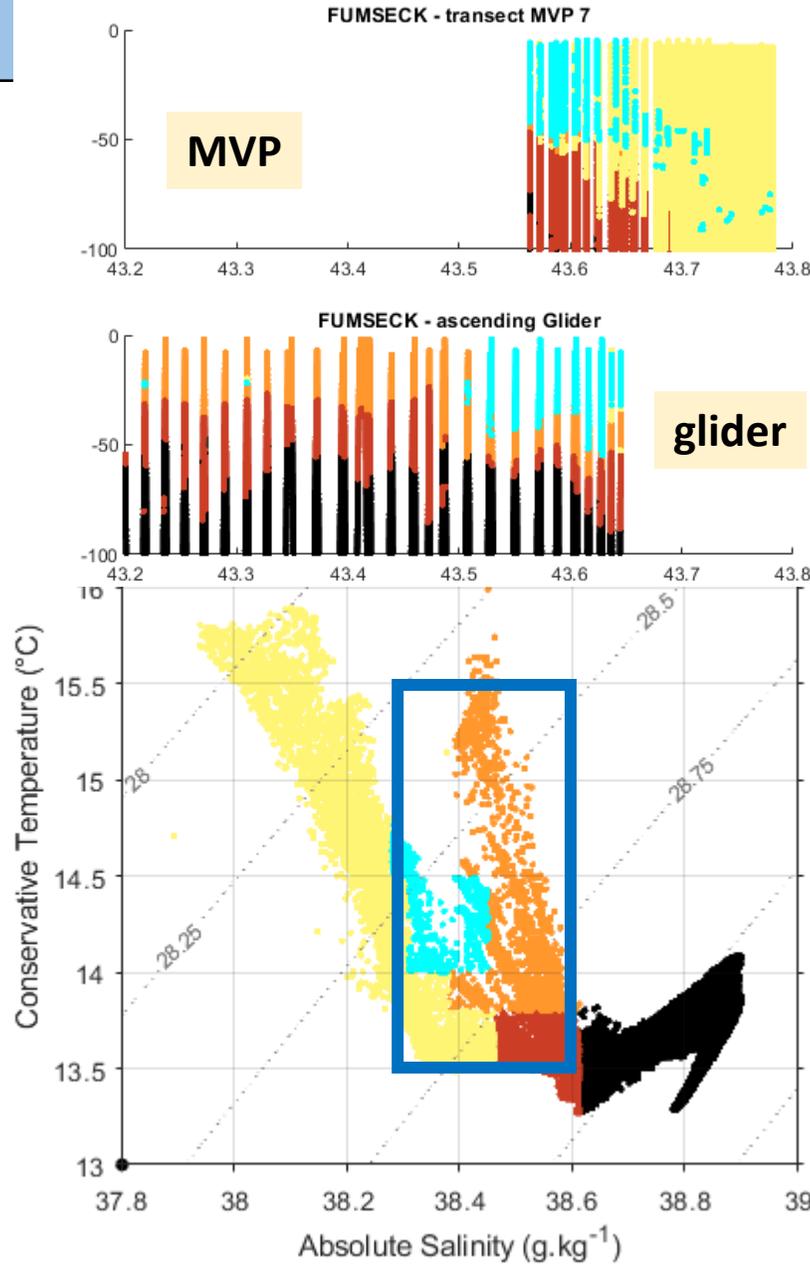
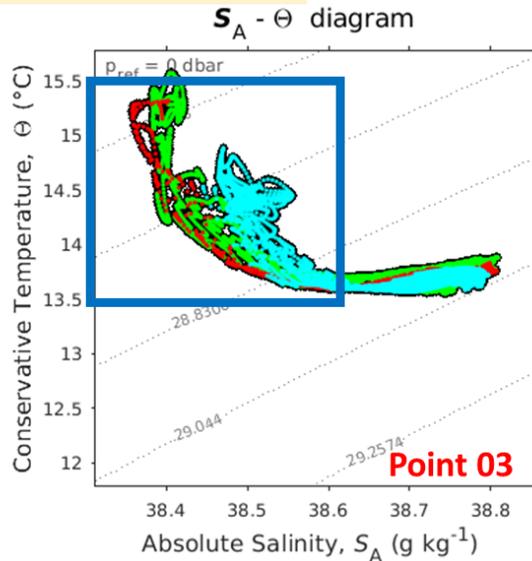


SYMPHONIE - FUMSECK

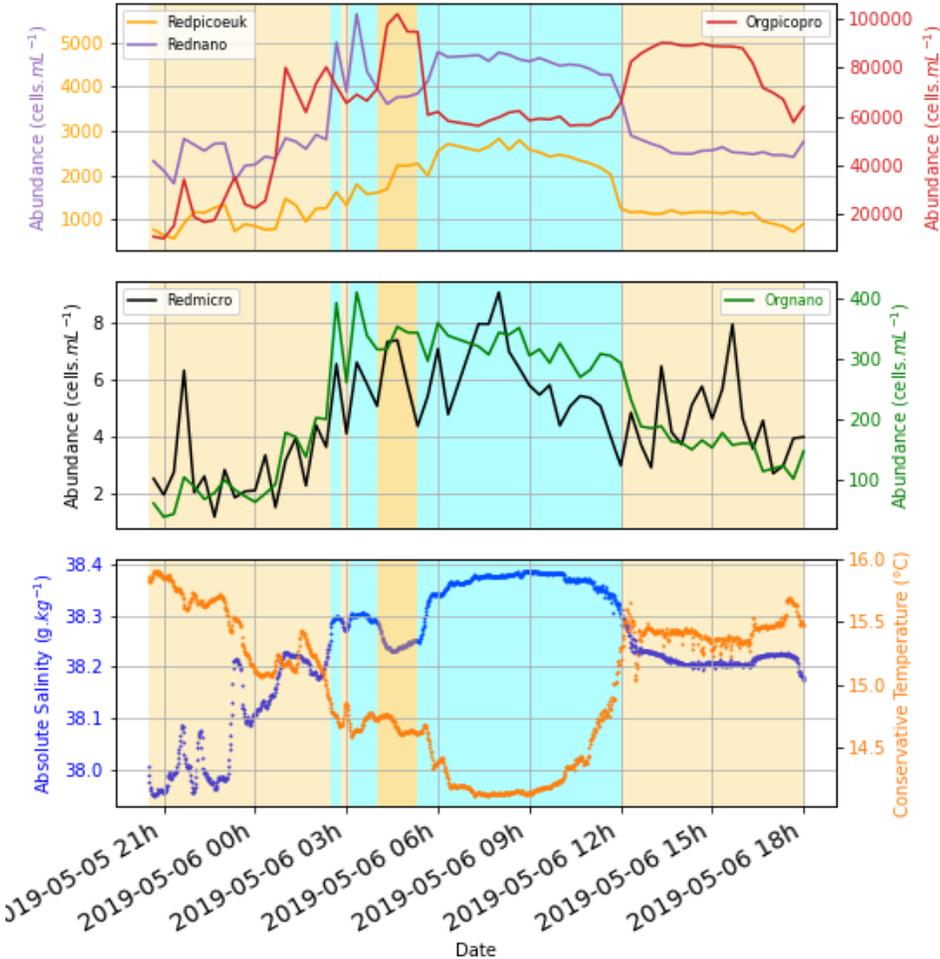


Modèle SYMPHONIE

01-May-2019 04:34:15 – 05-May-2019 00:00:00
 05-May-2019 00:00:00 – 05-May-2019 12:00:00
 05-May-2019 12:00:00 – 08-May-2019 10:19:24



cytométrie

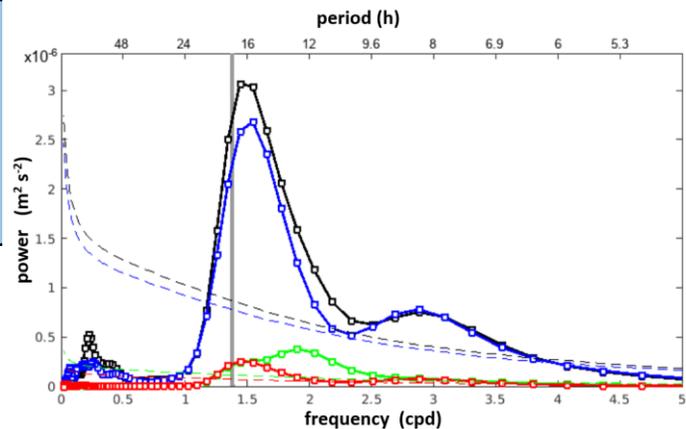


TSG

Forçages	marée : +	marée : \emptyset
vent : +		
vent : \emptyset		

SYMPHONIE

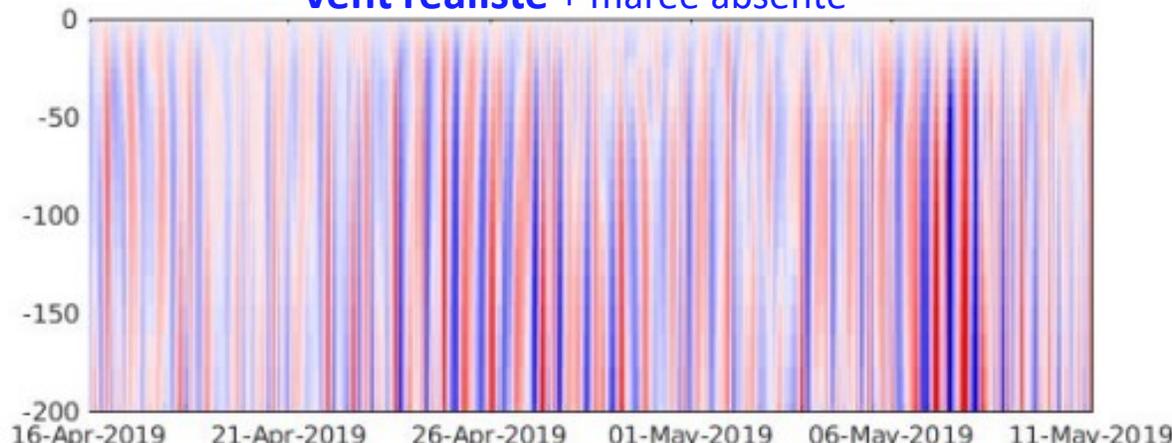
Tests de sensibilité : simulation variable



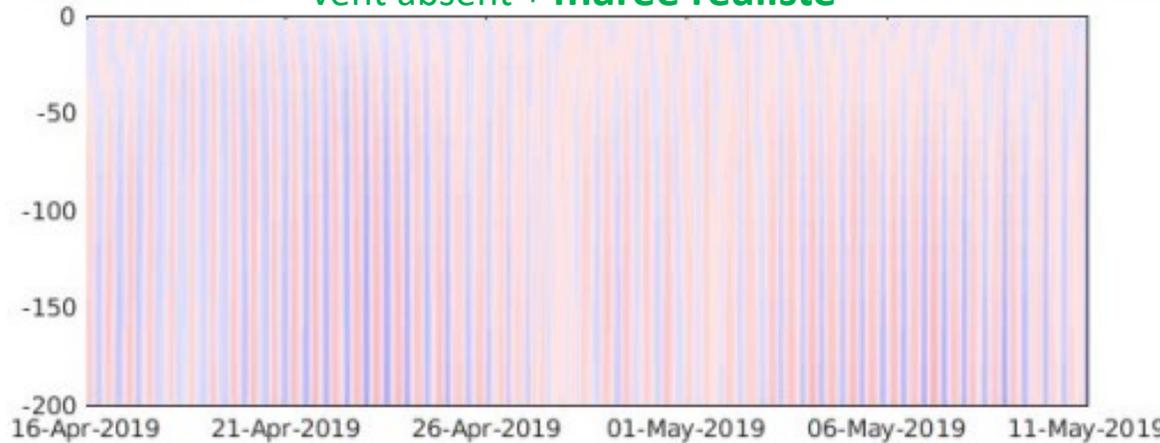
vent réaliste + marée réaliste



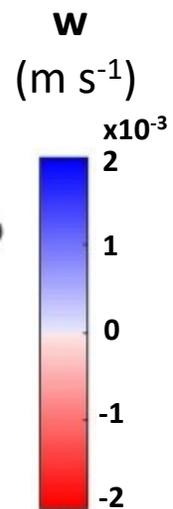
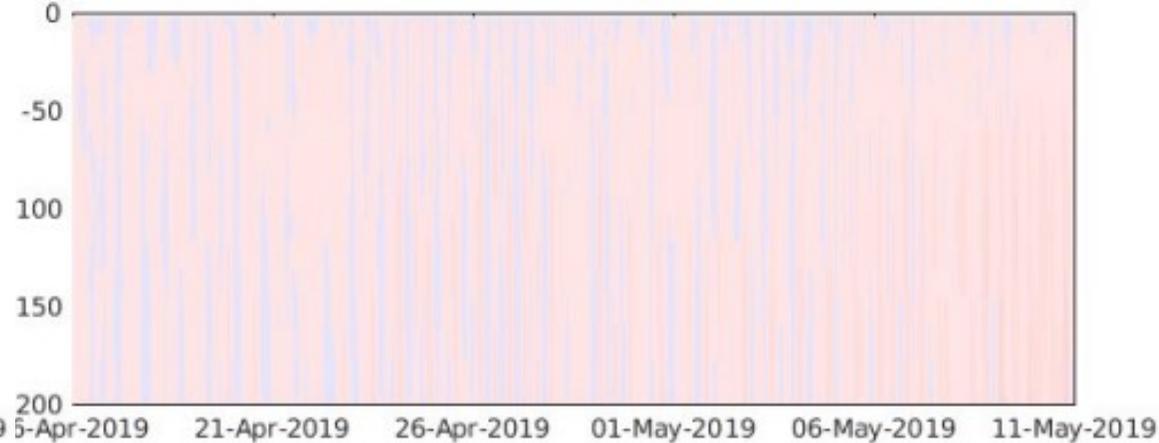
vent réaliste + marée absente



vent absent + marée réaliste



vent absent + marée absente



SYMPHONIE

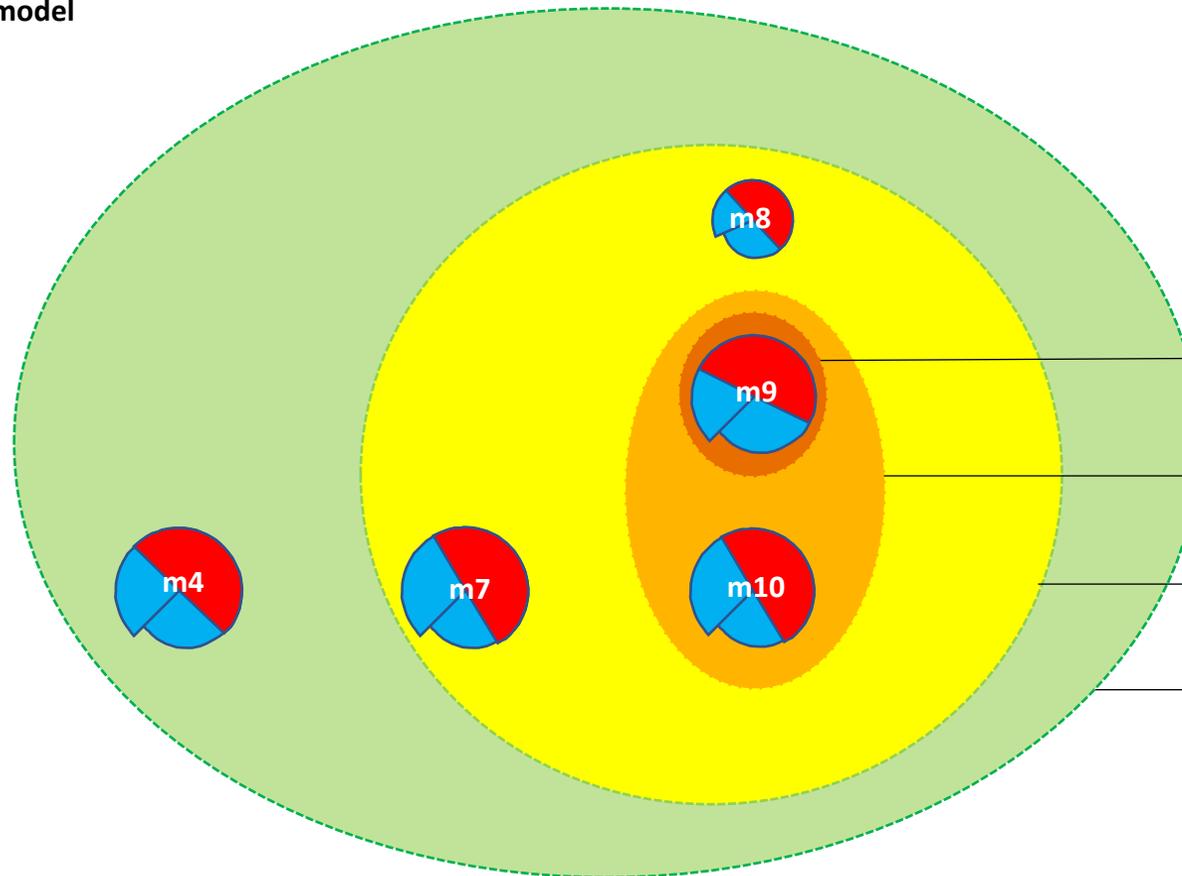
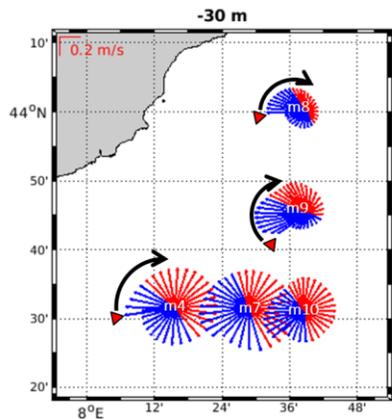
Évènement impulsif : impact spatio-temporel

$w < 0$



mX : station n°X from the model

$w > 0$



Time impact

May 6th, 2019

30 m depth

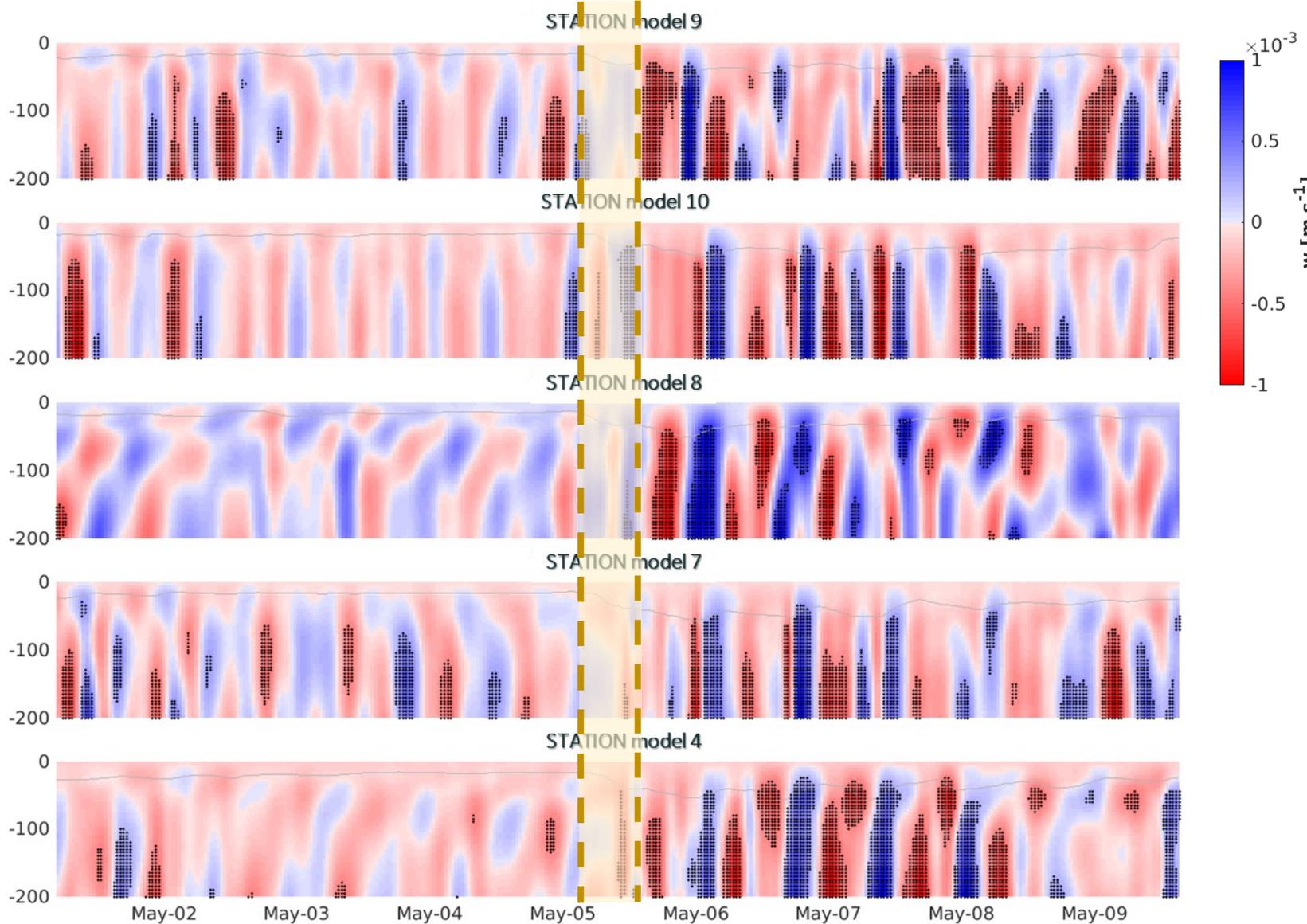
7:00 am

9:00 am

10:00 am

12:00 am

SYMPHONIE



**Évènement
impulsionnel :**
impact spatio-temporel

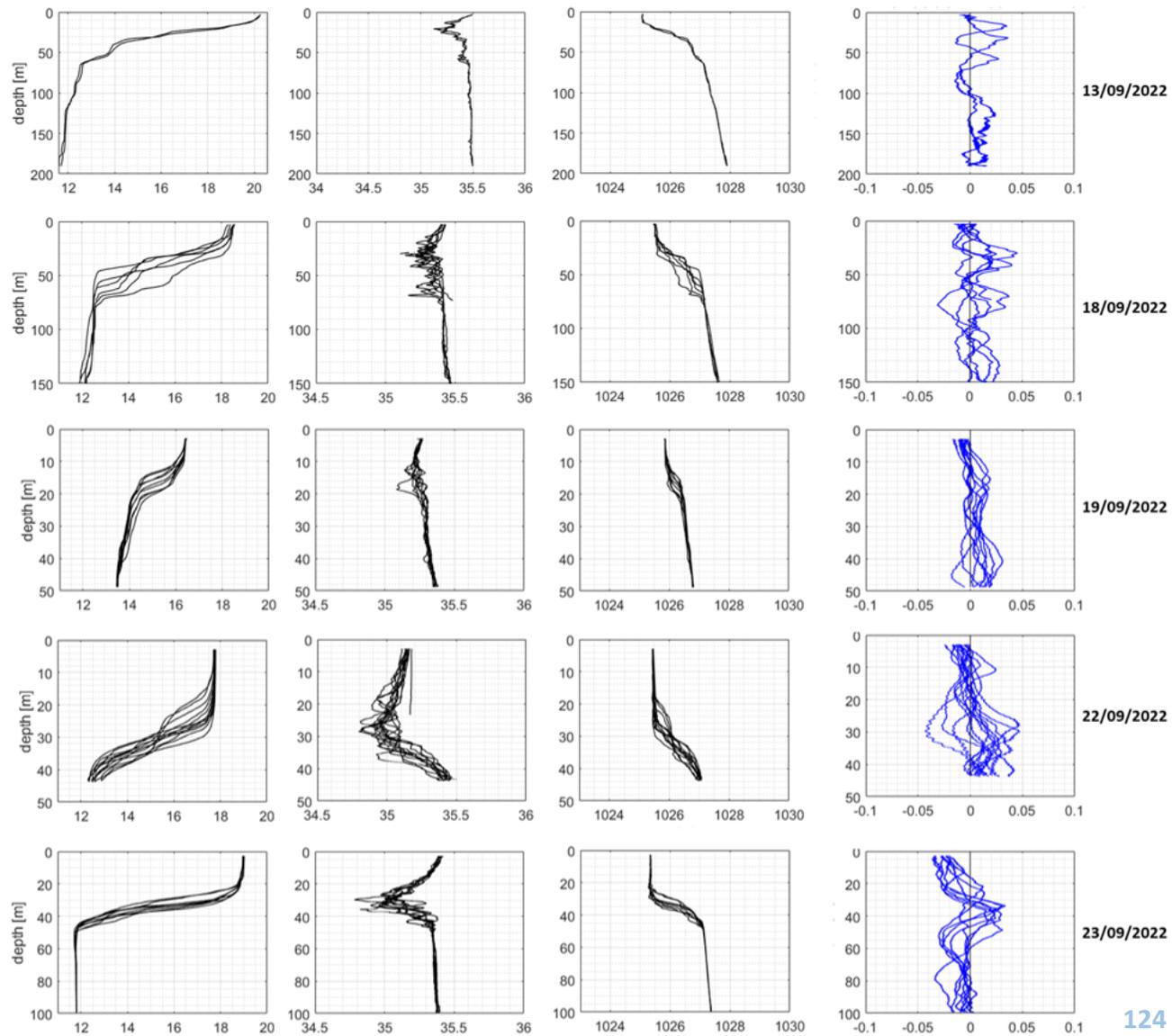
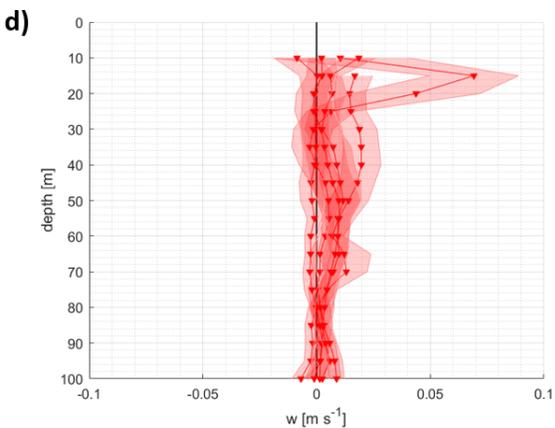
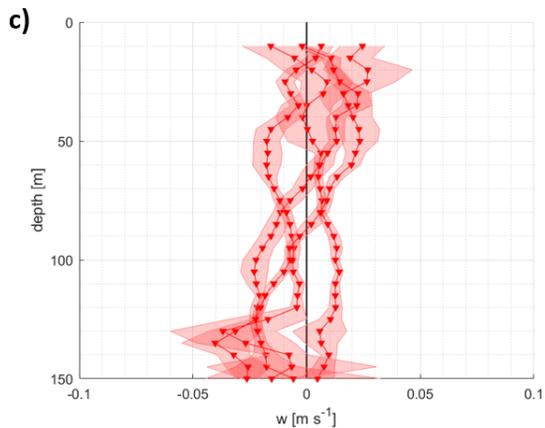
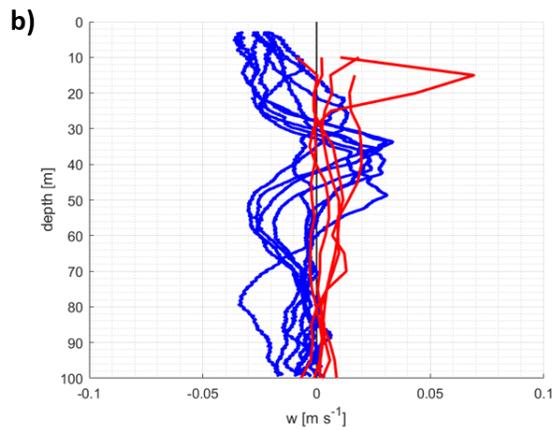
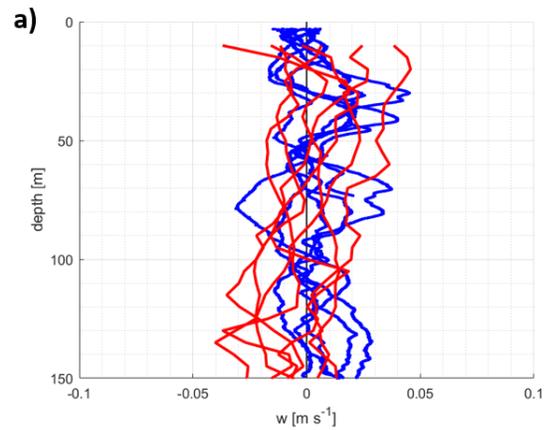
Valeur seuil

- $|w| > 0.7 \times 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$

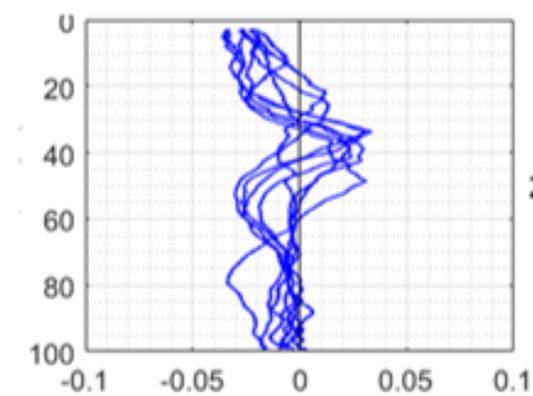
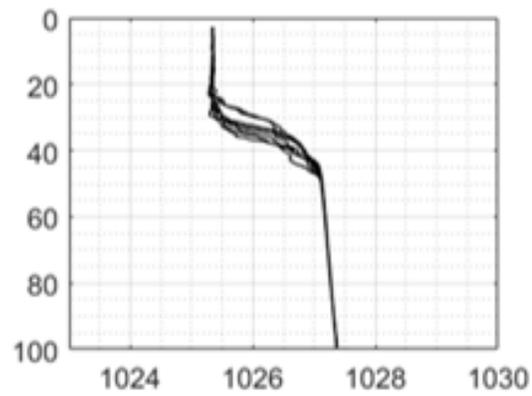
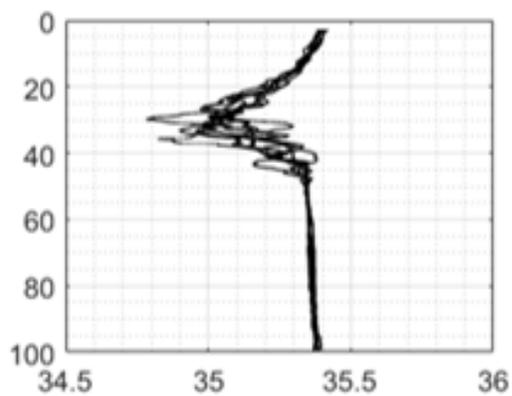
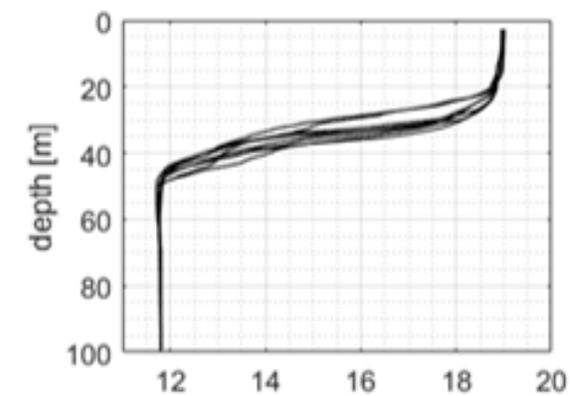
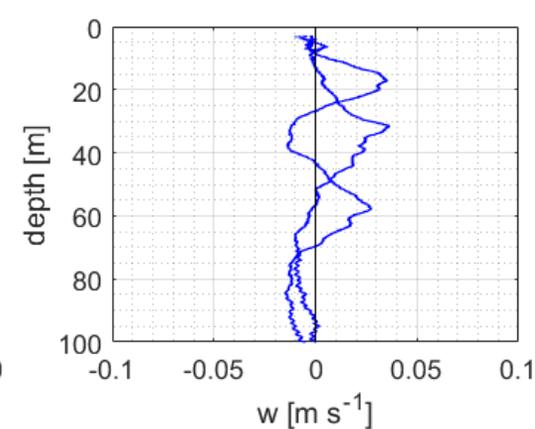
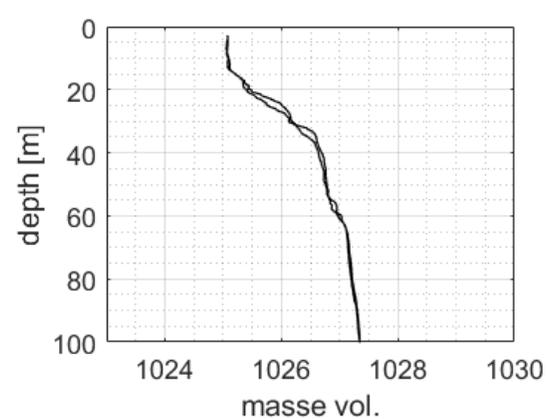
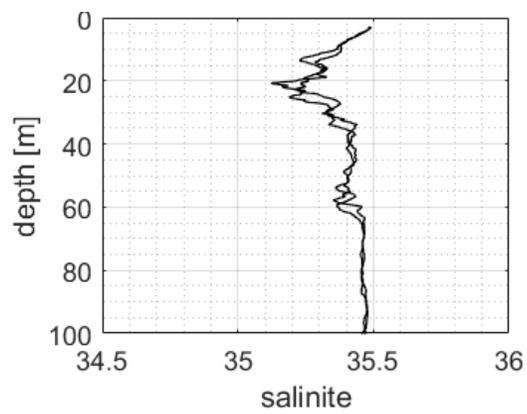
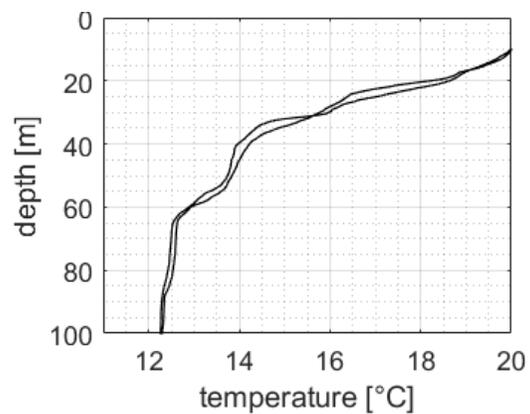
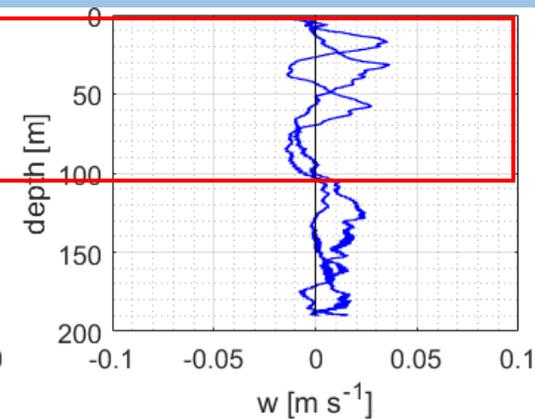
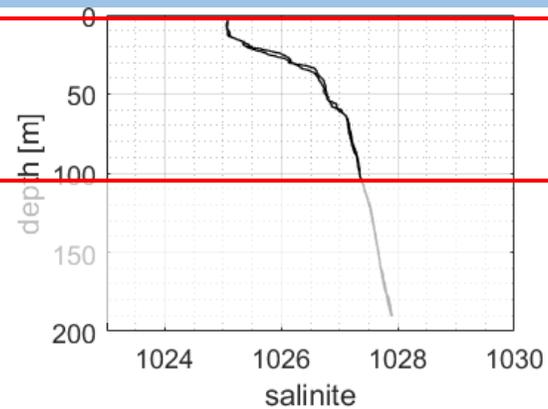
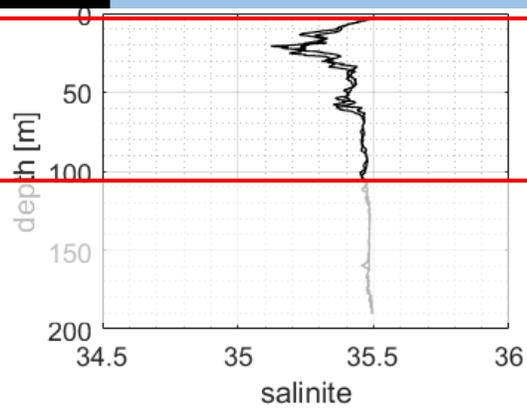
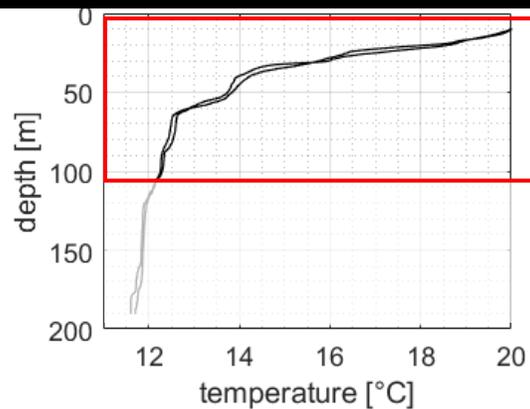
Ensemble des mesures VVP PROTEVS-Gascogne 2022

18/09/2022

23/09/2022



FF-ADCP
VVP



13/09/2022

23/09/2022

Campagne RESILIENCE

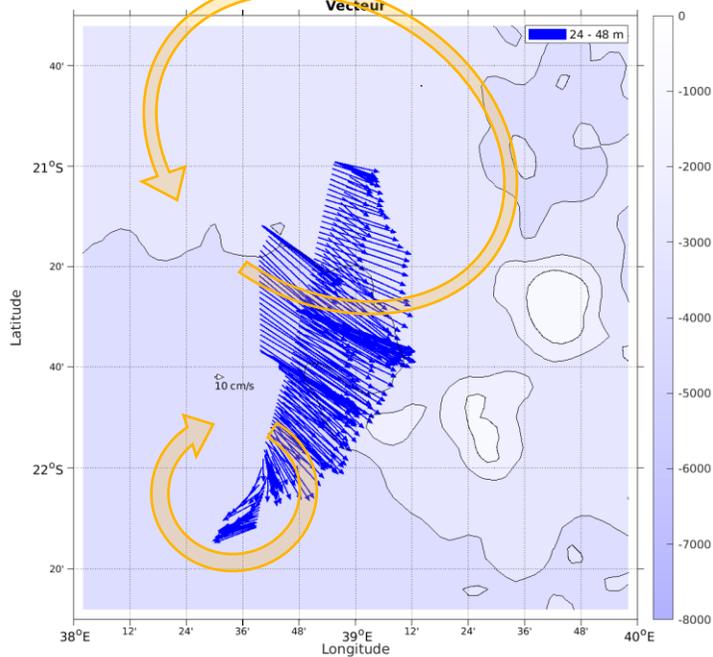
19 avril – 24 mai 2022

N/O Marion Dufresne

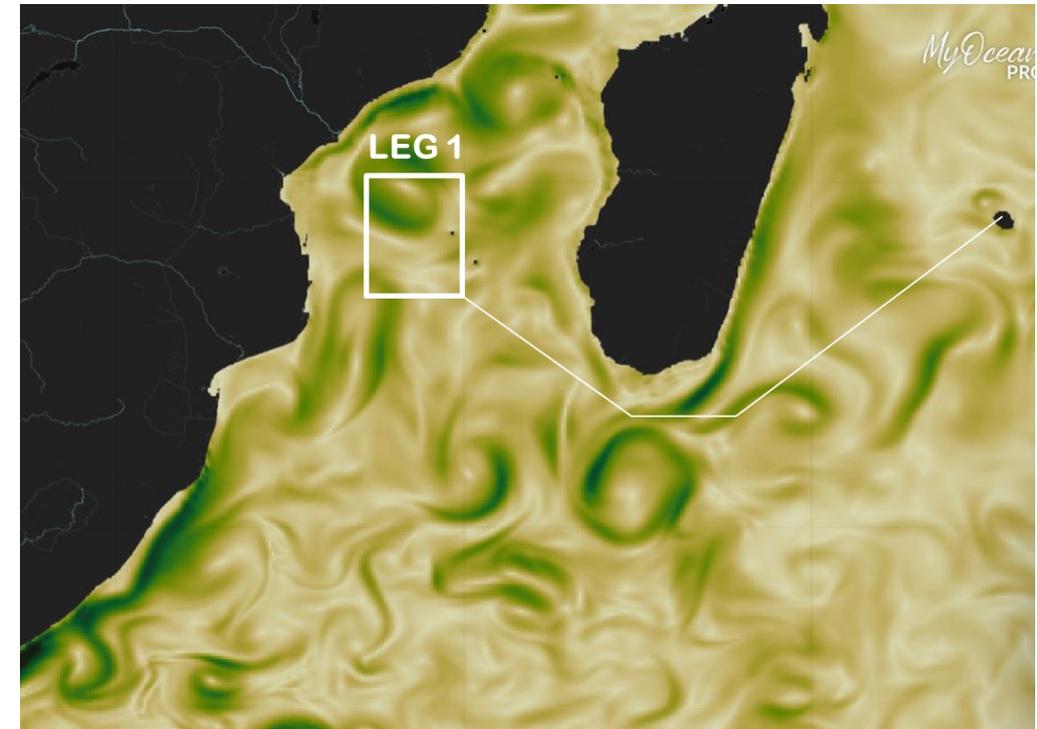
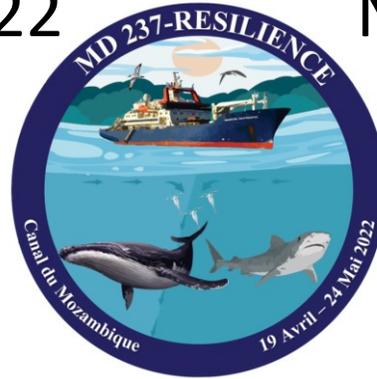
LEG 1. Echantillonnage d'un Front
AC/C

Canal du Mozambique Sud

MD237-OS150-20220430_D-1-01_AC-985_P1-64_sta_00600m1



Cascade exploitation V7.2-30/04/2022

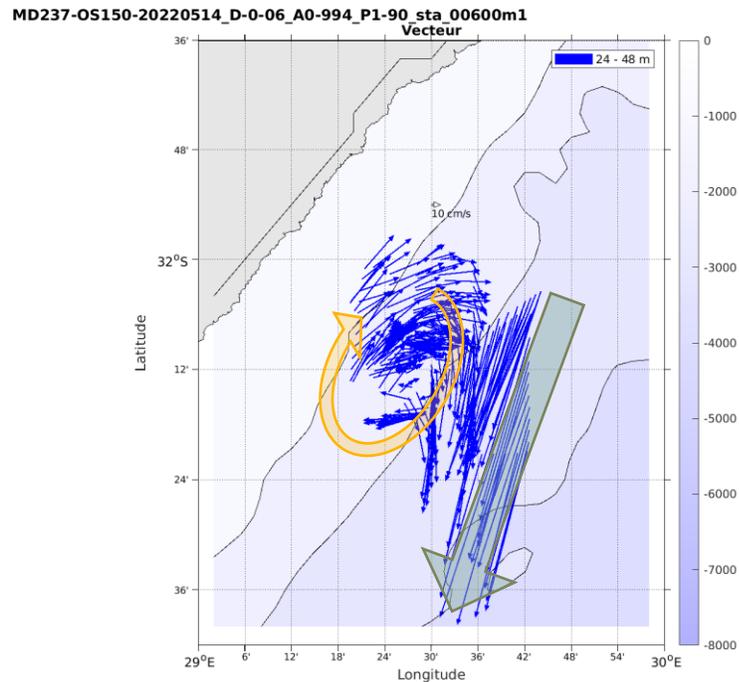
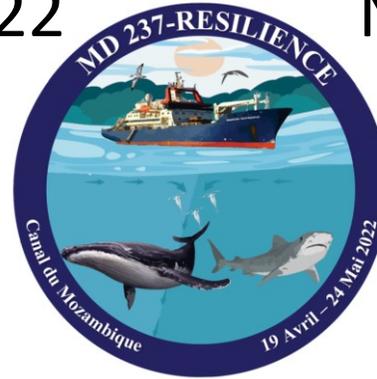


Campagne RESILIENCE

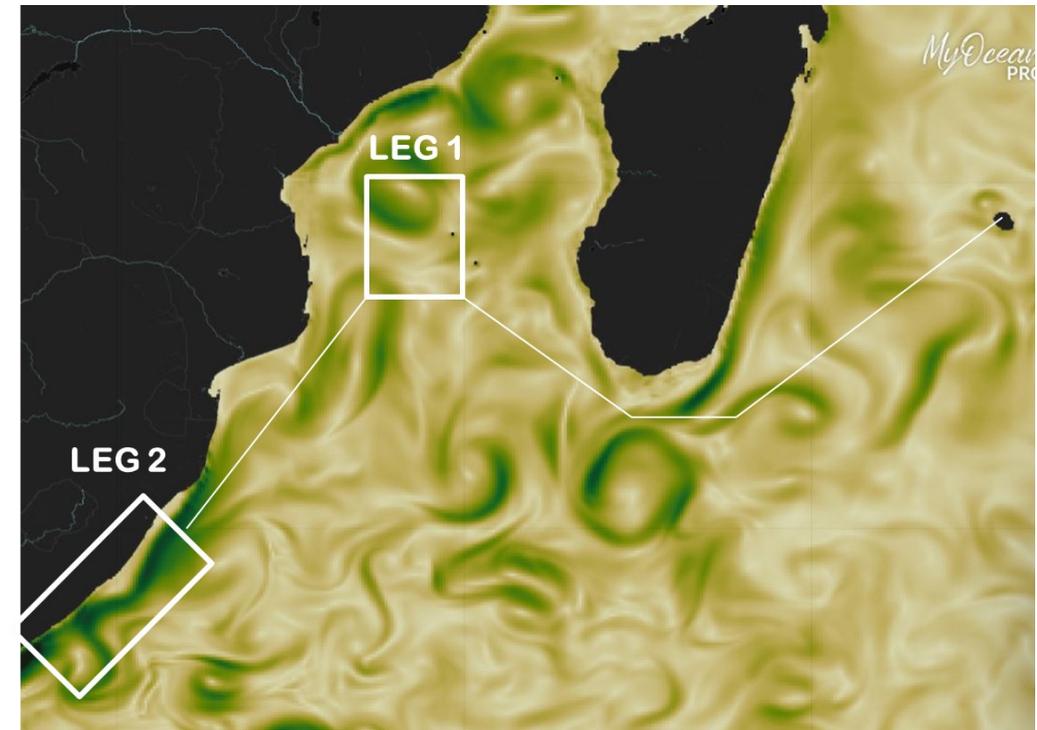
19 avril – 24 mai 2022

N/O Marion Dufresne

LEG 2. Echantillonnage d'un tourbillon Côtier Afrique du Sud



Cascade exploitation V7.2-14/05/2022



Finite Size Lyapunov Exponent

FSLE → outil numérique permettant la détection
de structures lagrangienne 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

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

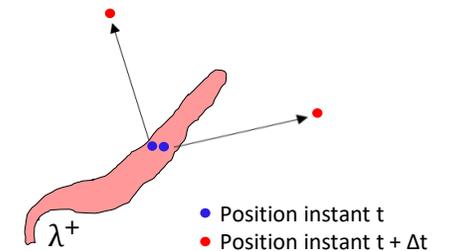
λ : FSLE (jour⁻¹)

δ_0 : distance initiale

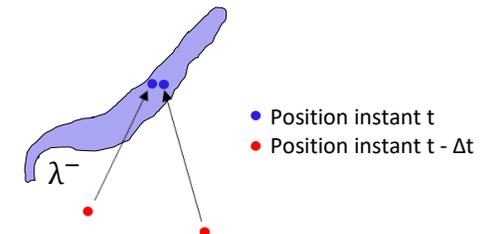
δ_τ : distance finale fixée

τ : période d'intégration (60 jours max)

FORWARD



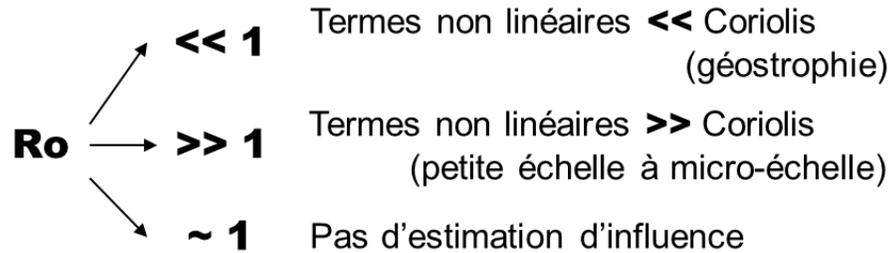
BACKWARD



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

Nombre de Rossby

Estimation des termes non linéaires par rapport à la force de Coriolis



Mouvement inertiel

Absence de force de frottement ou de pression



mouvement soumis à Coriolis uniquement

$$v = \frac{1}{f} \frac{\partial v}{\partial t}$$

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = +fv \\ \frac{\partial v}{\partial t} = -fu \end{cases} \Rightarrow$$

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + f^2 v = 0 \\ \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + f^2 u = 0 \end{cases} \Rightarrow$$

$$u = +v_0 \cos(ft + \varphi)$$

$$v = -v_0 \cos(ft + \varphi)$$

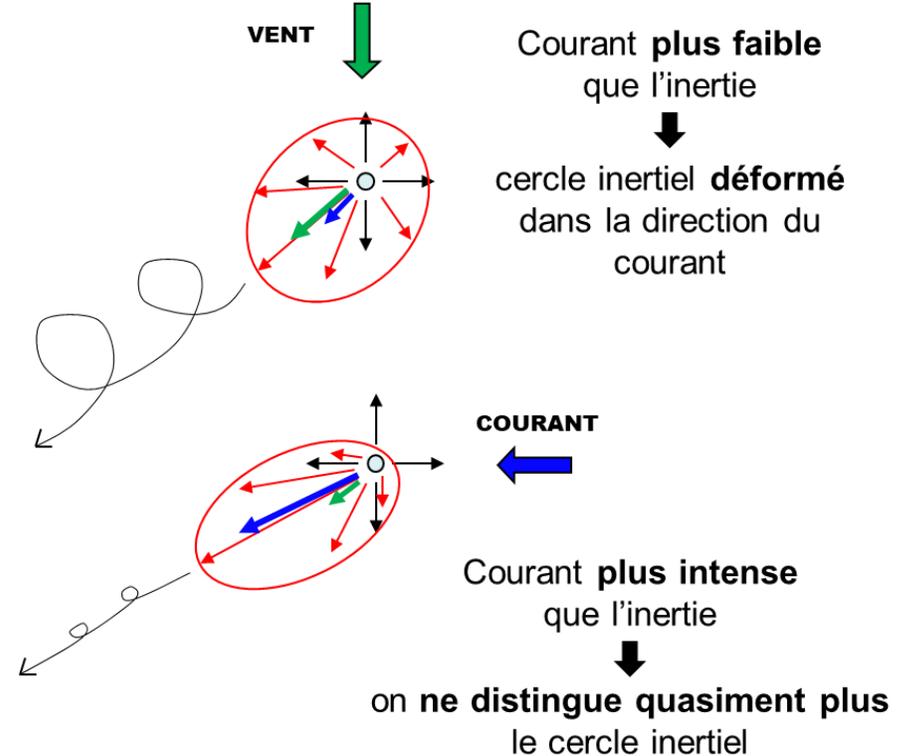
$$u = \frac{-1}{f} \frac{\partial u}{\partial t}$$

Équa. diff. linéaire du 2nd ordre

avec v_0 vitesse de mise en mouvement initiale

Période inertielle : $T = \frac{2\pi}{f}$

Cercles d'inertie



BILAN

Déterminer la nature du cercle inertiel

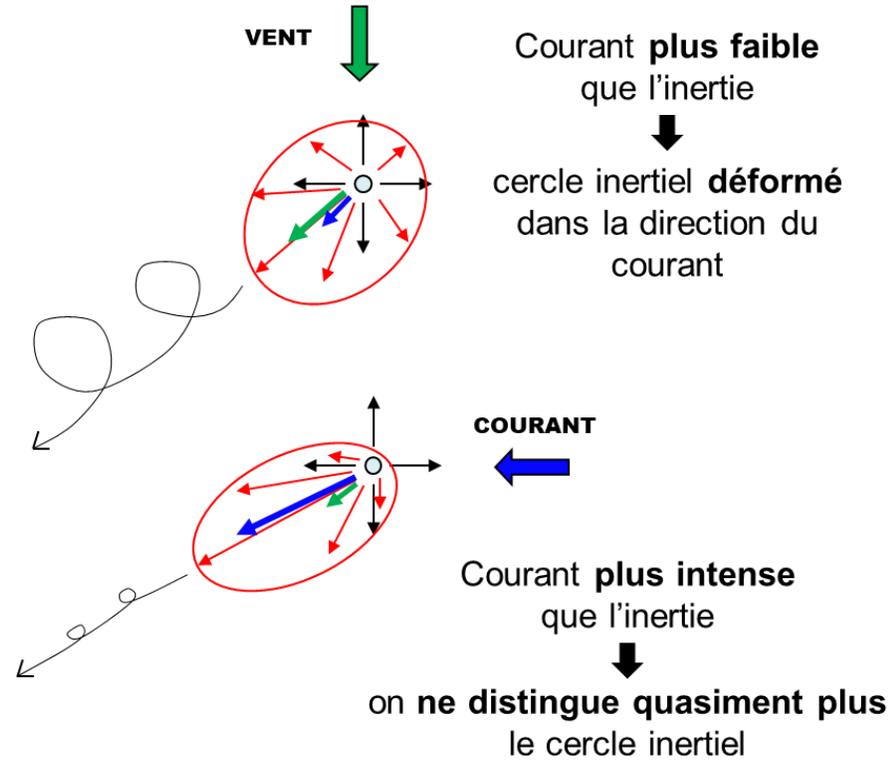


observation lagrangienne en son centre



si concordance avec la période inertielle, alors il ne s'agit pas d'un tourbillon

Oscillation d'inertie (OI) en système bicouche



BILAN

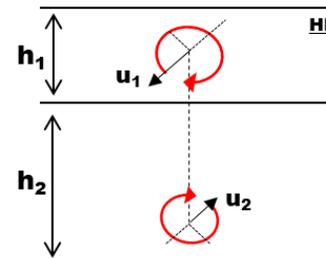
Déterminer la nature du cercle inertiel
↓
observation lagrangienne en son centre
↓
si concordance avec la période inertielle,
alors il ne s'agit pas d'un tourbillon

Déf. en milieu tournant :

Mouvement horizontal circulaire d'une particule soumise seulement à la force de Coriolis, et assujettie à glisser sans frottement sur le géopotential de gravité (local = plan horizontal), avec une vitesse initiale non nulle (v_0)

Description du mouvement basée sur plusieurs hypothèses/approximations :

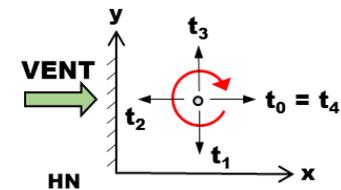
- **plan-f** ($f = \text{cste}$)
- **$u, v \gg w$** (vitesse verticale négligeable)
- **$fw \ll g$**

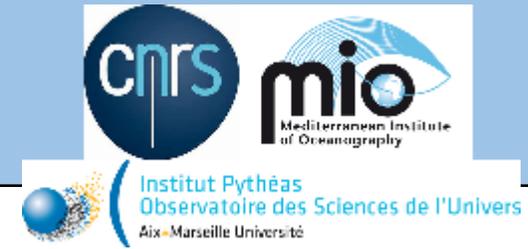


Dans la couche 1, vitesse = \vec{u}_1
Dans la couche 2, vitesse = $\vec{u}_2 = \frac{-h_1}{h_2} \vec{u}_1$

→ Donc **décalage de π** entre les courants d'inertie de la couche 1 et de la couche 2, mais **sens de rotation identique** (horaire HN, anti-horaire HS).

Dans le cas d'un vent orthogonal à la côte, un upwelling à la côte apparaît à t_0 .





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**