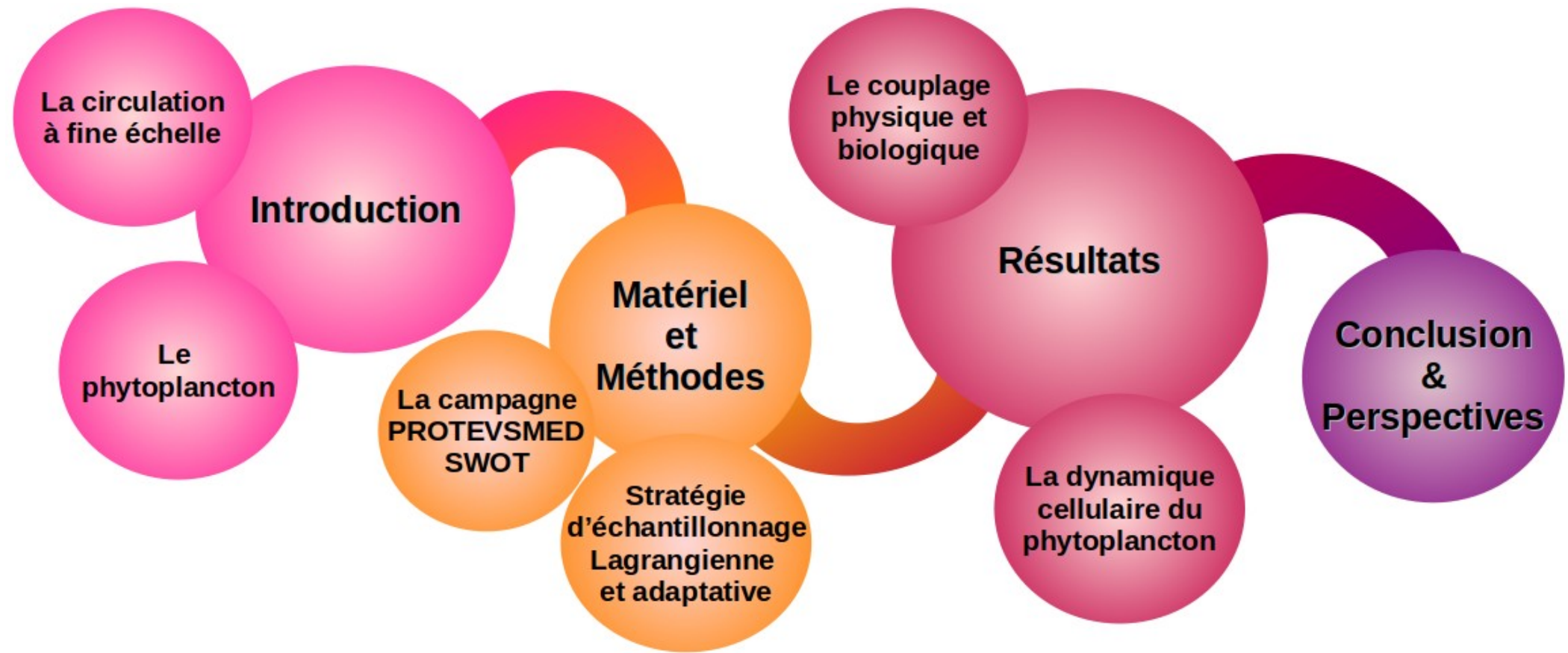


Circulation à fine échelle et impact sur le plancton

Roxane TZORTZIS

Sous la direction d'Andrea M. DOGLIOLI & Gérald GREGORI



Pourquoi étudier l'océan ?

L'océan en quelques chiffres :

- L'océan représente **71 %** de la surface de la Terre
- Soit une superficie de **360 000 000 km²**
- Profondeur moyenne de **3800 m**

Rôle fondamental de l'océan :

- Régulateur du **climat**
- Réservoir de **biodiversité**
- **Ressources** alimentaires, médicales, etc

→ Essentiel de le décrire et de comprendre son fonctionnement



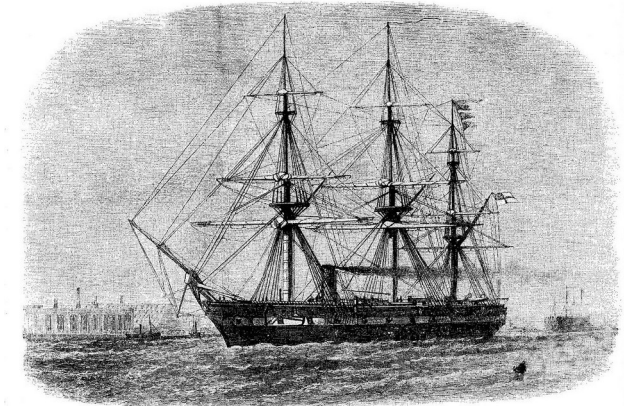
www.nasa.gov

L'océan est-il un long fleuve tranquille ?

- Premières campagnes océanographiques menées à la fin du **XIX^{ème} siècle**
- Vision laminaire 'limitée' de la circulation océanique



Représentation du Gulf Stream
(Franklin-Folger 1768-1775)



1872- 1876 : expédition du *Challenger*

<https://fr.wikipedia.org>

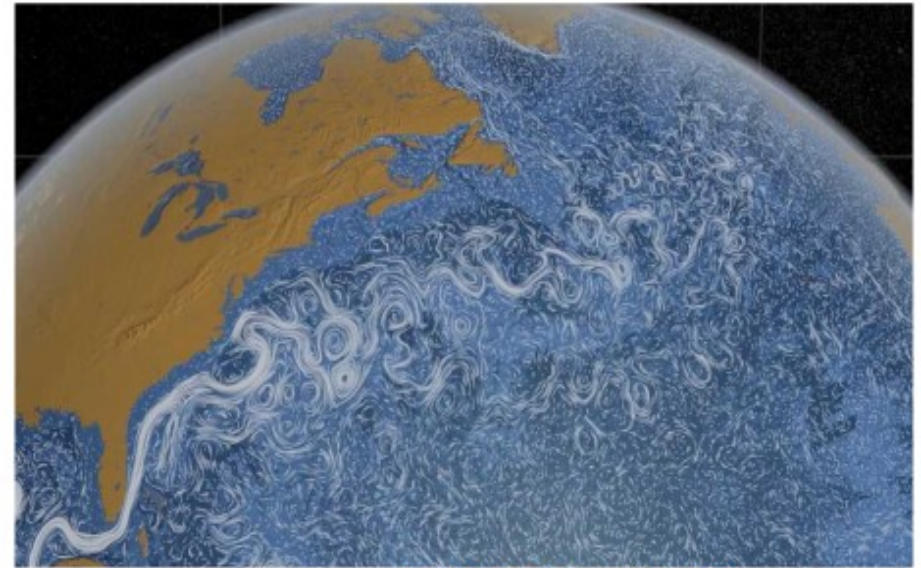
L'océan est-il un long fleuve tranquille ?

- Premières campagnes océanographiques menées à la fin du **XIX^{ème} siècle**
- Vision laminaire 'limitée' de la circulation océanique

→ Structures tourbillonnaires parcourant l'océan



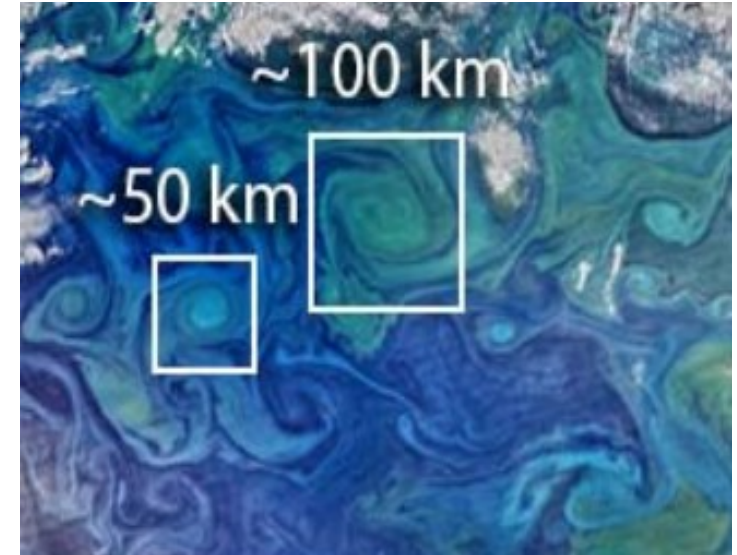
Représentation du Gulf Stream
(Franklin-Folger 1768-1775)



Gulf Stream
(Perpetual Ocean, NASA)

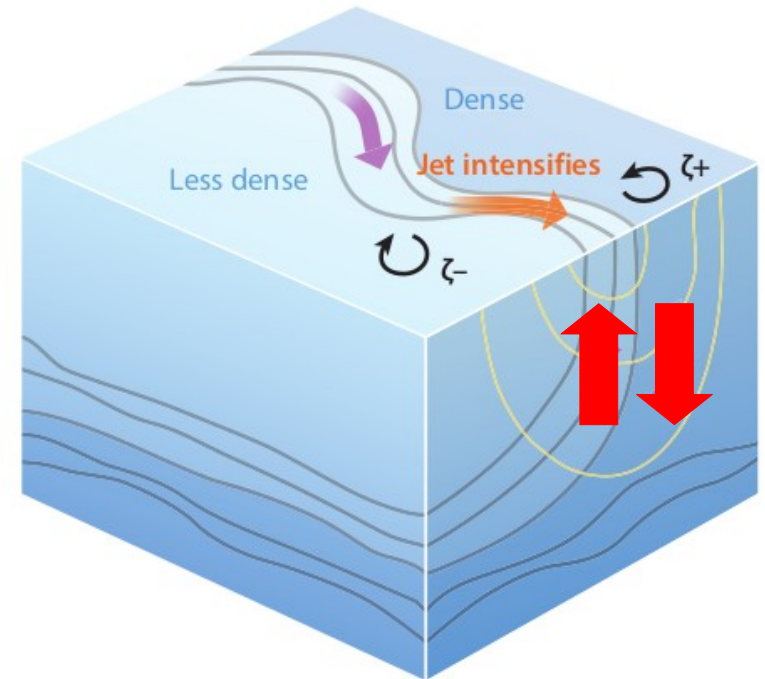
Les fines échelles

- Les images satellite montrent une organisation de nombreuses **structures de plus fine échelle** au milieu des tourbillons
 - Processus de formation : étirement, cisaillement
 - Structures (filaments, **fronts**) de l'ordre de **1 km à 100 km** sur l'échelle horizontale
 - **Durée de vie éphémère** (jours/semaines)
- Le plus souvent étudiées grâce aux **modèles numériques** et aux **observations satellites**



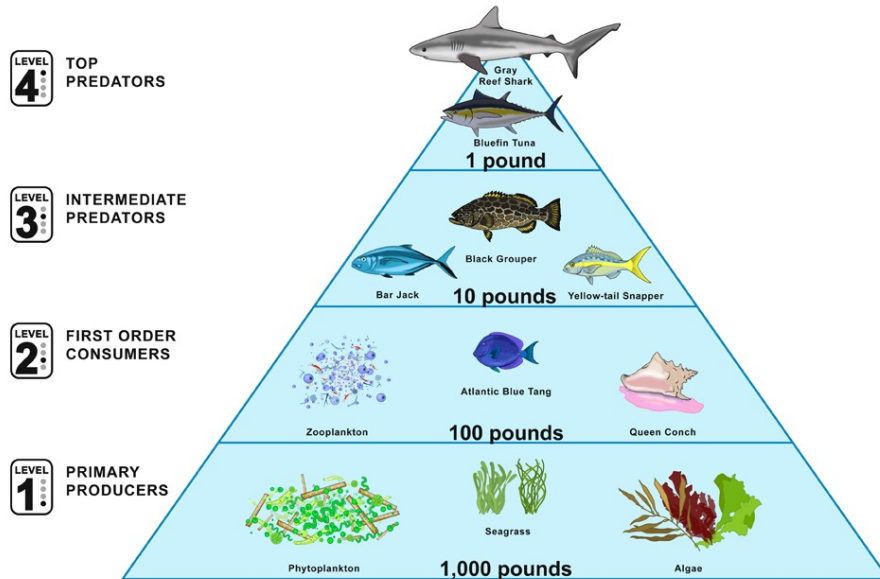
Les fronts

- Rencontre de 2 masses d'eau aux propriétés différentes
- Etirement, frontogénèse, cisaillement
- Zones propices à la formation de **vitesses verticales** (Rudnick 1996)
- Influence sur les **processus biogéochimiques** (Lévy *et al.*, 2018)



L'océan source de vie : le plancton

- **Plancton** : Ensemble des organismes pélagiques, entraînés **passivement** par les mouvements d'eau (Hensen, 1887)
- Base du **réseau trophique** de l'océan

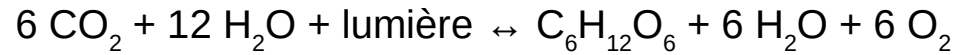


Sardet, 2013

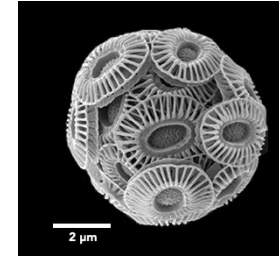
L'océan source de vie : le plancton

Le phytoplancton :

- **Phytoplancton** : Organismes planctoniques capables de réaliser la **photosynthèse** oxygénique

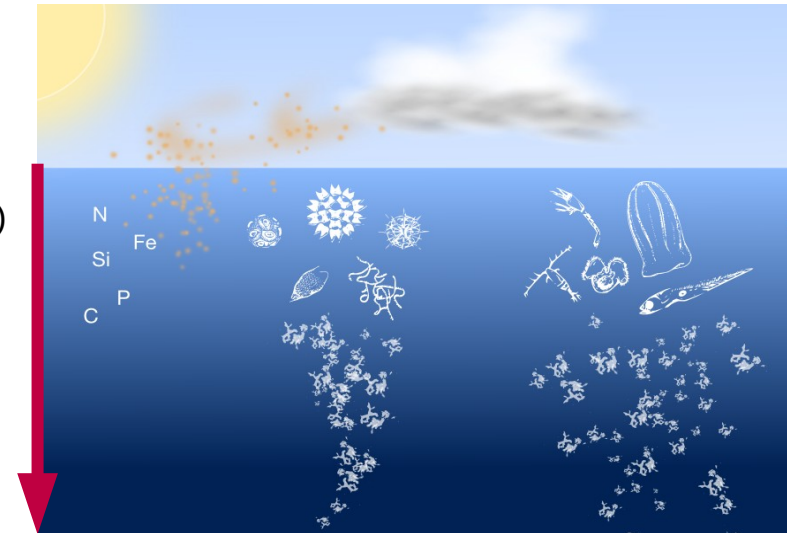


- **Source d'O₂** et **puits de CO₂**
- Pompe biologique du carbone : assimilation du CO₂ en surface et **séquestration en profondeur** (Falkowski *et al.*, 1998)
- **Séquestration** de 30 % du **CO₂ anthropogénique** depuis la révolution industrielle (Le Quéré *et al.*, 2015)



Coccolithophore

<https://commons.wikimedia.org>



<https://ocean-climate.org>

Quelle est l'influence de la circulation à fine échelle sur le phytoplancton ?

Différents effets ont été mis en évidence par **les modèles** (Lévy *et al.*, 2018) :

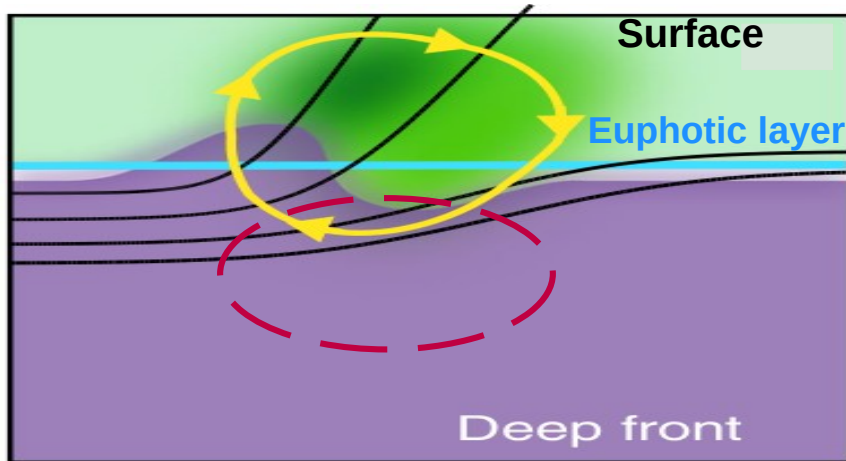
Effet sur la production primaire

Effet sur la distribution des
communautés phytoplanctoniques

Quelle est l'influence de la circulation à fine échelle sur le phytoplancton ?

Différents effets ont été mis en évidence par **les modèles** (Lévy *et al.*, 2018) :

Effet sur la production primaire



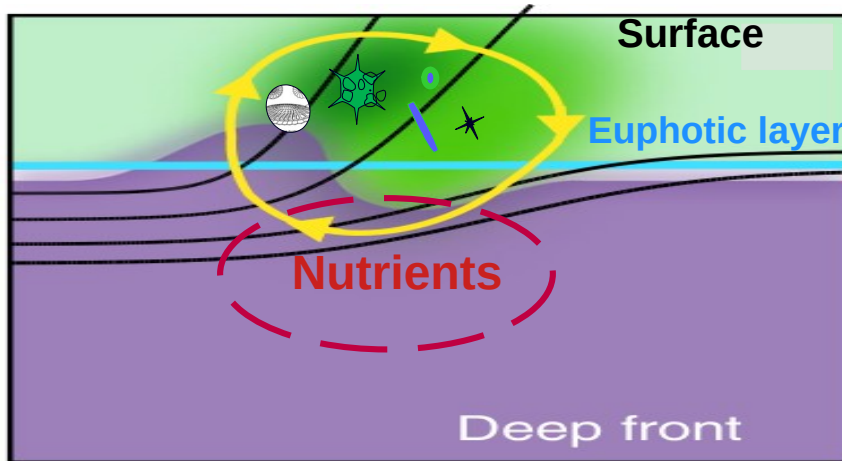
Effet sur la distribution des communautés phytoplanctoniques

Quelle est l'influence de la circulation à fine échelle sur le phytoplancton ?

Différents effets ont été mis en évidence par **les modèles** (Lévy *et al.*, 2018) :

Effet sur la production primaire

- Les **vitesse**s verticales peuvent influencer l'apport en **nutriments** et l'exposition à la **lumière** du phytoplancton



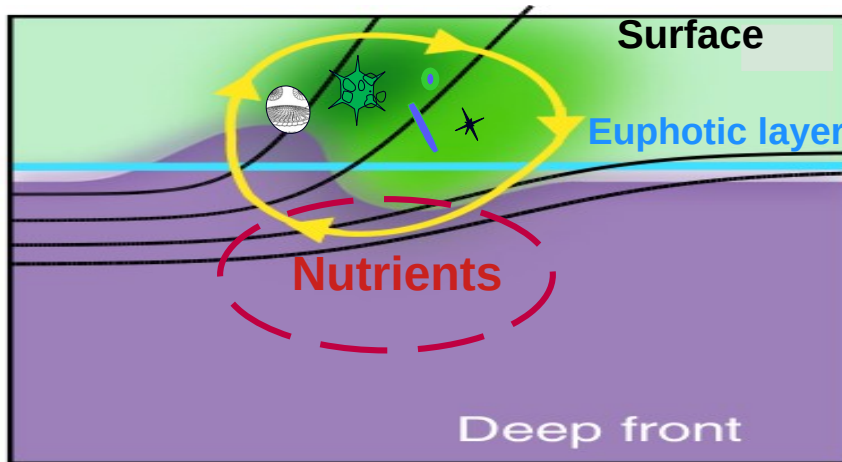
Effet sur la distribution des communautés phytoplanctoniques

Quelle est l'influence de la circulation à fine échelle sur le phytoplancton ?

Différents effets ont été mis en évidence par **les modèles** (Lévy *et al.*, 2018) :

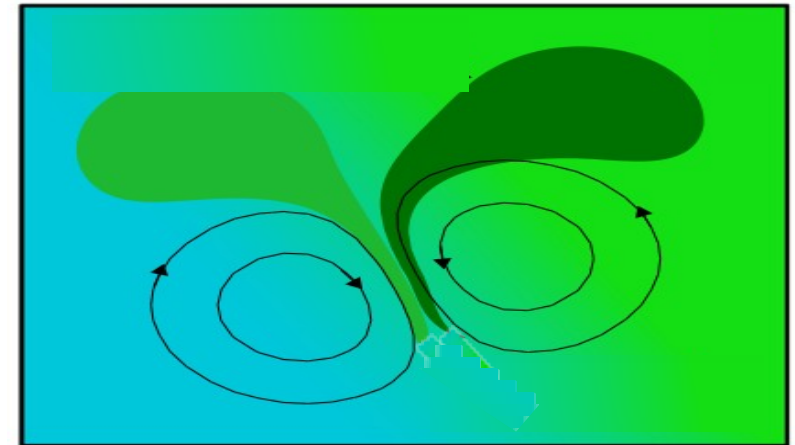
Effet sur la production primaire

→ Les **vitesse**s verticales peuvent influencer l'apport en **nutriments** et l'exposition à la **lumière** du phytoplancton



Adapté d'après Lévy *et al.*, 2018

Effet sur la distribution des communautés phytoplanctoniques



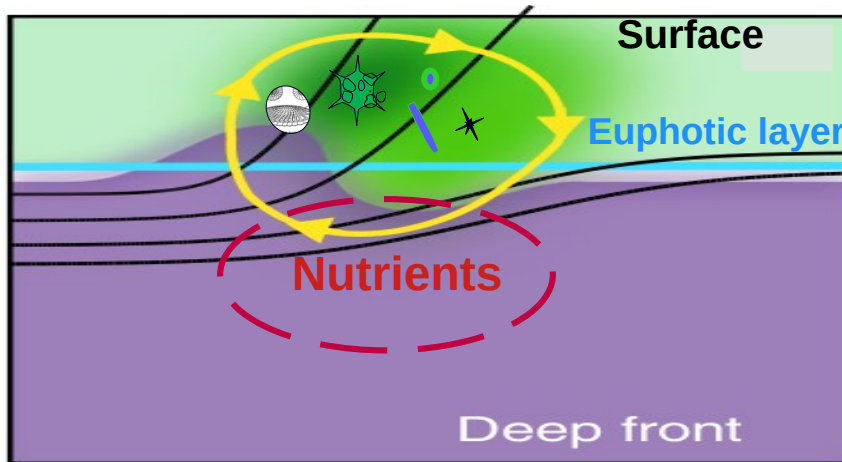
Adapté d'après Lévy *et al.*, 2018

Quelle est l'influence de la circulation à fine échelle sur le phytoplancton ?

Différents effets ont été mis en évidence par **les modèles** (Lévy *et al.*, 2018) :

Effet sur la production primaire

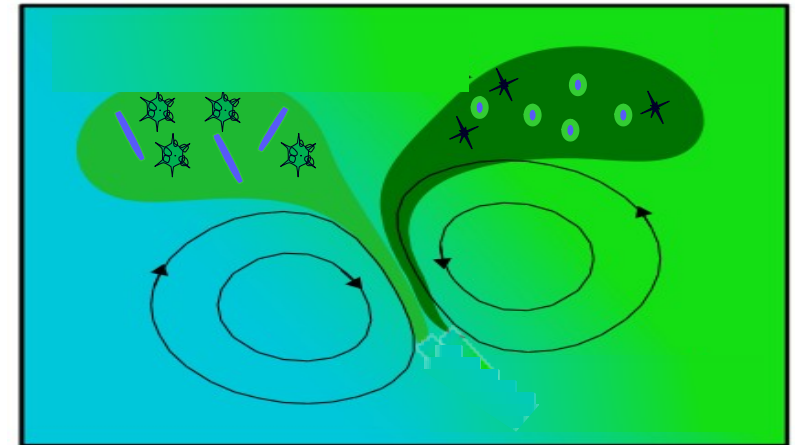
- Les **vitesse**s **verticales** peuvent influencer l'apport en **nutriments** et l'exposition à la **lumière** du phytoplancton



Adapté d'après Lévy *et al.*, 2018

Effet sur la distribution des communautés phytoplanctoniques

- Rôle '**barrière**' joué par les structures de fine échelle en particulier les **fronts**, pouvant séparer le phytoplancton



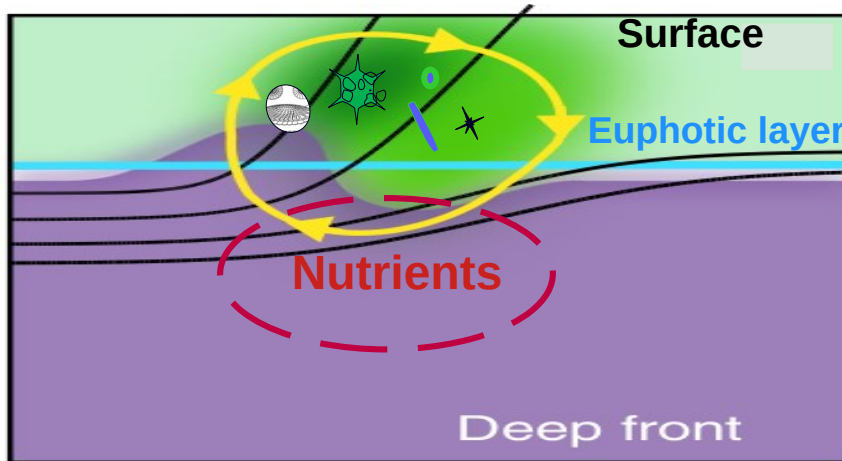
Adapté d'après Lévy *et al.*, 2018

Quelle est l'influence de la circulation à fine échelle sur le phytoplancton ?

Différents effets ont été mis en évidence par **les modèles** (Lévy *et al.*, 2018) :

Effet sur la production primaire

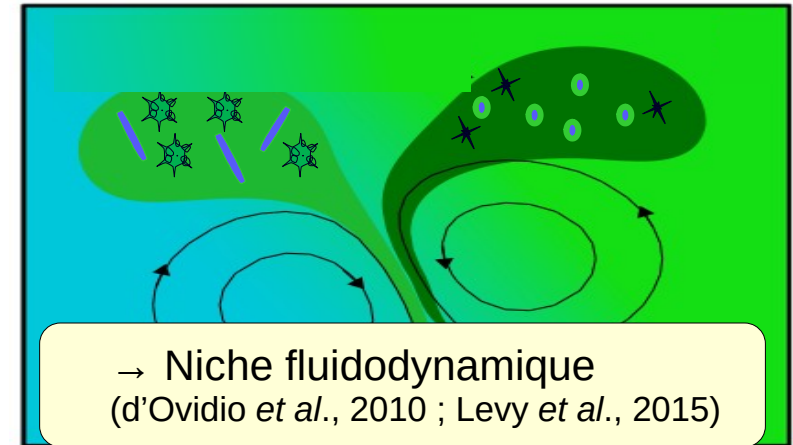
- Les **vitesse**s verticales peuvent influencer l'apport en **nutriments** et l'exposition à la **lumière** du phytoplancton



Adapté d'après Lévy *et al.*, 2018

Effet sur la distribution des communautés phytoplanctoniques

- Rôle '**barrière**' joué par les structures de fine échelle en particulier les **fronts**, pouvant séparer le phytoplancton



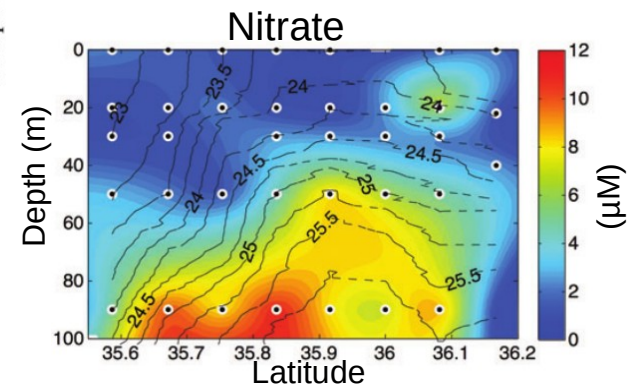
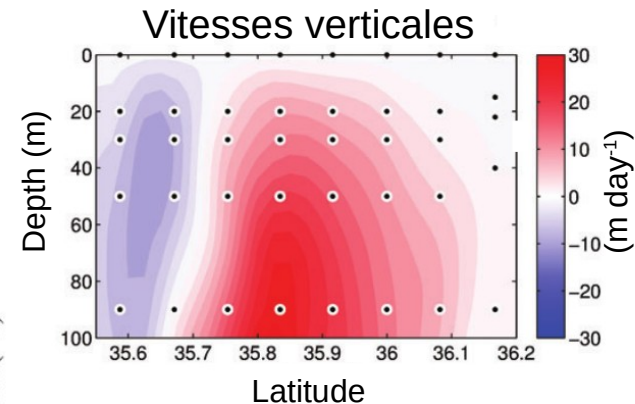
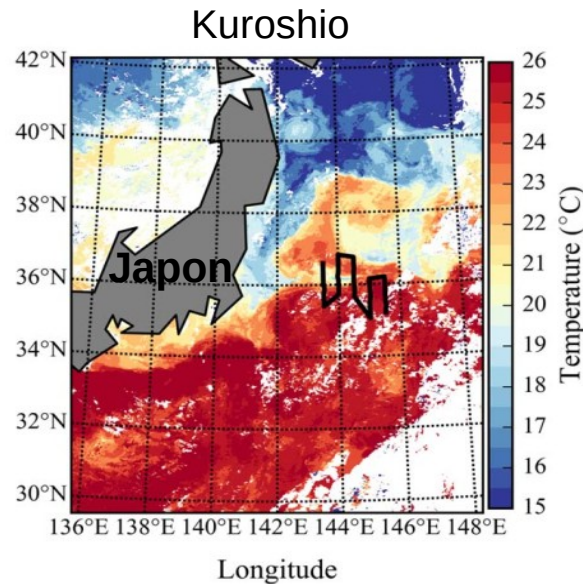
Adapté d'après Lévy *et al.*, 2018

Quelle est l'influence de la circulation à fine échelle sur le phytoplancton ?

→ Quelques **études in situ** réalisées dans les **fronts intenses** et **persistants** formés par les courants de bord ouest comme le Kuroshio (Clayton *et al.*, 2014)

→ Zones souvent riches en nutriments

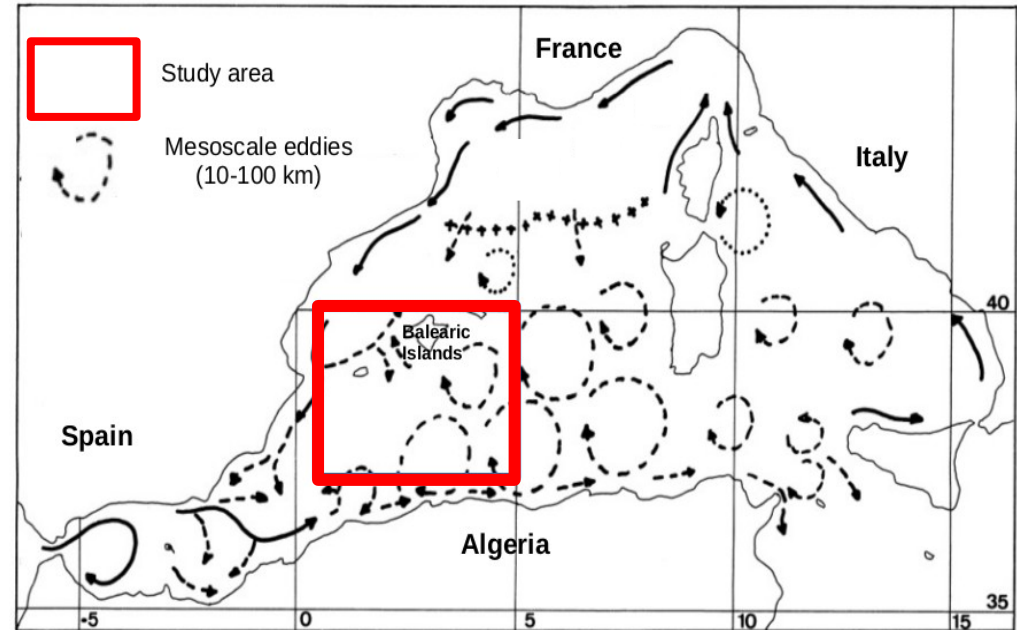
→ Zones non représentatives de l'océan global, **moins énergétique** et **oligotrophe**



La Méditerranée Occidentale : un laboratoire pour l'étude des fines échelles

- Zone d'étude : sud des îles Baléares
- Formation de tourbillons de mésoéchelle qui se propagent de manière cyclonique vers les Baléares ⇒ Apport d'eau Atlantique
- Apport d'eau Méditerranéenne en provenance du nord du bassin

→ Zone propice à la formation de structures de fine échelle



Adapté d'après Millot, 1999

Circulation dans le bassin occidental Méditerranéen

Problématiques de cette thèse

→ Les fronts d'énergie faible à modérée peuvent-ils générer des forçages physiques similaires à ceux observés dans les fronts plus intenses ?

→ Ces forçages sont-ils suffisants pour jouer un rôle sur la dynamique et la distribution des communautés phytoplanctoniques ?

Problématiques de cette thèse

- Les fronts d'énergie faible à modérée peuvent-ils générer des forçages physiques similaires à ceux observés dans les fronts plus intenses ?
- Ces forçages sont-ils suffisants pour jouer un rôle sur la dynamique et la distribution des communautés phytoplanctoniques ?
- La distribution des abondances phytoplanctoniques est-elle uniquement due à l'effet du front ou des mécanismes **biologiques** (notamment le **cycle cellulaire**) peuvent intervenir ?

Introduction

Matériel et
Méthodes

Couplage physique
et biologique

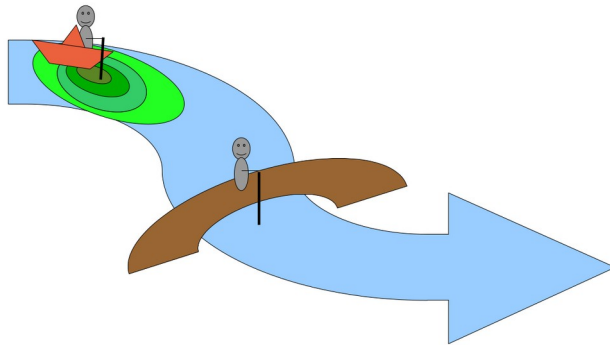
Dynamique
du phytoplancton

Conclusion &
Perspectives

Les mesures in situ de fine échelle : un challenge

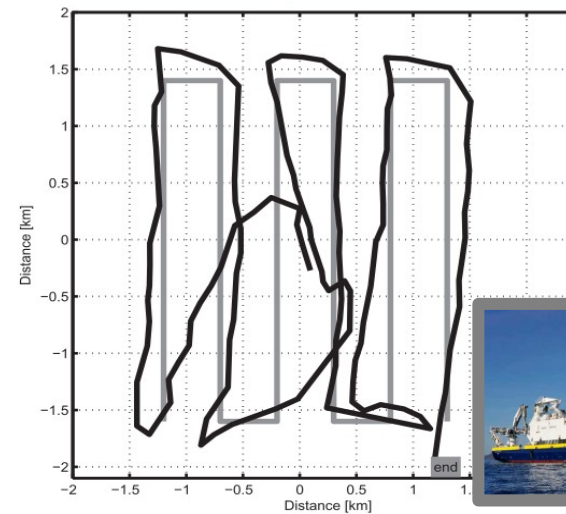
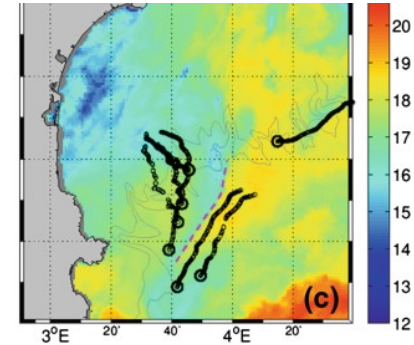
→ La variabilité des structures de fine échelle nécessite d'effectuer des mesures à haute résolution spatiale et temporelle

→ Développement de stratégies d'échantillonnage Lagrangiennes et adaptatives



→ Plusieurs campagnes : LATEX, OSCAHR, Alborex

→ Utilisation combinée de **données satellites**, de **modèles numériques**, de **mesures in situ**



Exemple de navigation Lagrangienne

La campagne PROTEVSMED-SWOT



→ 30 Avril – 18 Mai 2018

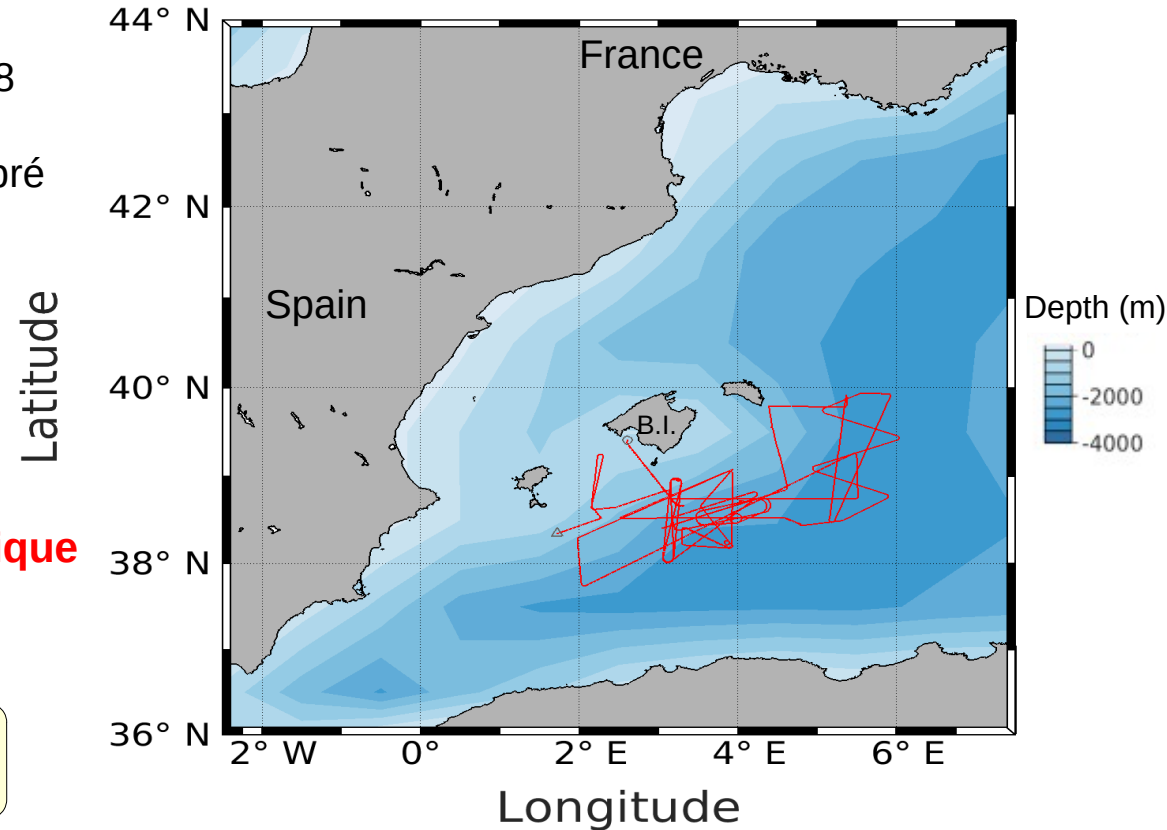
→ RV Beautemps-Beaupré

Objectifs de la campagne :

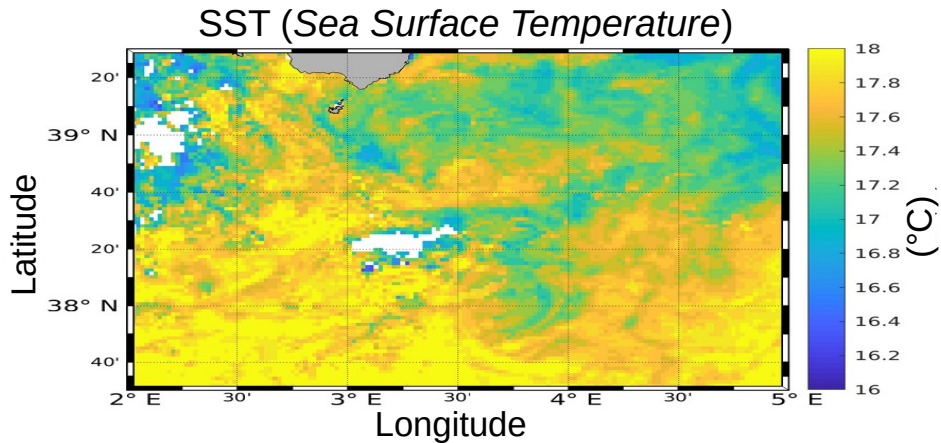
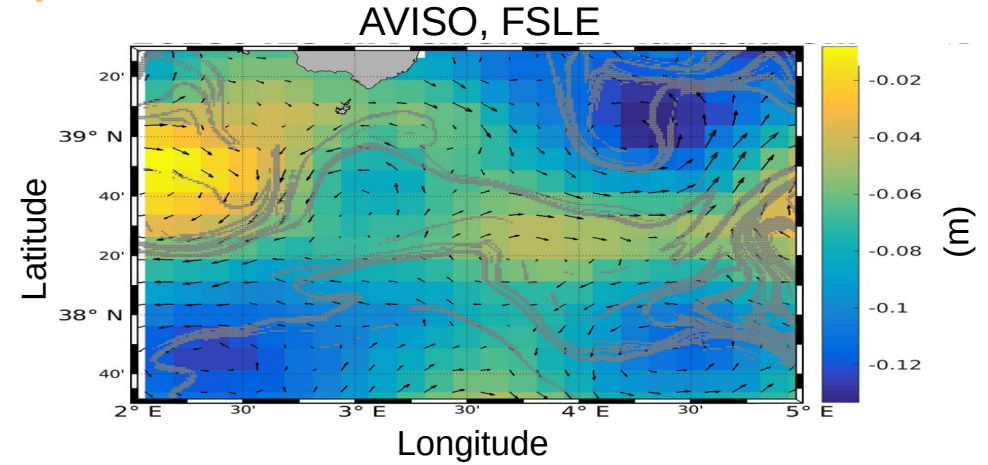
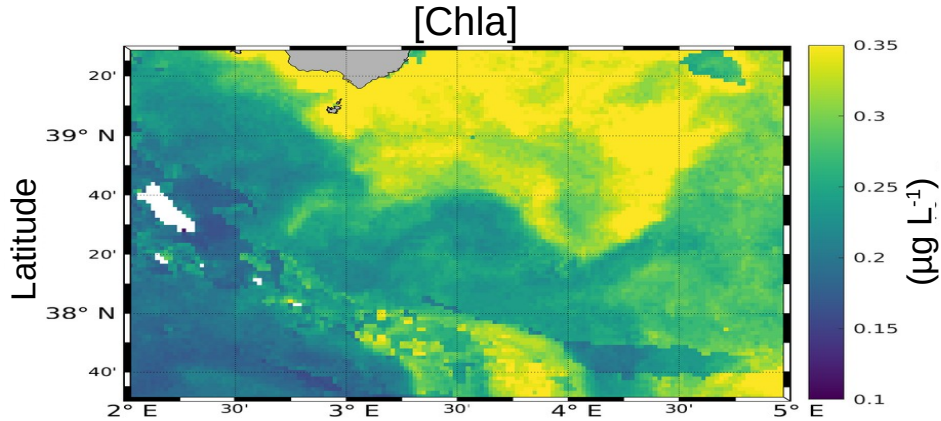
→ Développer/Améliorer les techniques de **stratégie d'échantillonnage Lagrangienne et adaptative** ⇒ **Couplage physique - biologique**

→ Identifier une **structure de fine échelle**

→ Etudier l'**influence** de cette structure sur le **phytoplancton**



Identification de la structure d'intérêt à partir des observations satellites

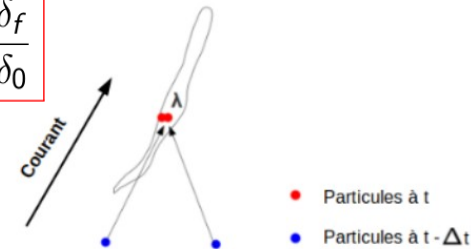


FSLE (*Finite Size Lyapunov Exponent*)

$$\lambda(x, t, \delta_0, \delta_f) \equiv \frac{1}{\tau} \log \frac{\delta_f}{\delta_0}$$

(d'Ovidio et al., 2004)
(Nencioli et al., 2011)

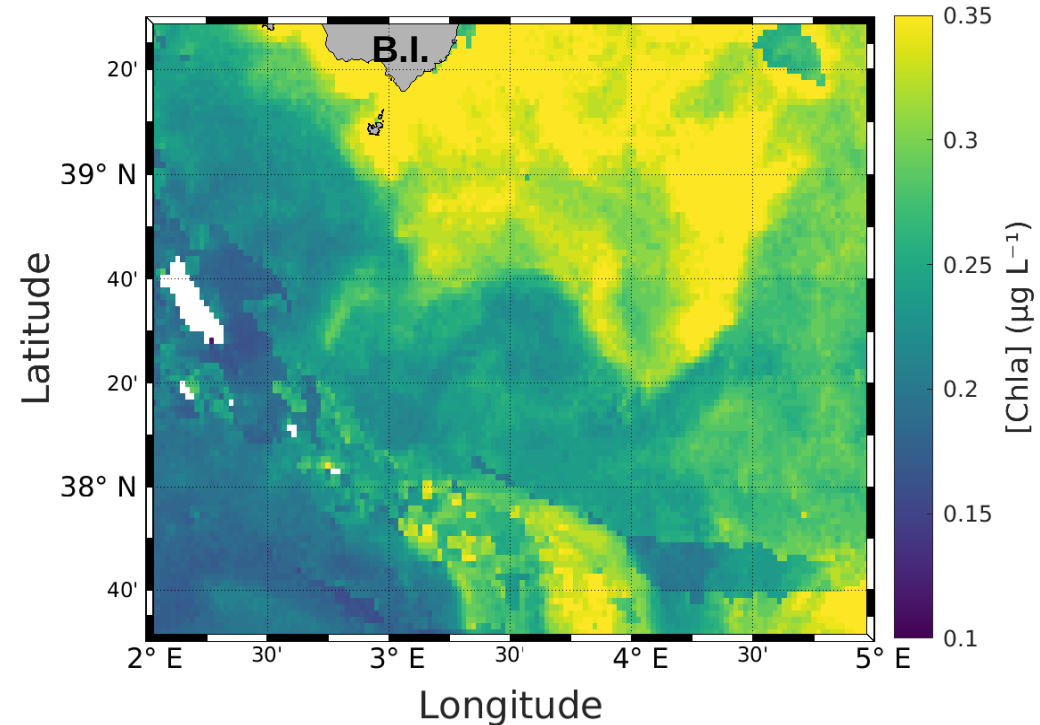
- x : position
- t : time
- δ_0 : initial distance
- δ_f : final distance
- τ : duration



Stratégie d'échantillonnage Lagrangienne et adaptative

- Traitement automatique (SPASSO) : **modèles** et **observations satellites** (altimétrie, couleur de l'océan, SST) en **temps quasi-réel**
- **Bulletin quotidien** pour guider l'échantillonnage du navire

→ Identification d'un **front** séparant **2 masses d'eau**, caractérisées par leur **concentration en chla**



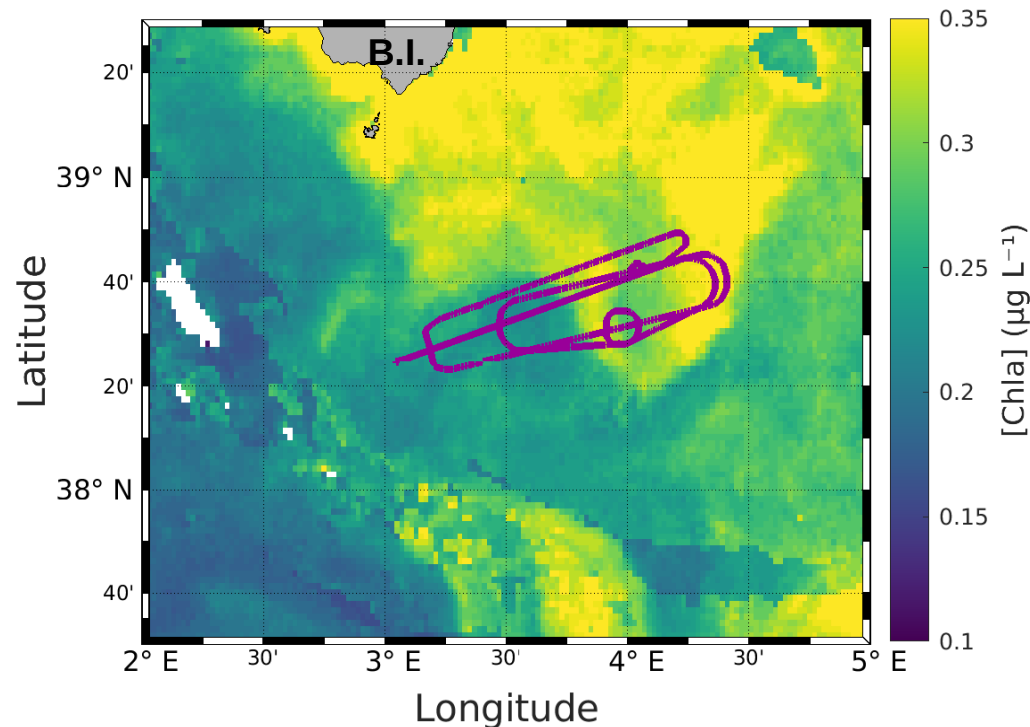
Stratégie d'échantillonnage Lagrangienne et adaptative

- Traitement automatique (SPASSO) : **modèles** et **observations satellites** (altimétrie, couleur de l'océan, SST) en **temps quasi-réel**
- **Bulletin quotidien** pour guider l'échantillonnage du navire

→ Identification d'un **front** séparant **2 masses d'eau**, caractérisées par leur **concentration en chla**

- Allers-retours du bateau à travers ces 2 masses d'eau

→ **"Hippodrome Ouest-Est"** : 8 - 10 Mai 2018



Stratégie d'échantillonnage Lagrangienne et adaptative

- Traitement automatique (SPASSO) : **modèles** et **observations satellites** (altimétrie, couleur de l'océan, SST) en **temps quasi-réel**
- **Bulletin quotidien** pour guider l'échantillonnage du navire

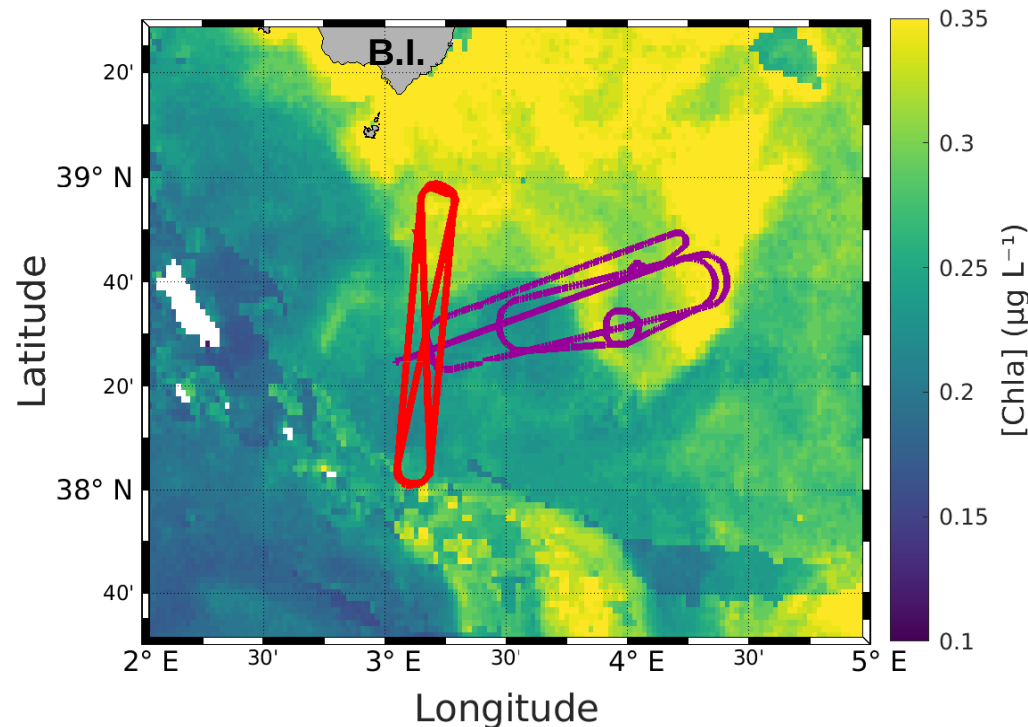
→ Identification d'un **front** séparant **2 masses d'eau**, caractérisées par leur **concentration en chla**

- Allers-retours du bateau à travers ces 2 masses d'eau

→ **"Hippodrome Ouest-Est"** : 8 - 10 Mai 2018

→ **"Hippodrome Nord-Sud"** : 11 - 13 Mai 2018

→ Suivre **évolution masses d'eau**, et reconstruire le **cycle circadien** du phytoplancton



Les différents instruments de mesure

→ Différents instruments de mesures ont été utilisé pour mesurer à **haute fréquence spatiale et temporelle** les **variables physiques et biologiques**

ADCP de coque



→ Mesure courants

SeaSoar



→ Mesure température
et salinité

Cytomètre en flux automatisé

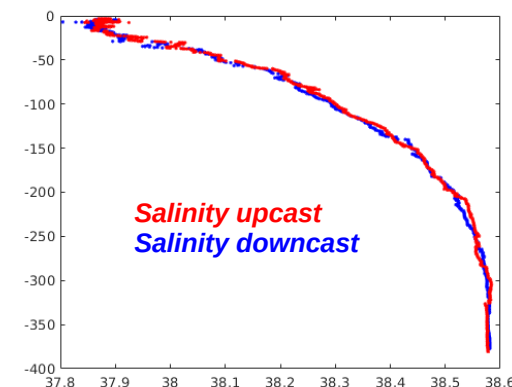
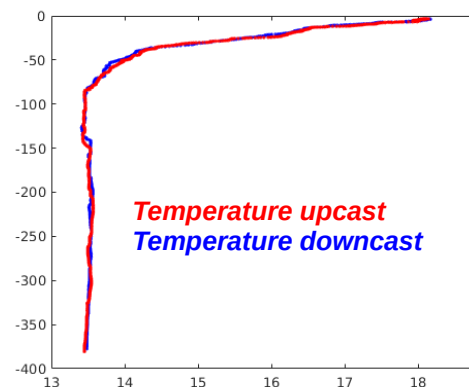
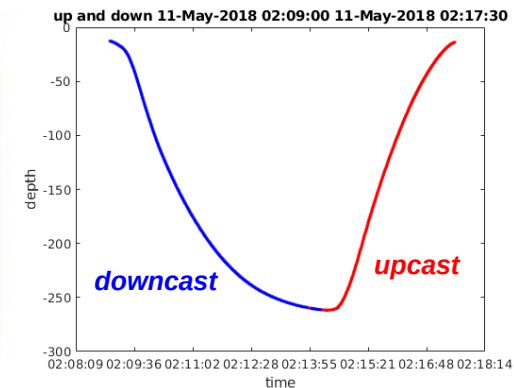


→ Analyse et identification
du phytoplancton

Traitements des données : *thermal-lag*

- **SeaSoar** : planeur sous-marin tracté, capable de réaliser des **ondulations** de la surface jusqu'à ~ 300 mètres
 - Diffusion de **chaleur** par la cellule de conductivité
 - ====> différence entre la température mesurée à l'intérieur et à l'extérieur de la cellule de conductivité
 - ====> affecte le calcul de **salinité**
- (Morison *et al.*, 1994)

- Correction du thermal-lag
- Conversion en Temperature Conservative et Salinité Absolue (TEOS-10)
- Calcul de ρ



Calcul des vitesses verticales

Les vitesses verticales :

- Estimation des **vitesses verticales** dans la zone de **front** avec l'**équation Oméga** (Hoskin *et al.*, 1978) :

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

Q-vector :

$$\mathbf{Q} = (\mathbf{Q1}, \mathbf{Q2}) = \left(\frac{g}{\rho_0} \frac{\partial V_g}{\partial x} \cdot \nabla \rho, \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial V_g}{\partial y} \cdot \nabla \rho \right)$$

- f : paramètre de Coriolis (s^{-1})
- w : vitesse verticale (m s^{-1})
- N^2 : fréquence de Brünt Väisälä
- $\mathbf{V}_g = (u_g, v_g)$: courants horizontaux géostrophiques (m s^{-1})
- ρ : masse volumique (kg m^{-3})
- ρ_0 : masse volumique de référence (kg m^{-3})

Calcul des vitesses verticales

Les vitesses verticales :

- Estimation des **vitesses verticales** dans la zone de **front** avec l'**équation Oméga** (Hoskin *et al.*, 1978) :

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

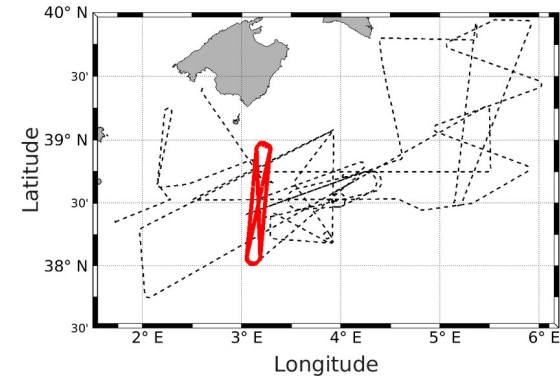
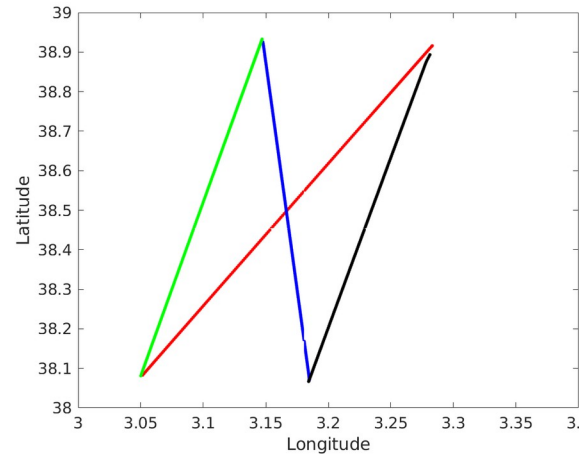
Q-vector :

$$\mathbf{Q} = (\mathbf{Q1}, \mathbf{Q2}) = \left(\frac{g}{\rho_0} \frac{\partial V_g}{\partial x} \cdot \nabla \rho, \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial V_g}{\partial y} \cdot \nabla \rho \right)$$

- f : paramètre de Coriolis (s^{-1})
- w : vitesse verticale ($m s^{-1}$)
- N^2 : fréquence de Brünt Vaisäla
- $\mathbf{V}_g = (u_g, v_g)$: courants horizontaux géostrophiques ($m s^{-1}$)
- ρ : masse volumique ($kg m^{-3}$)
- ρ_0 : masse volumique de référence ($kg m^{-3}$)

Etapes préliminaires :

- Détermination d'une zone d'étude :
- Sélection transect de l'hippodrome NS
 - Echantillonnage régulier
 - Synopticité



11 Mai 2:10 am – 8:40 am
 11 Mai 10:00 am – 4:40 pm
 11 Mai 6:00 pm – 12 Mai 00:45 am
 12 Mai 2:00 am – 8:20 am

Calcul des vitesses verticales

Les vitesses verticales :

- Estimation des **vitesses verticales** dans la zone de **front** avec l'**équation Oméga** (Hoskin *et al.*, 1978) :

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

Q-vector :

$$\mathbf{Q} = (\mathbf{Q1}, \mathbf{Q2}) = \left(\frac{g}{\rho_0} \frac{\partial V_g}{\partial x} \cdot \nabla \rho, \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial V_g}{\partial y} \cdot \nabla \rho \right)$$

- f : paramètre de Coriolis (s^{-1})
- w : vitesse verticale (m s^{-1})
- N^2 : fréquence de Brünt Väisälä
- $\mathbf{V}_g = (u_g, v_g)$: courants horizontaux géostrophiques (m s^{-1})
- ρ : masse volumique (kg m^{-3})
- ρ_0 : masse volumique de référence (kg m^{-3})

Etape préliminaire : cartographie objective

- Interpolation des données de **masse volumique** et de **courant horizontal** mesurés in situ sur une grille 3D : méthode de **cartographie objective** (Rudnick, 1996)

Calcul des vitesses verticales

Les vitesses verticales :

- Estimation des **vitesses verticales** dans la zone de **front** avec l'**équation Oméga** (Hoskin *et al.*, 1978) :

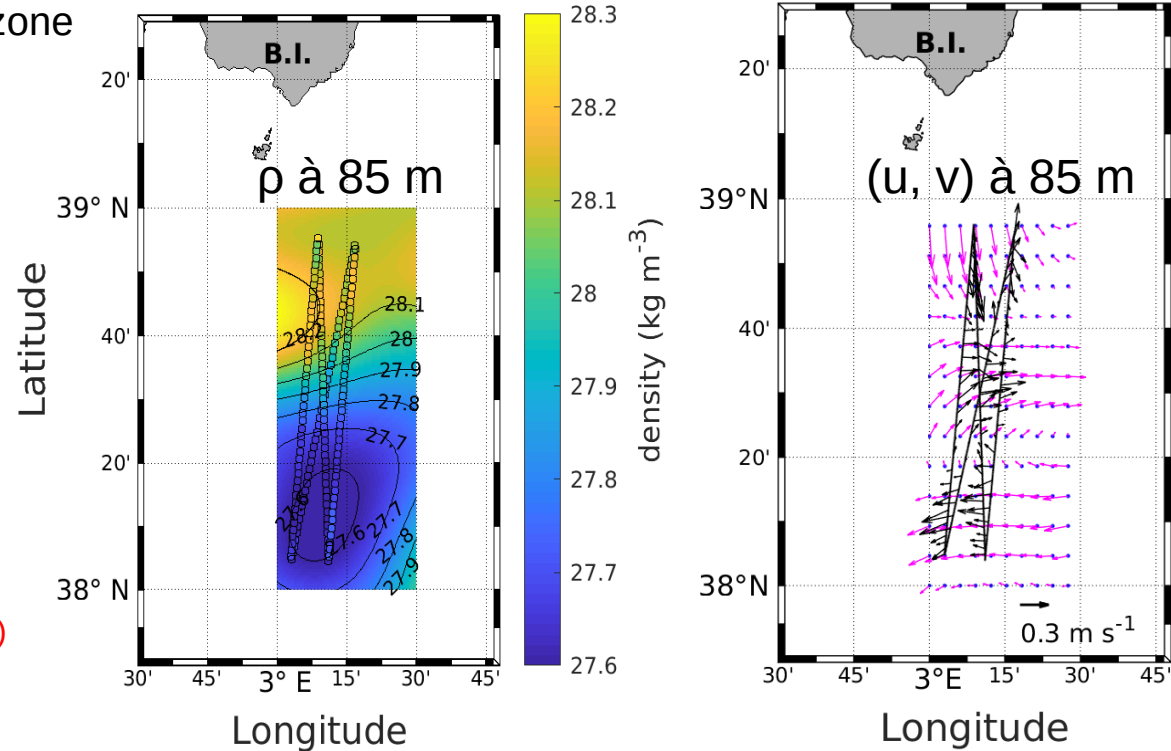
$$\nabla^2(N^2 w) + f^2 \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} = 2 \nabla \cdot \mathbf{Q}$$

Q-vector :

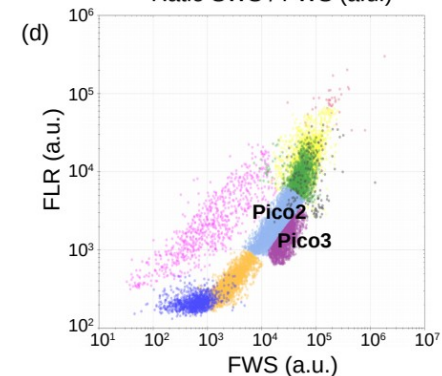
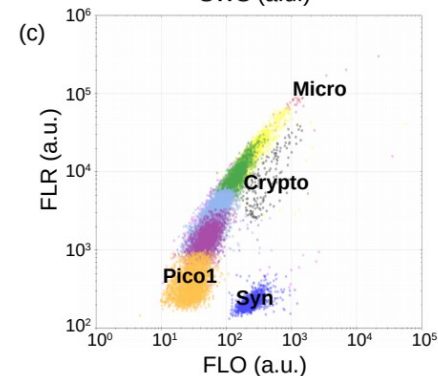
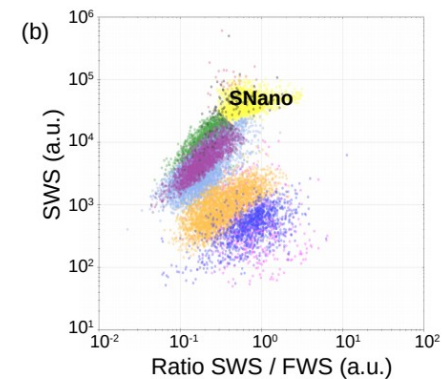
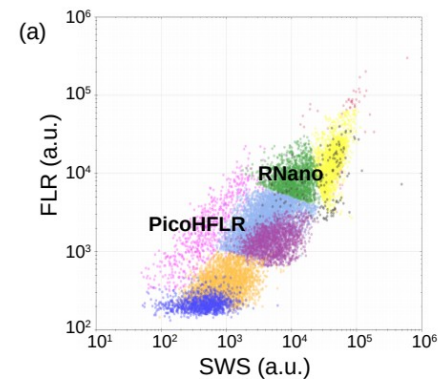
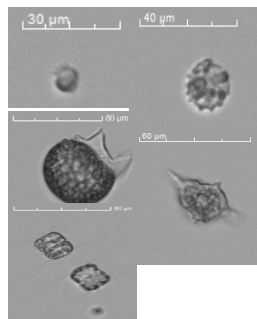
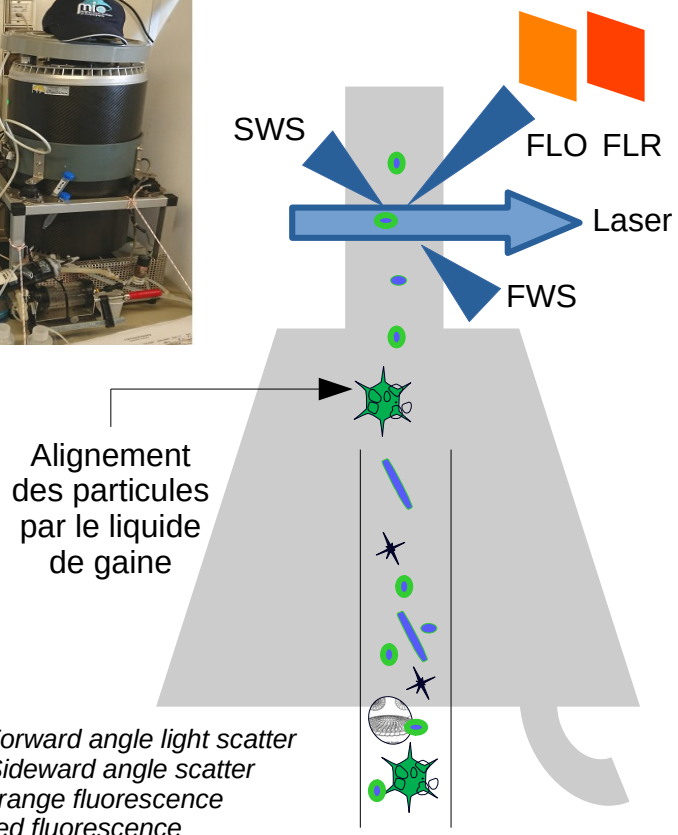
$$\mathbf{Q} = (\mathbf{Q1}, \mathbf{Q2}) = \left(\frac{g}{\rho_0} \frac{\partial V_g}{\partial x} \cdot \nabla \rho, \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial V_g}{\partial y} \cdot \nabla \rho \right)$$

- f : paramètre de Coriolis (s^{-1})
- w : vitesse verticale (m s^{-1})
- N^2 : fréquence de Brünt Väisälä
- $\mathbf{V}_g = (u_g, v_g)$: courants horizontaux géostrophiques (m s^{-1})
- ρ : masse volumique (kg m^{-3})
- ρ_0 : masse volumique de référence (kg m^{-3})

Etape préliminaire : cartographie objective

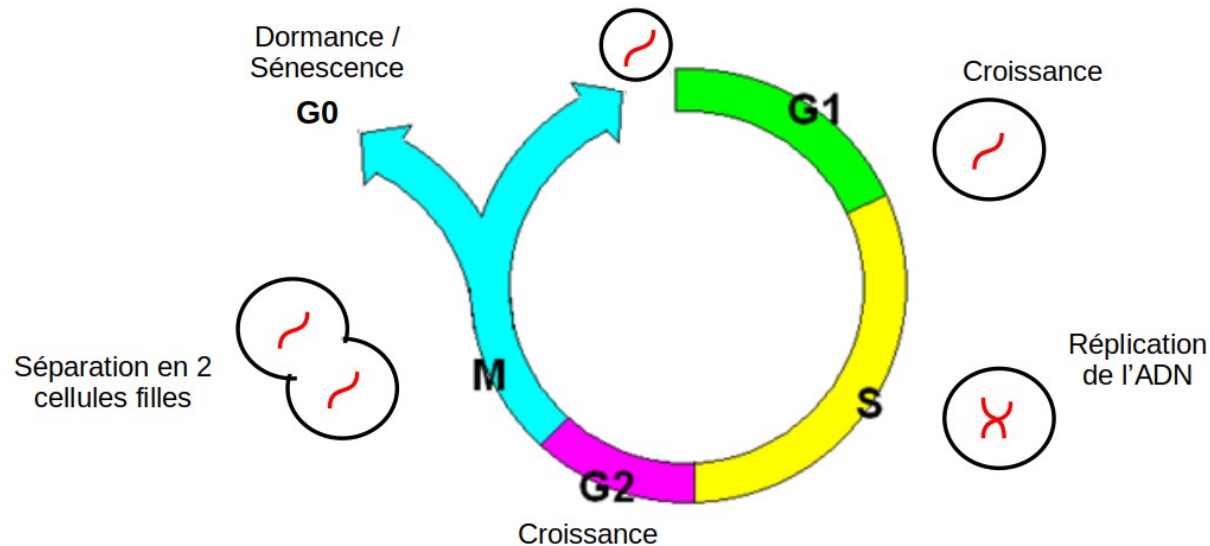


Identification des groupes phytoplanctoniques par cytométrie en flux



Estimation de la dynamique des groupes phytoplanctoniques : *The size-structured population model (Sosik et al., 2003)*

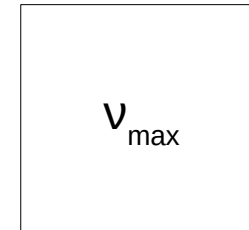
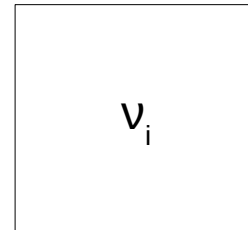
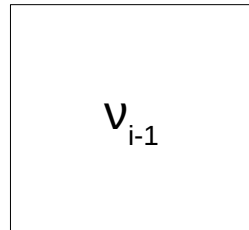
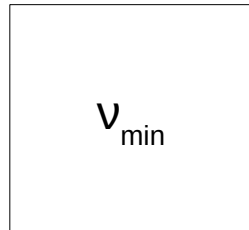
→ Le cycle cellulaire du phytoplancton



Estimation de la dynamique des groupes phytoplanctoniques : *The size-structured population model (Sosik et al., 2003)*

- Conversion FWS mesuré par cytométrie en flux en flux en taille de cellule : biovolume (v)
- Chaque cellule transite à travers plusieurs classes de taille au cours d'une journée

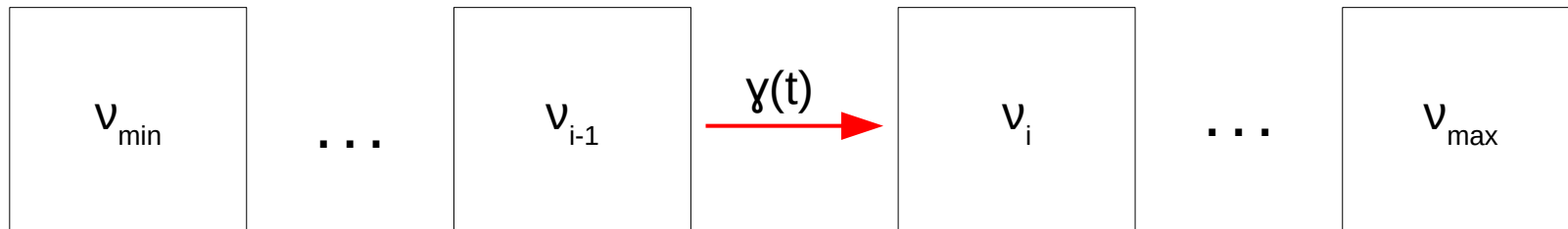
Schéma adapté d'après Sosik et al., 2003



Estimation de la dynamique des groupes phytoplanctoniques : *The size-structured population model (Sosik et al., 2003)*

- Conversion FWS mesuré par cytométrie en flux en taille de cellule : biovolume (v)
- Chaque cellule transite à travers plusieurs classes de taille au cours d'une journée

Schéma adapté d'après Sosik et al., 2003



$\gamma(t)$: croissance de la cellule

Estimation de la dynamique des groupes phytoplanctoniques : The size-structured population model (Sosik et al., 2003)

- Conversion FWS mesuré par cytométrie en flux en taille de cellule : biovolume (v)
- Chaque cellule transite à travers plusieurs classes de taille au cours d'une journée

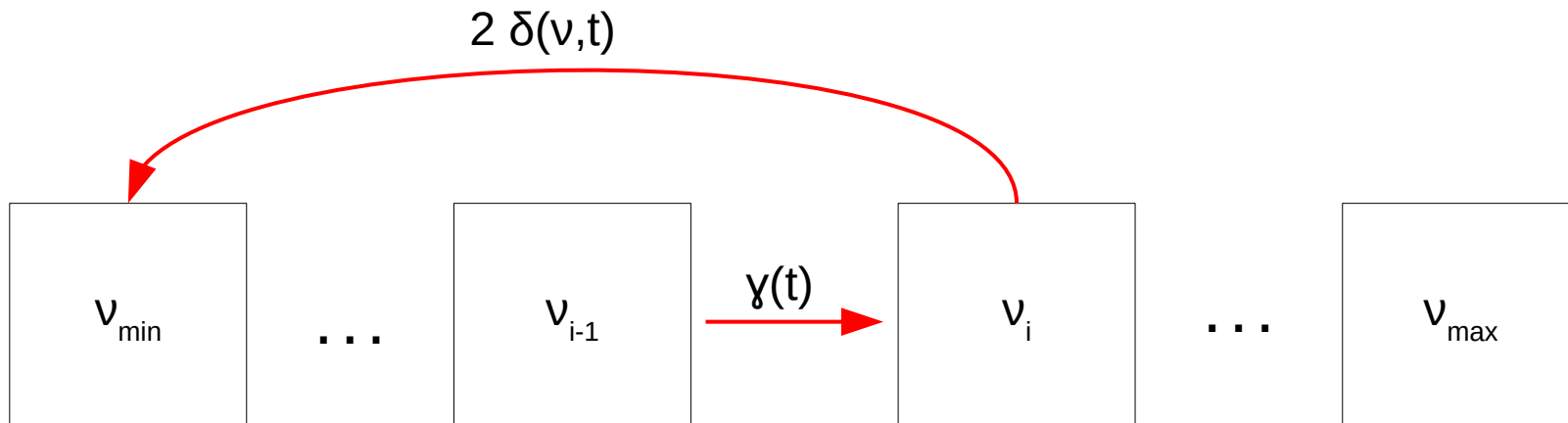


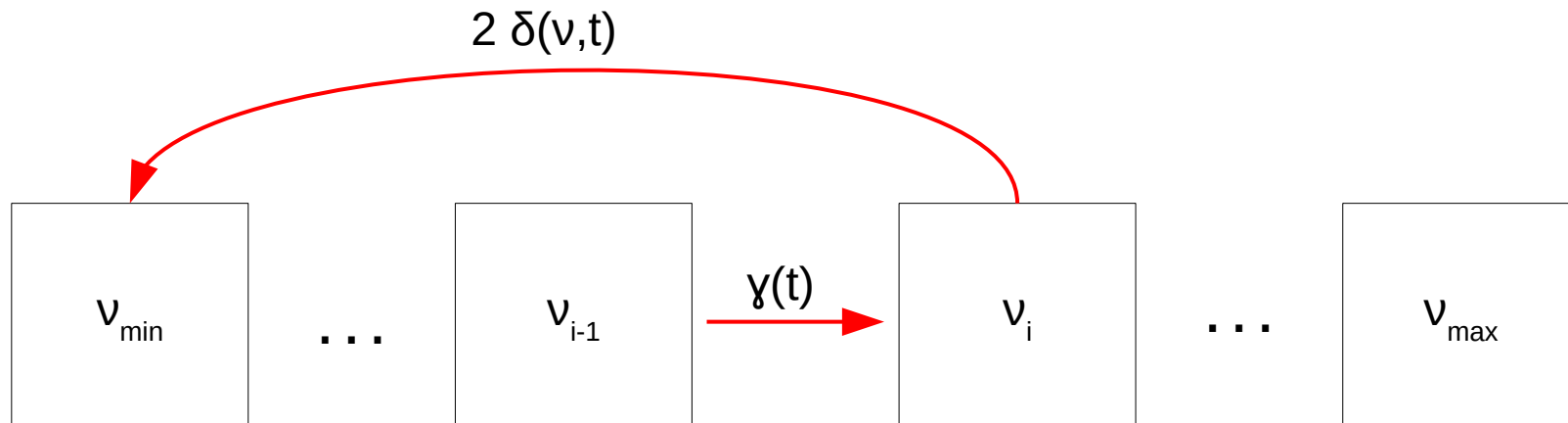
Schéma adapté d'après Sosik et al., 2003

$\gamma(t)$: croissance de la cellule
 $2 \delta(v,t)$: division de la cellule

Estimation de la dynamique des groupes phytoplanctoniques : *The size-structured population model (Sosik et al., 2003)*

- Conversion FWS mesuré par cytométrie en flux en taille de cellule : biovolume (v)
- Chaque cellule transite à travers plusieurs classes de taille au cours d'une journée

Schéma adapté d'après Sosik et al., 2003



$\gamma(t)$: croissance de la cellule
 $2 \delta(v,t)$: division de la cellule



N : nb de cellules
par classes de taille

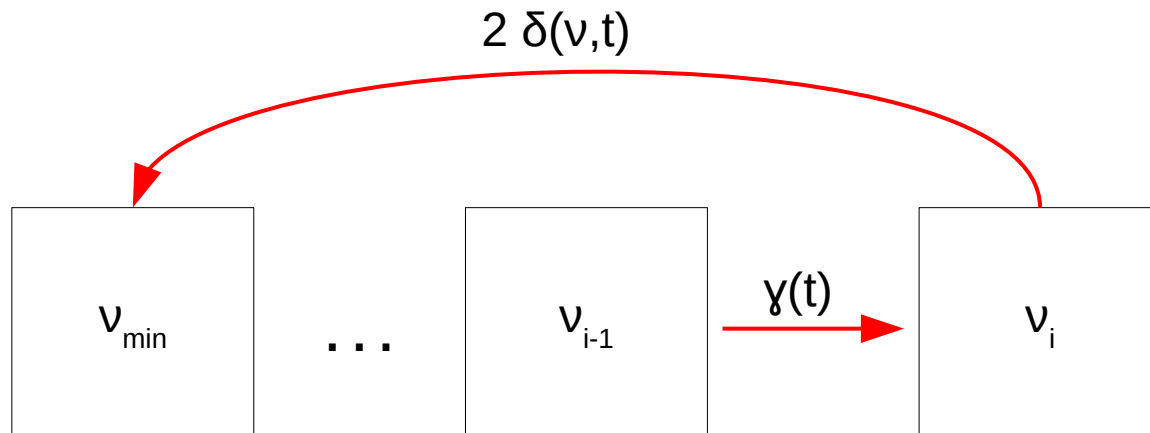


$\mu(t)$: taux de croissance
 $l(t)$: taux de perte

Estimation de la dynamique des groupes phytoplanctoniques : The size-structured population model (Sosik et al., 2003)

- Conversion FWS mesuré par cytométrie en flux en taille de cellule : biovolume (v)
- Chaque cellule transite à travers plusieurs classes de taille au cours d'une journée

Schéma adapté d'après Sosik et al., 2003



- Modèle appliqué à *Prochlorococcus* et *Synechococcus* (Ribalet et al., 2010 ; Marrec et al., 2018)
- Certain type de diatomées (Dugenne et al., 2014)
- Mais jamais à l'ensemble des groupes phytoplanctoniques définis par cytométrie en flux

$\gamma(t)$: croissance de la cellule
 $2 \delta(v,t)$: division de la cellule

N : nb de cellules
 par classes de taille

$\mu(t)$: taux de croissance
 $l(t)$: taux de perte

Introduction

Matériel et
Méthodes

**Couplage physique
et biologique**

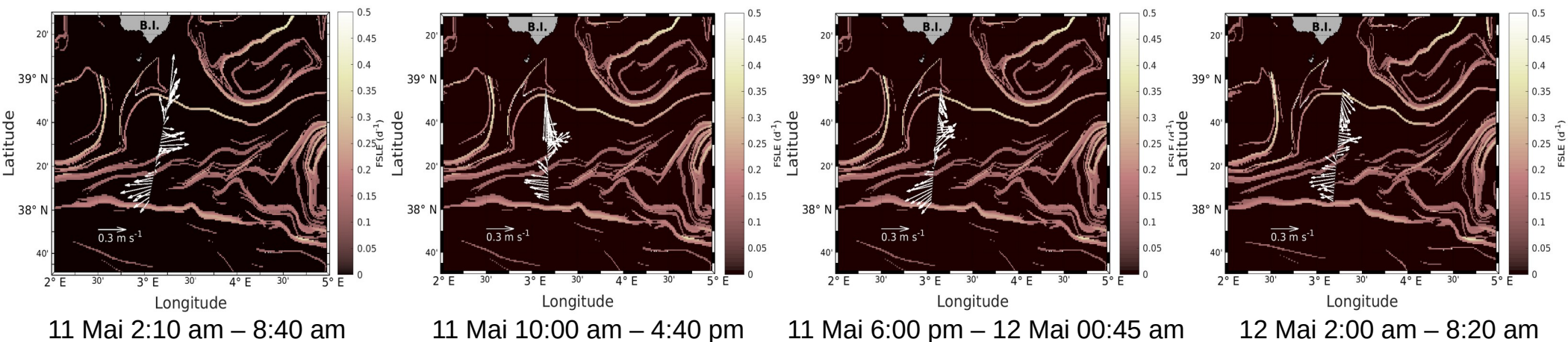
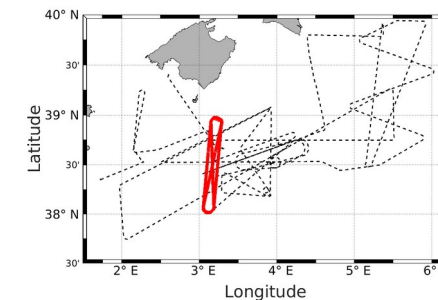
Dynamique
du phytoplancton

Conclusion &
Perspectives

Hydrodynamique

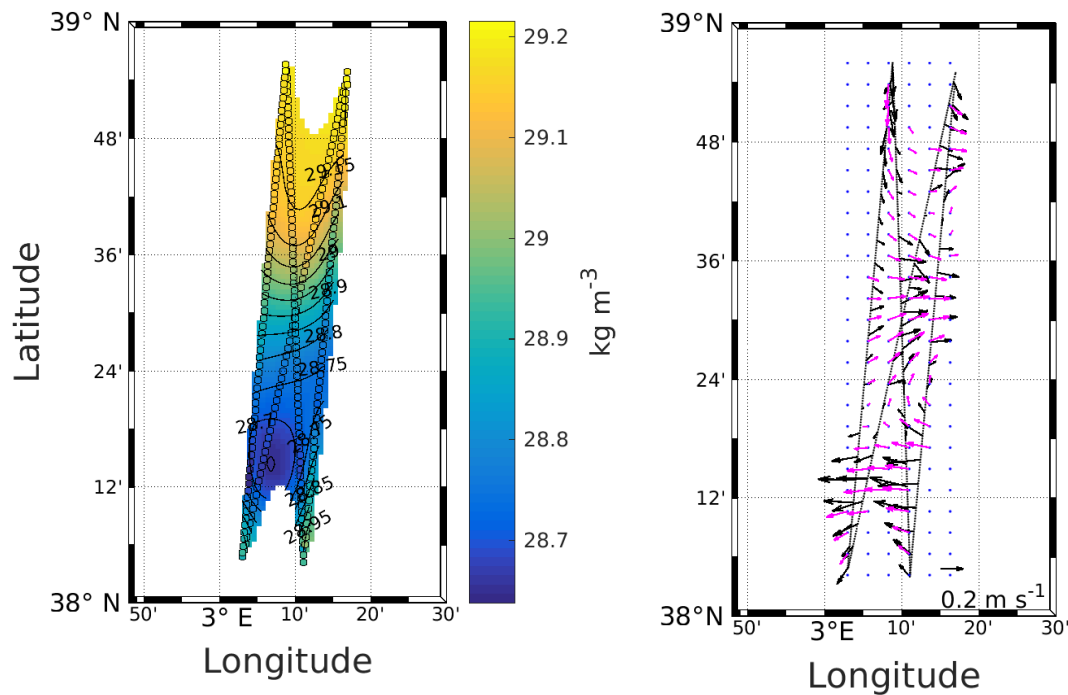
Courants horizontaux le long de l'hippodrome NS :

- Courants horizontaux mesurés par ADCP
- Superposés aux FSLE(s)

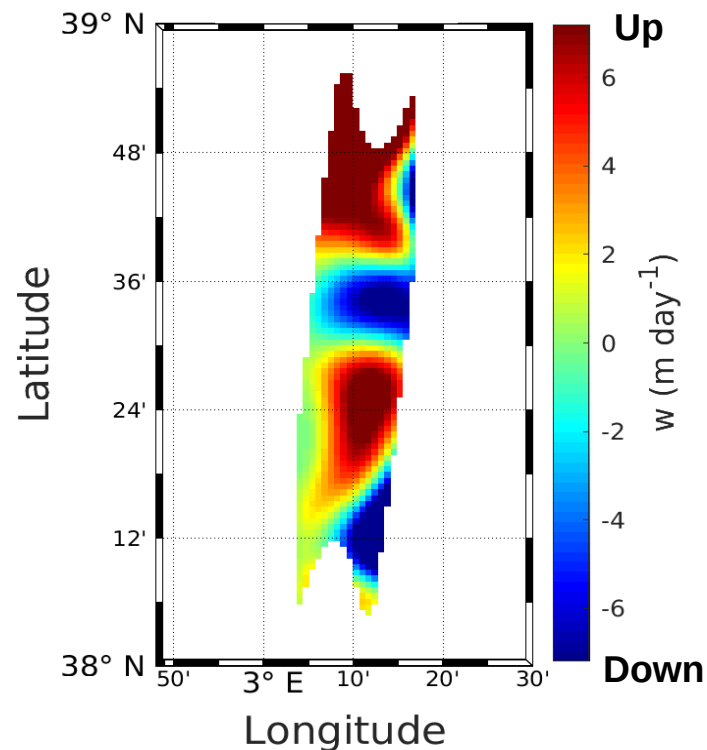


→ Identification d'un front localisé aux alentours de 38°N 20'

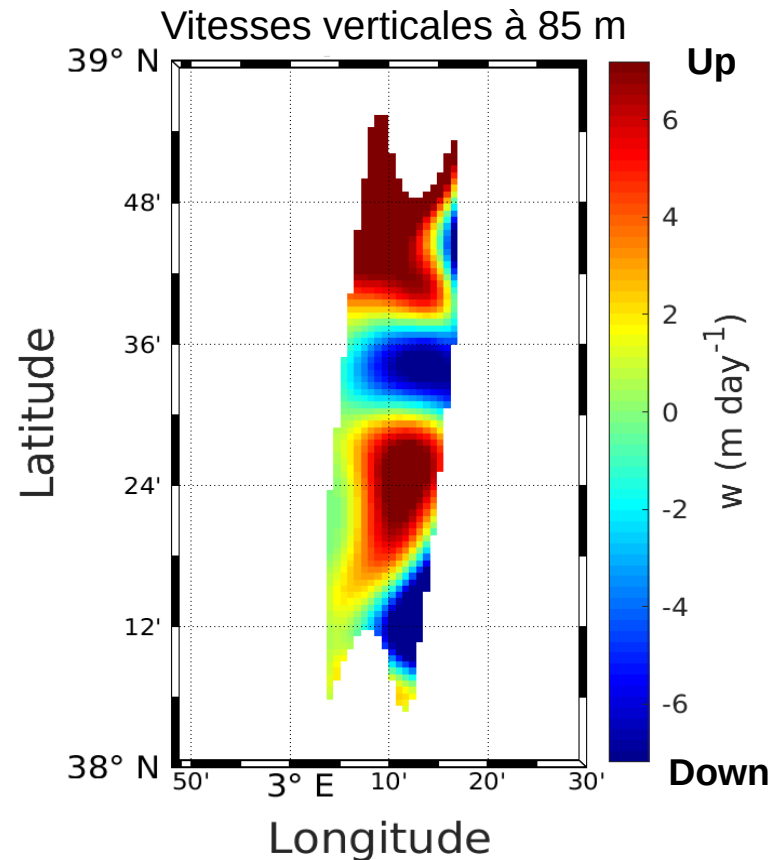
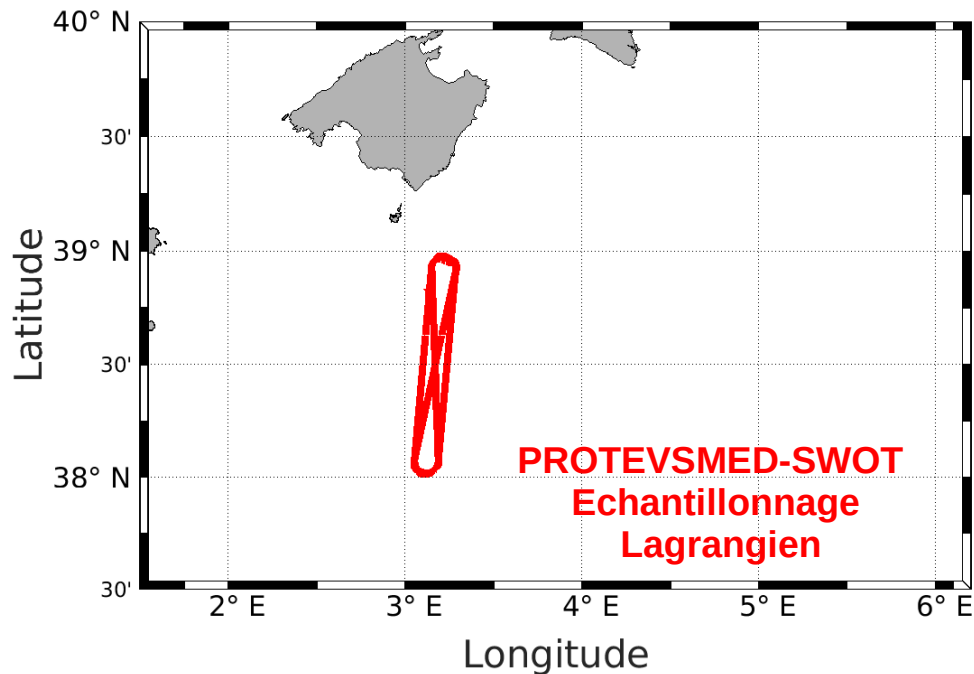
Les vitesses verticales

Cartographie objective de ρ et (u, v) à 85 m

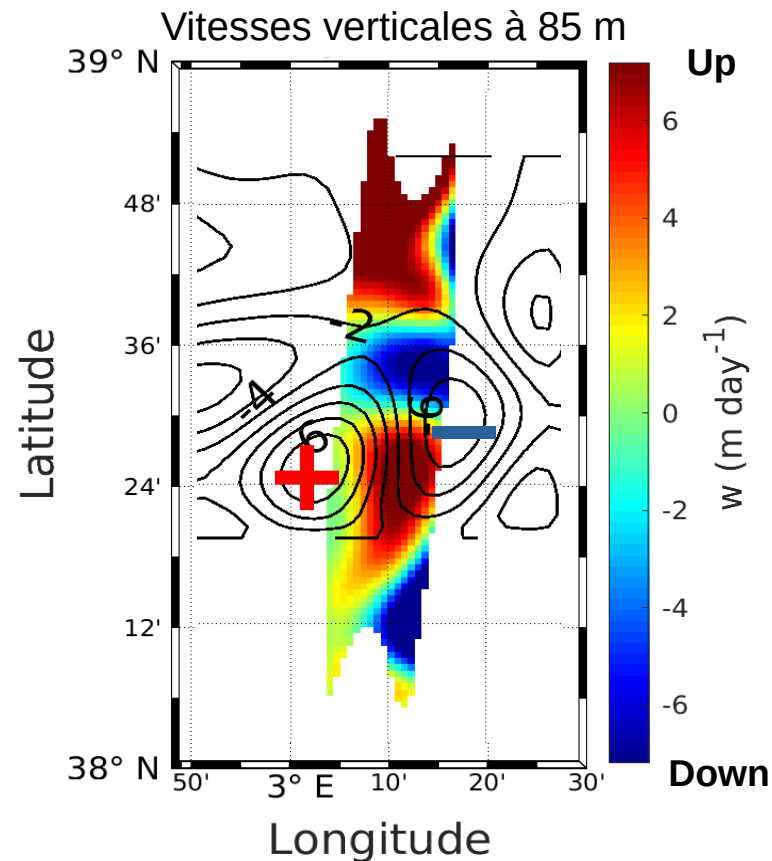
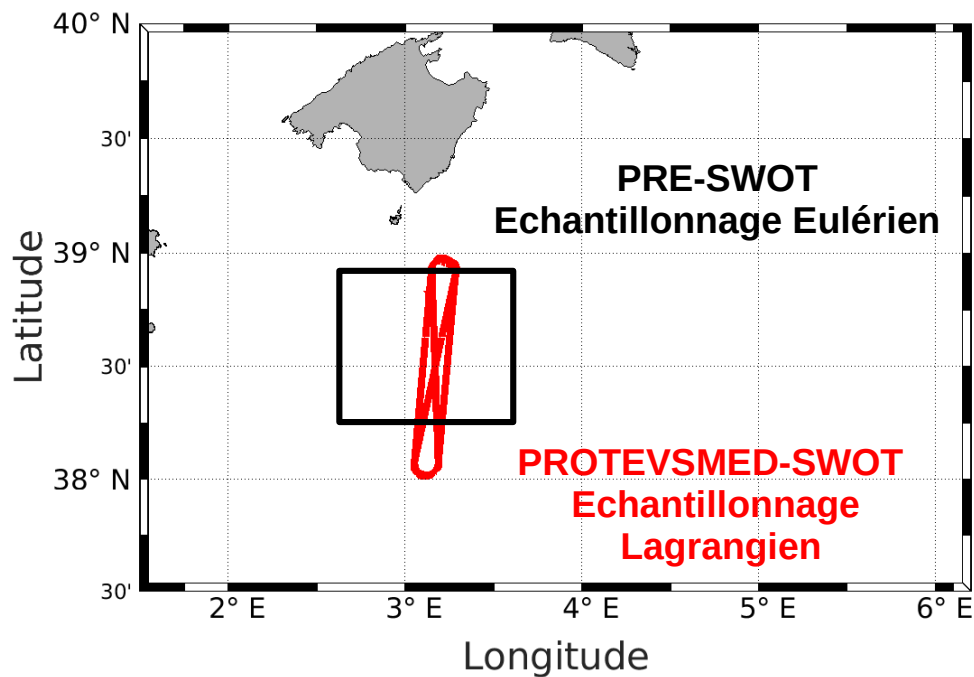
Vitesses verticales à 85 m



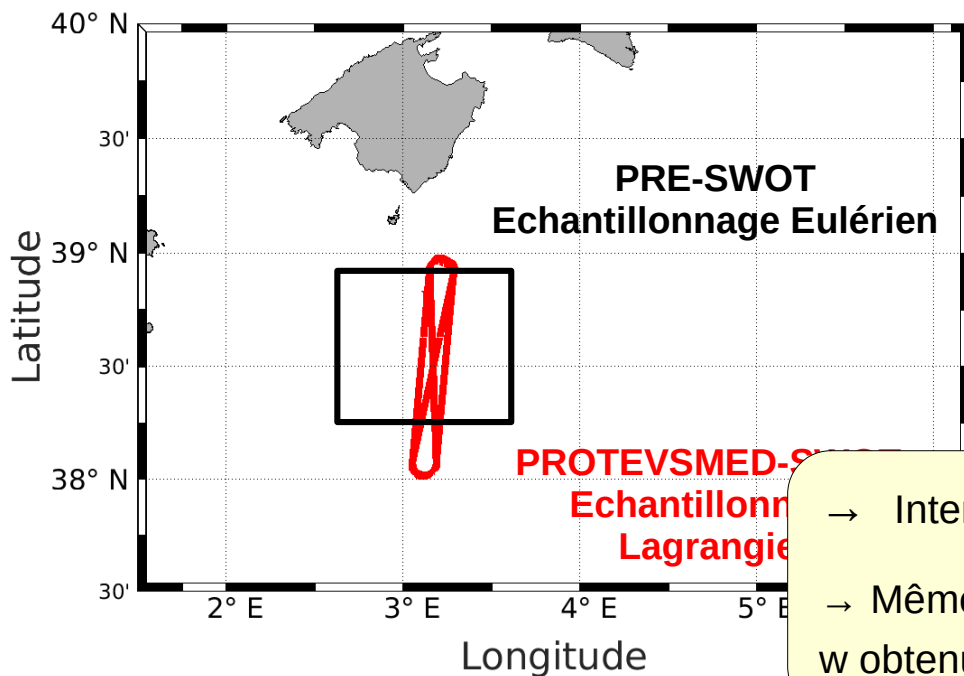
Les vitesses verticales : Comparaison avec la campagne PRE-SWOT (IMEDEA)



Les vitesses verticales : Comparaison avec la campagne PRE-SWOT (IMEDEA)

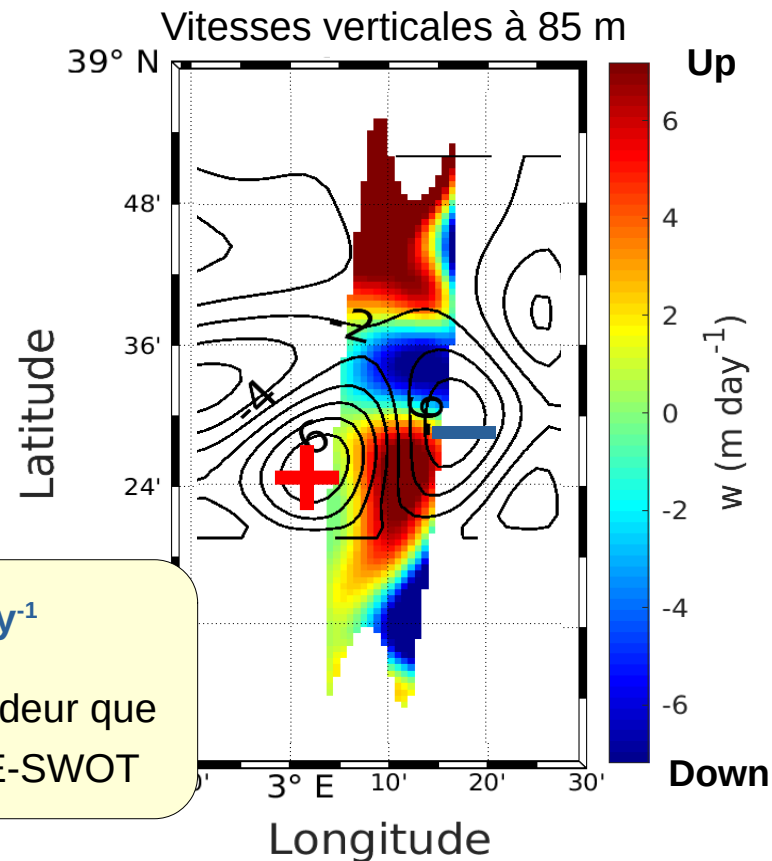


Les vitesses verticales : Comparaison avec la campagne PRE-SWOT (IMEDEA)

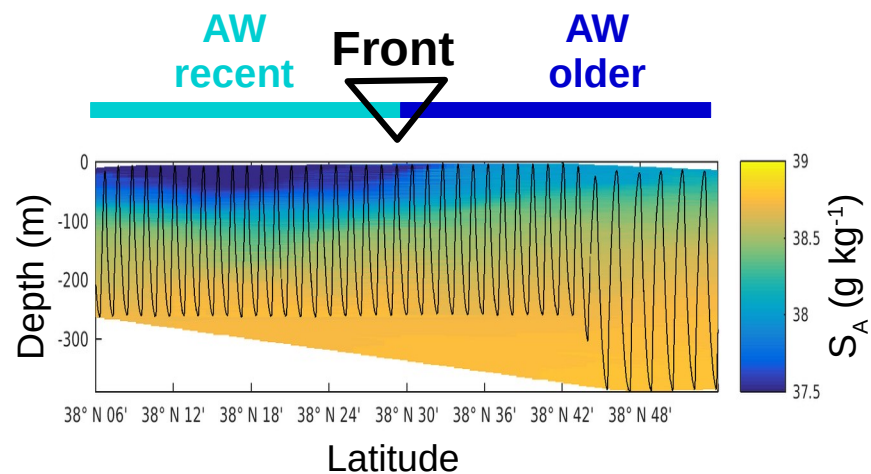
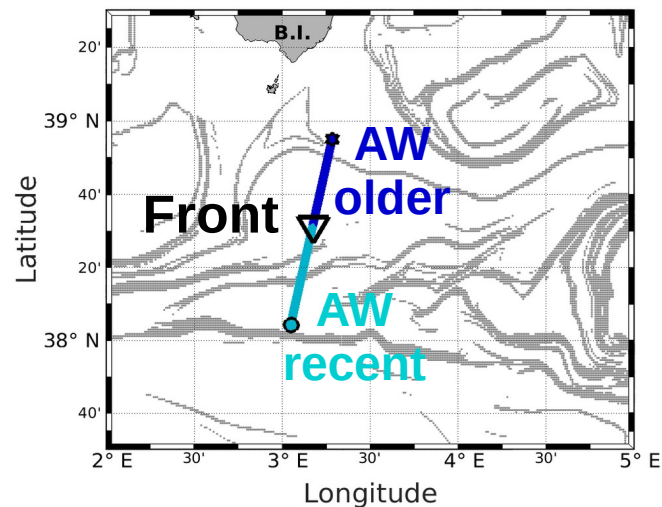
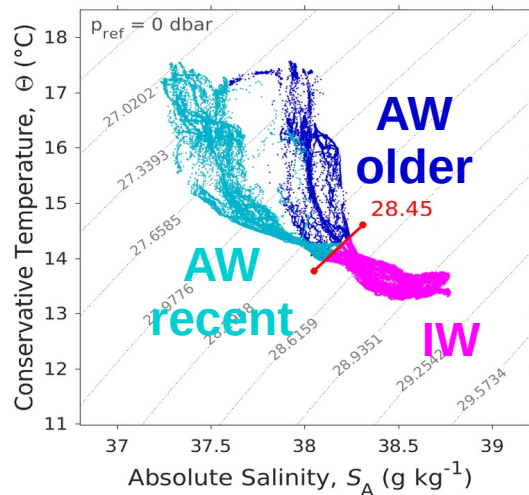
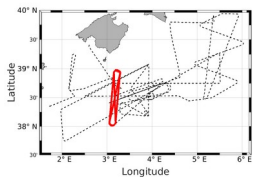


→ Intensité $\sim 7 \text{ m day}^{-1}$

→ Même ordre de grandeur que
w obtenues durant PRE-SWOT

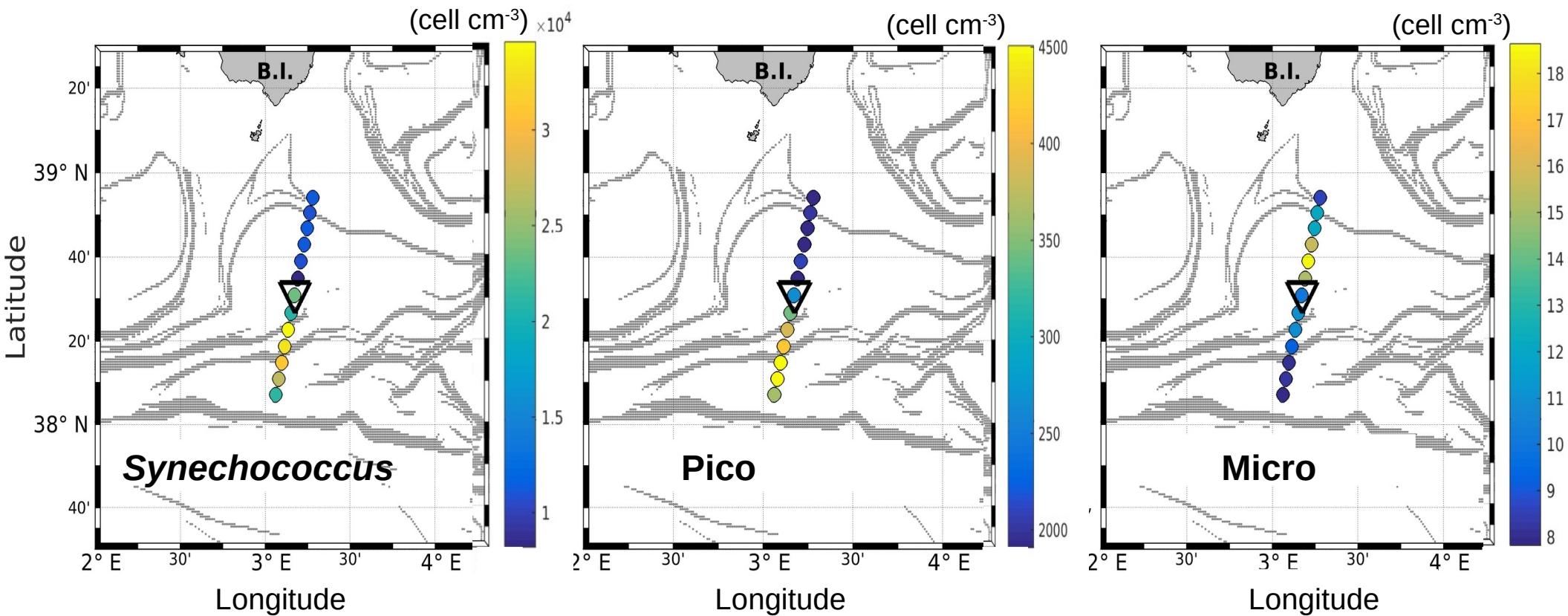


Hydrologie

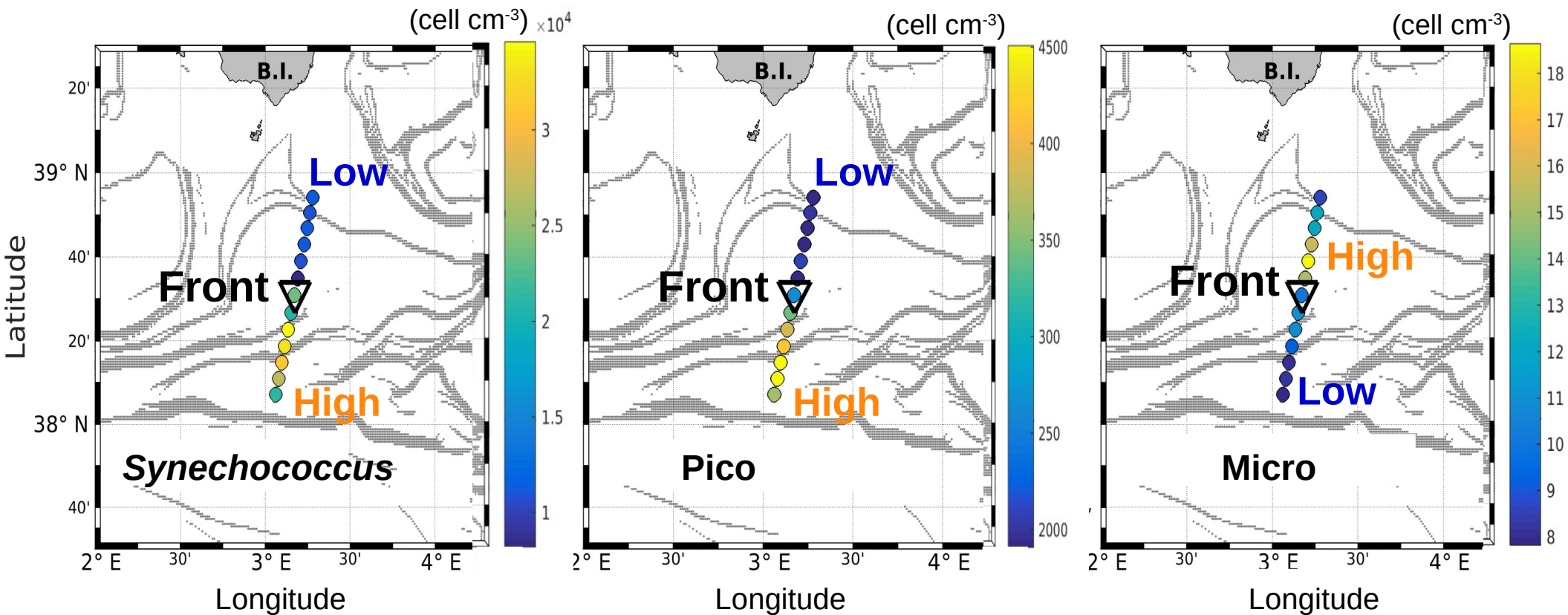


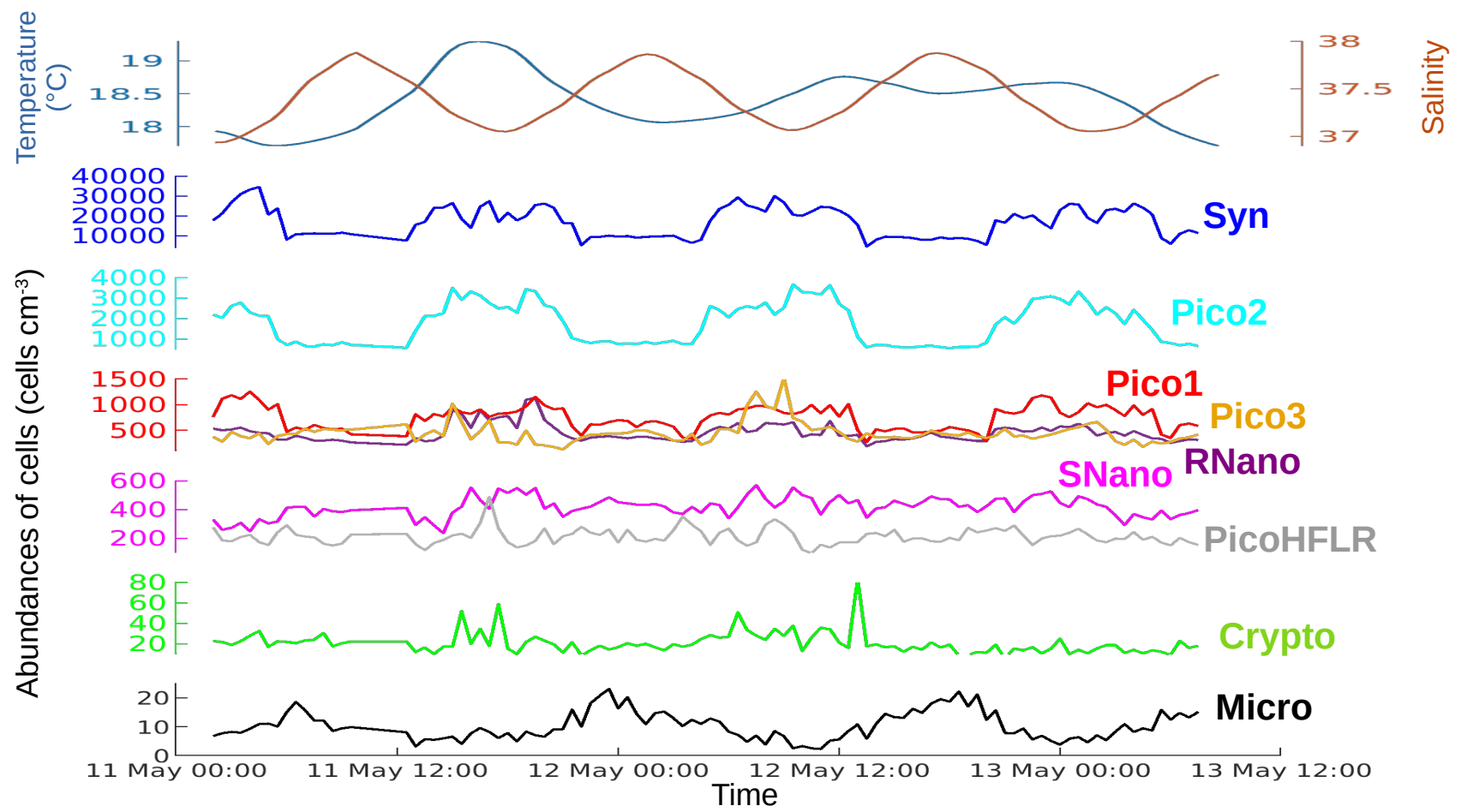
→ Séparation des 2 types d'eau *AW recent* et *AW older* dans la zone de front

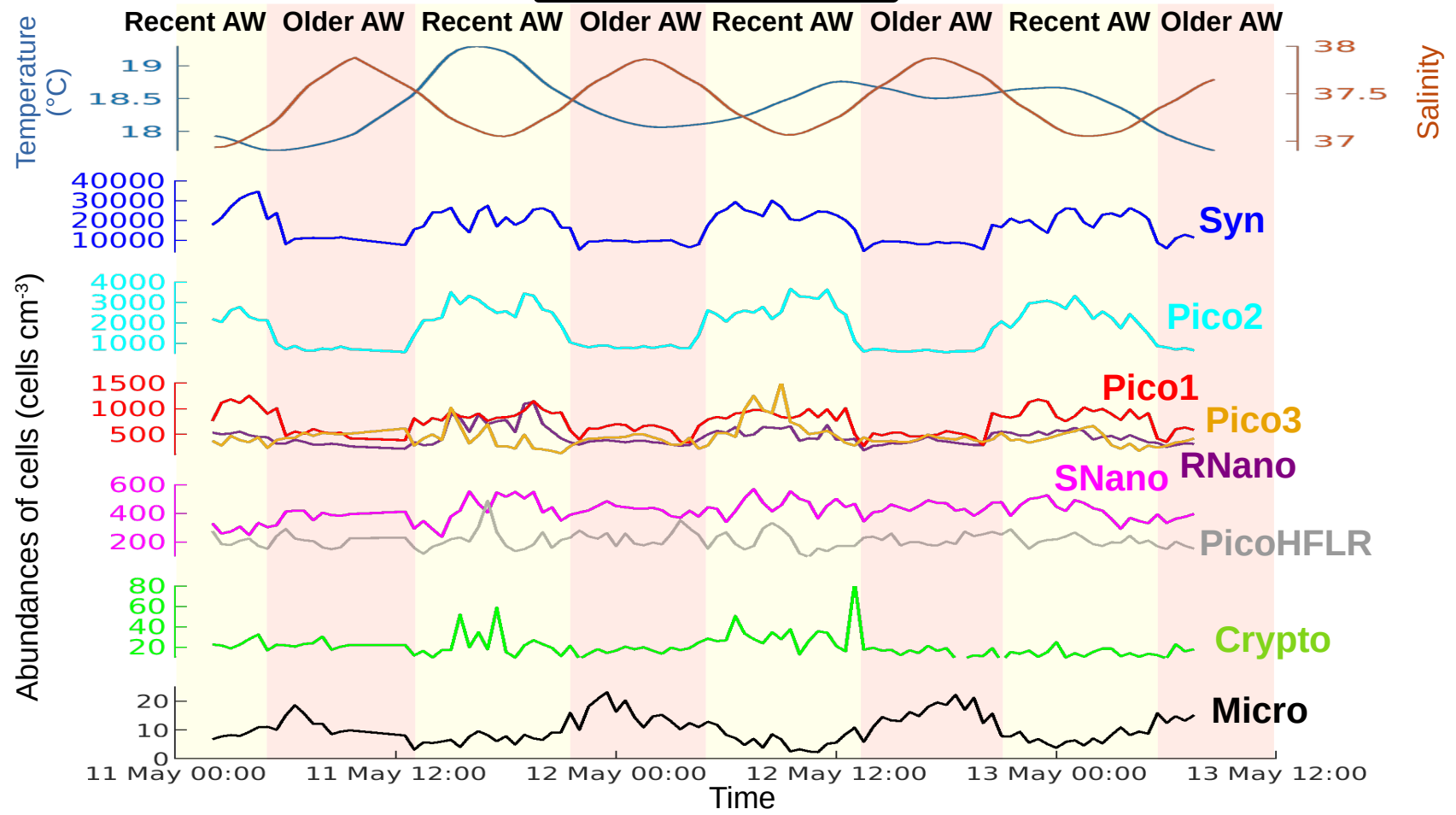
Distribution des abondances du phytoplancton



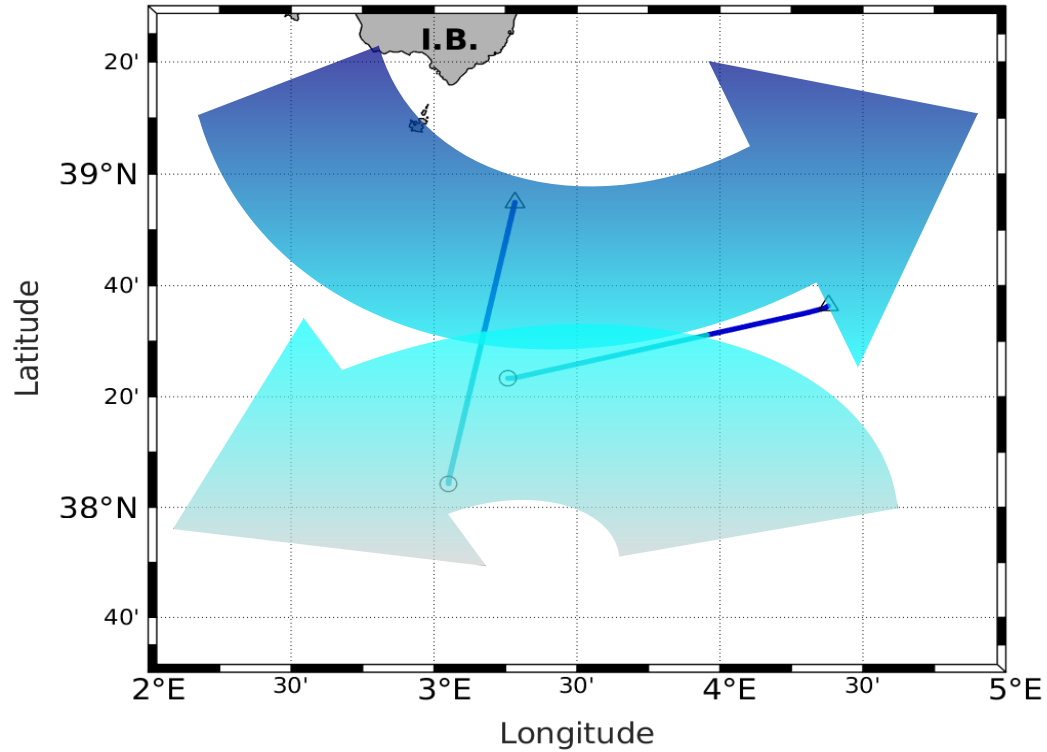
Distribution des abondances du phytoplancton



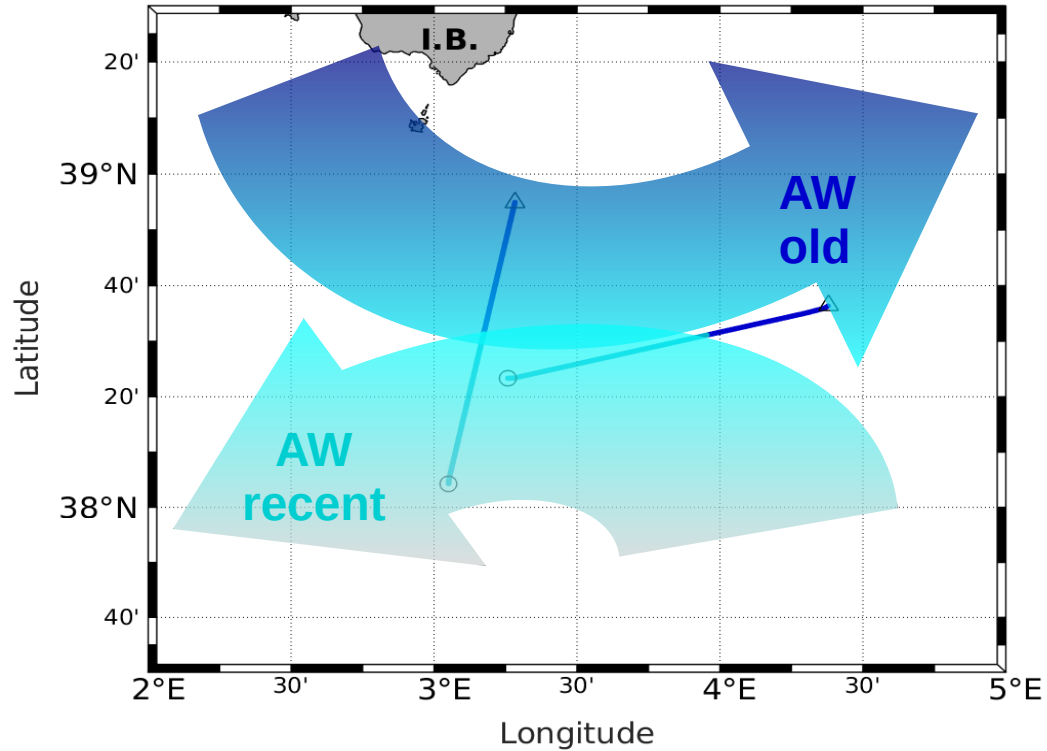




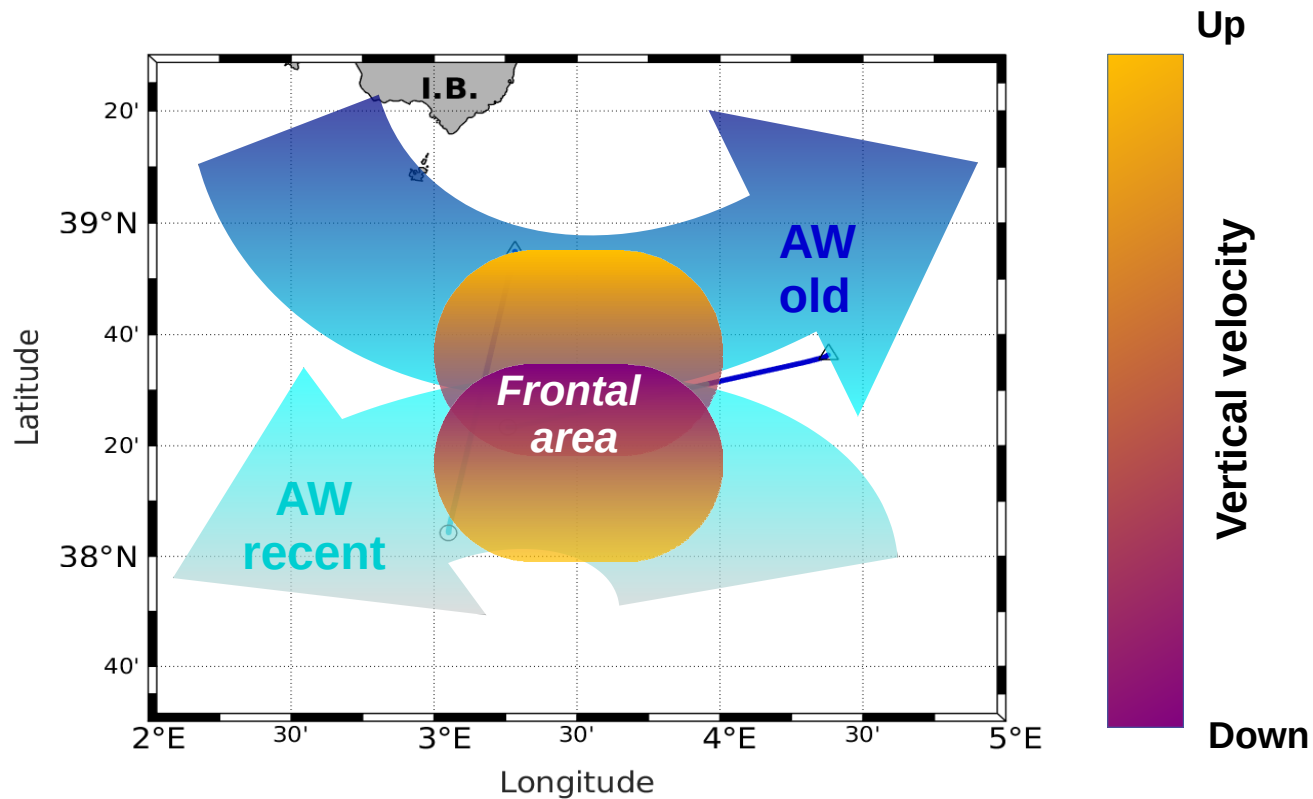
Couplage physique et biologique

Tzortzis *et al.*, 2021

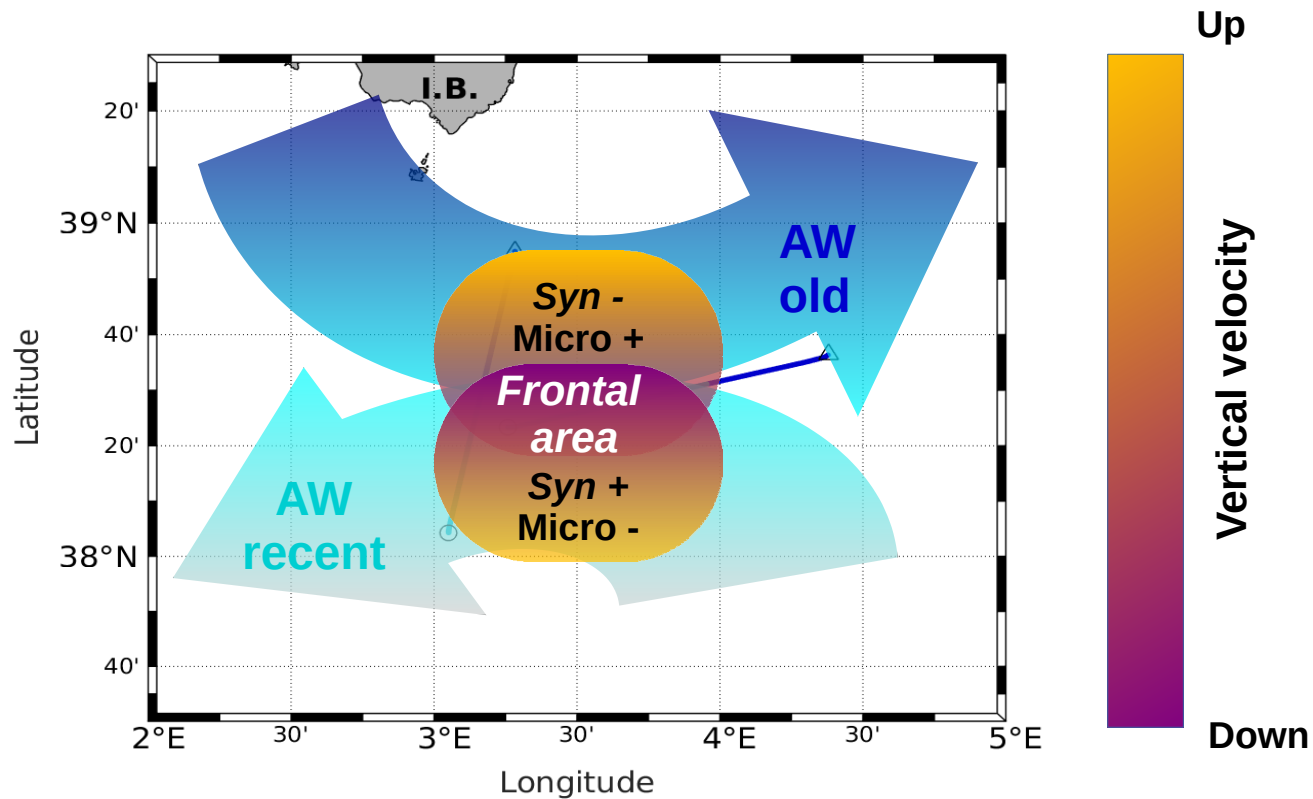
Couplage physique et biologique

Tzortzis *et al.*, 2021

Couplage physique et biologique



Couplage physique et biologique



Conclusion

- Les fronts d'énergie faible à modérée peuvent-ils générer des forçages physiques similaires à ceux observés dans les fronts plus intenses ?
 - Vitesses verticales $\sim 7 \text{ m day}^{-1} < 30 \text{ m day}^{-1}$ front Kurushio (Clayton *et al.*, 2014)
 - Cisaillements courants
 - Séparation masse d'eau

Conclusion

- Les fronts d'énergie faible à modérée peuvent-ils générer des forçages physiques similaires à ceux observés dans les fronts plus intenses ?
 - Vitesses verticales $\sim 7 \text{ m day}^{-1} < 30 \text{ m day}^{-1}$ front Kurushio (Clayton et al., 2014)
 - Cisaillements courants
 - Séparation masse d'eau
- Ces forçages sont-ils suffisants pour jouer un rôle sur la dynamique et la distribution des communautés phytoplanctoniques ?
- Mise en évidence du **rôle 'barrière'** du front sur la distribution des abondances phytoplanctoniques

Conclusion

→ Les fronts d'énergie faible à modérée peuvent-ils générer des forçages physiques similaires à ceux observés dans les fronts plus intenses ?

- Vitesses verticales $\sim 7 \text{ m day}^{-1} < 30 \text{ m day}^{-1}$ front Kurushio (Clayton et al., 2014)
- Cisaillements courants
- Séparation masse d'eau

→ Ces forçages sont-ils suffisants pour jouer un rôle sur la dynamique et la distribution des communautés phytoplanctoniques ?

→ Mise en évidence du **rôle 'barrière'** du front sur la distribution des abondances phytoplanctoniques

Cependant à l'issue de cette étude une question demeure ...

→ La distribution des abondances phytoplanctoniques est-elle uniquement due à l'effet du front ou des mécanismes **biologiques** (notamment le **cycle cellulaire**) peuvent intervenir ?

Introduction

Matériel et
Méthodes

Couplage physique
et biologique

**Dynamique
du phytoplancton**

Conclusion &
Perspectives

Estimation de la dynamique des groupes phytoplanctoniques

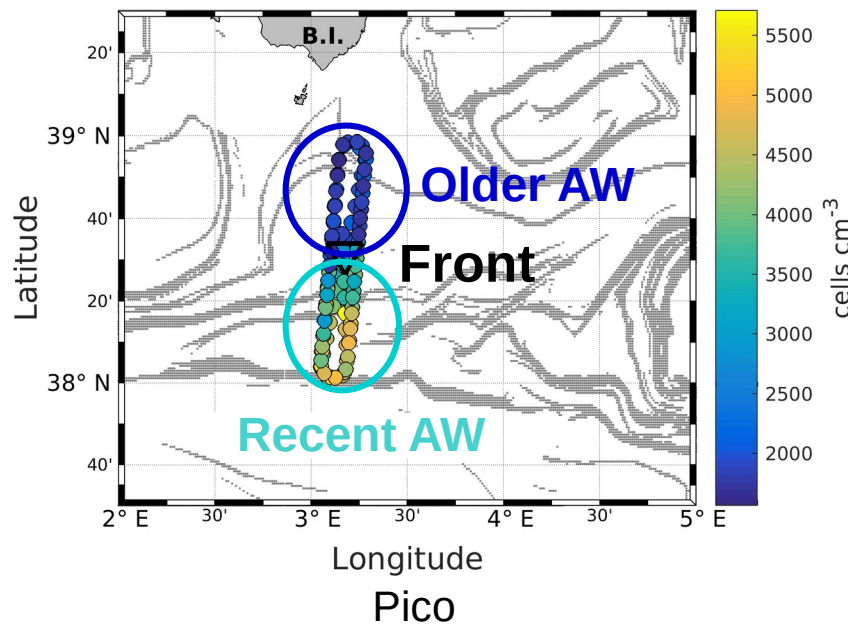
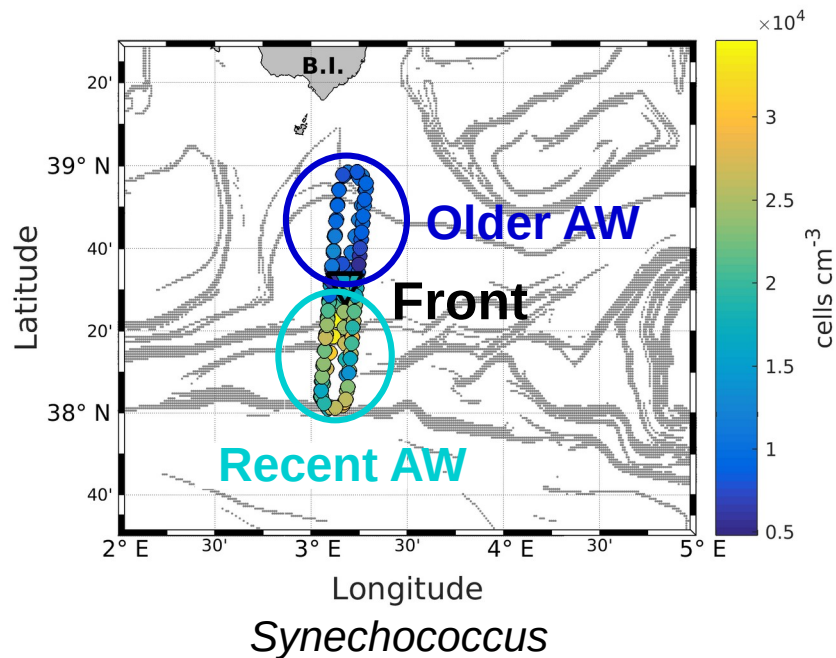
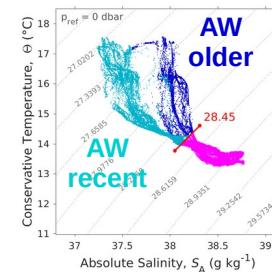
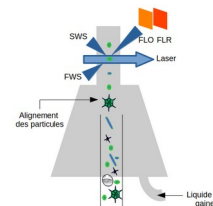
- Application du *size-structured population model* de Sosik *et al.*, 2003 aux différents **groupes phytoplanctoniques identifiés par cytométrie en flux**, dans les **2 masses d'eau séparées par le front**
- Reconstruction du **cycle cellulaire** du phytoplancton au cours d'une journée de **24 h**

Hypothèses :

- On considère que les masses d'eau ne changent pas au cours du temps
- On suit la même population de cellule au cours du temps : **approche probabiliste**
- On considère qu'au sein d'un groupe phytoplanctonique (ex : Pico, Nano) les différents taxons vont avoir une dynamique similaire

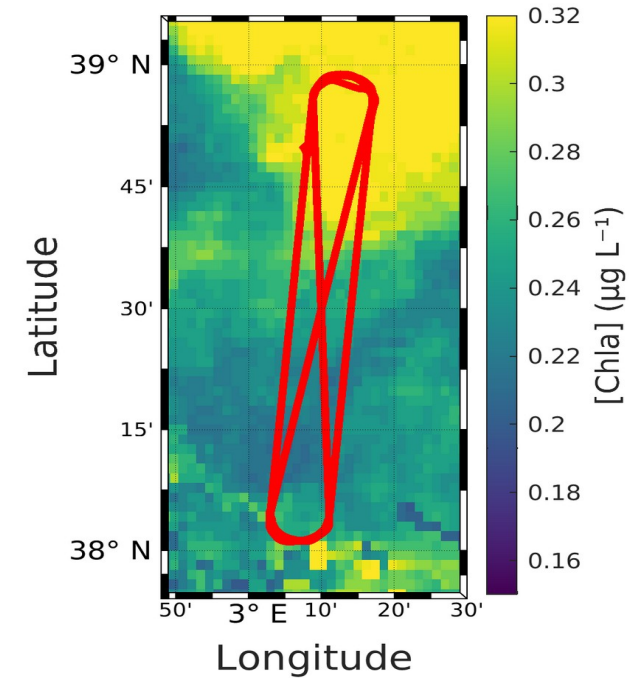
Sélection des données

→ AW séparées par le front à $\sim 38^{\circ} 30' N$.

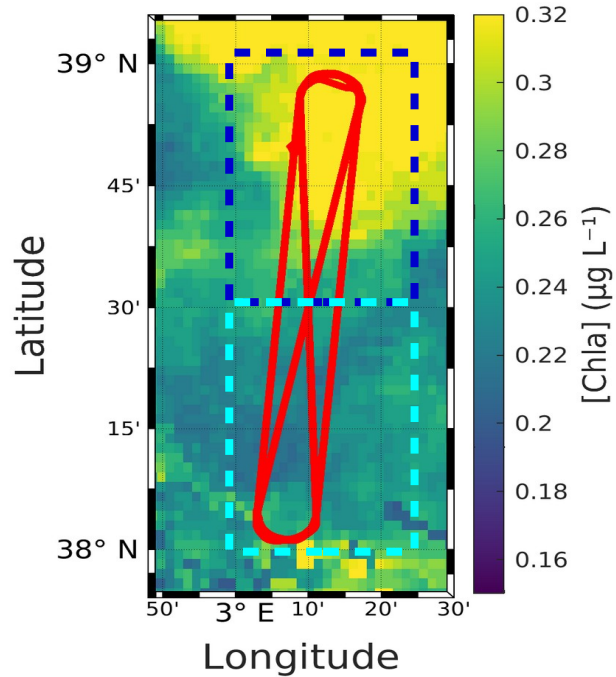


Hippo NS :
11 Mai 2018
13 Mai 2018

Reconstruction du cycle cellulaire au cours d'une journée de 24 heures



Reconstruction du cycle cellulaire au cours d'une journée de 24 heures

*Older AW**Recent AW*

Reconstruction du cycle cellulaire au cours d'une journée de 24 heures

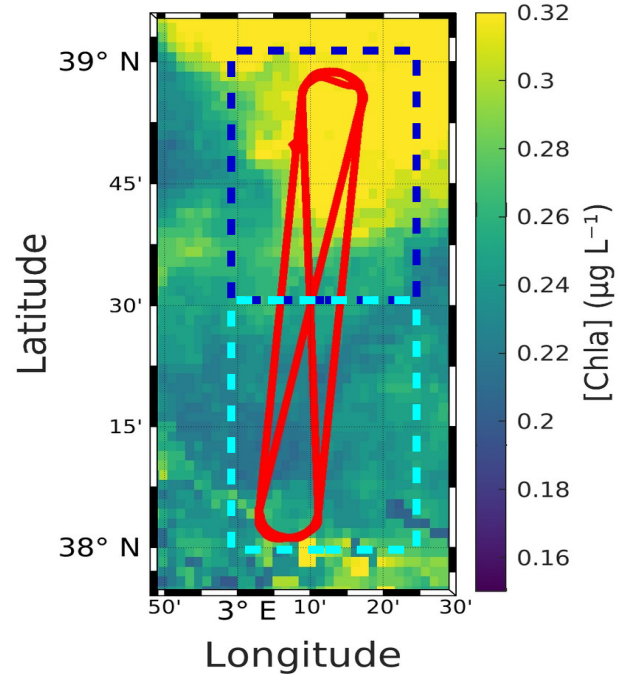
*Recent AW**Older AW*

I

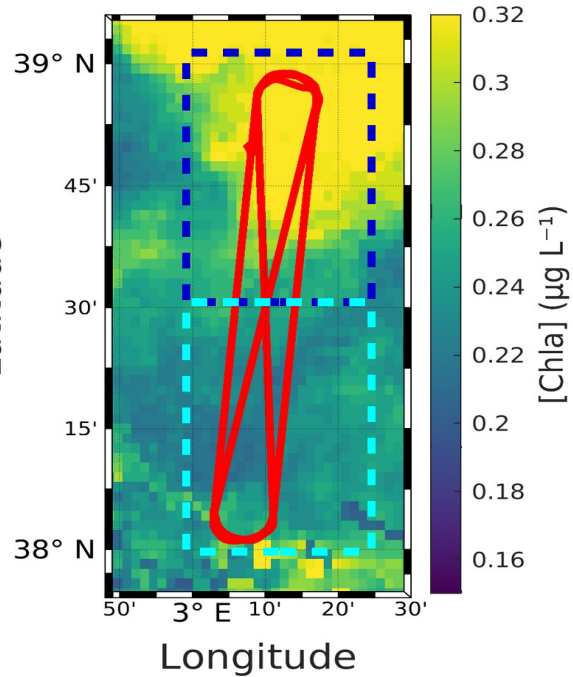
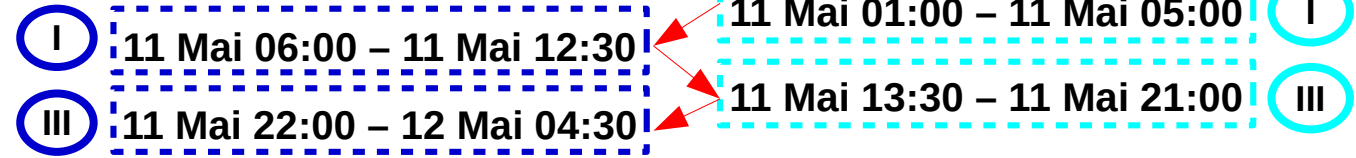
11 Mai 06:00 – 11 Mai 12:30

11 Mai 01:00 – 11 Mai 05:00

I



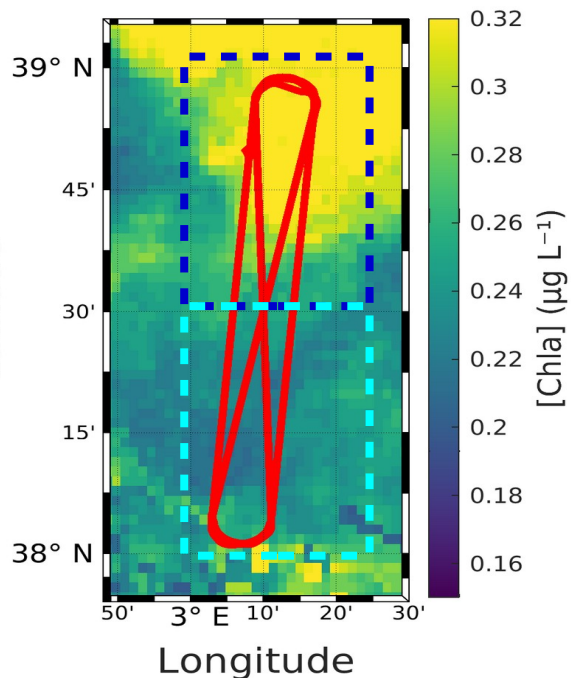
Reconstruction du cycle cellulaire au cours d'une journée de 24 heures

*Recent AW**Older AW*

Reconstruction du cycle cellulaire au cours d'une journée de 24 heures

Recent AW

Older AW



I

11 Mai 06:00 – 11 Mai 12:30

III

11 Mai 22:00 – 12 Mai 04:30

II

12 Mai 13:30 – 12 Mai 20:00

11 Mai 01:00 – 11 Mai 05:00

I

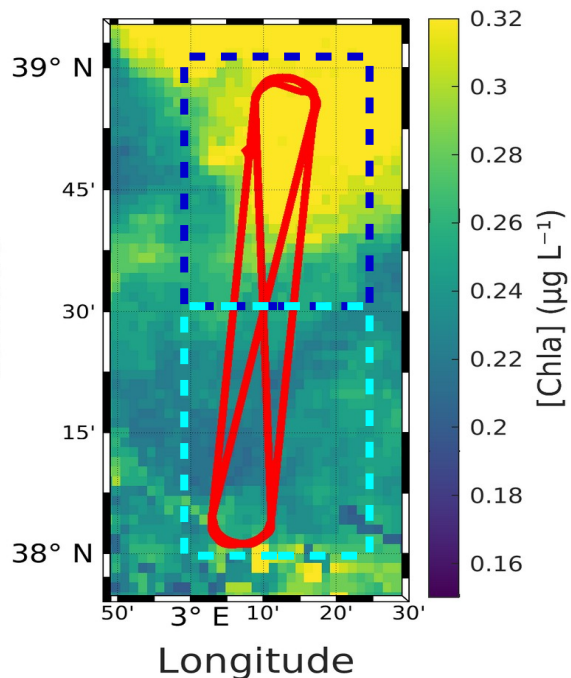
11 Mai 13:30 – 11 Mai 21:00

III

12 Mai 05:30 – 12 Mai 12:30

II

Reconstruction du cycle cellulaire au cours d'une journée de 24 heures

*Recent AW**Older AW*

I

11 Mai 06:00 – 11 Mai 12:30

III

11 Mai 22:00 – 12 Mai 04:30

II

12 Mai 13:30 – 12 Mai 20:00

IV

13 Mai 06:00 – 13 Mai 07:30

11 Mai 01:00 – 11 Mai 05:00

I

11 Mai 13:30 – 11 Mai 21:00

III

12 Mai 05:30 – 12 Mai 12:30

II

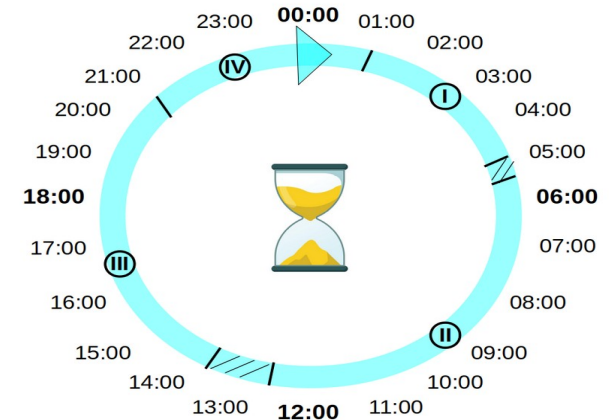
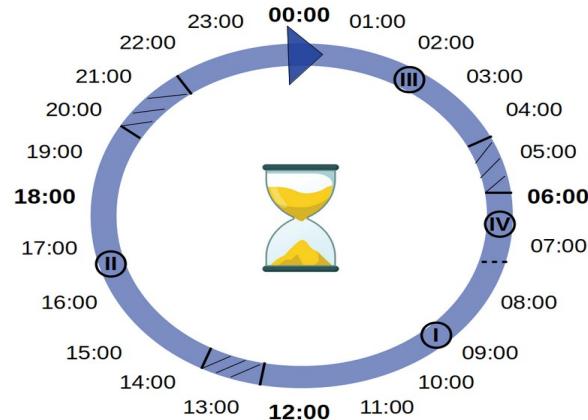
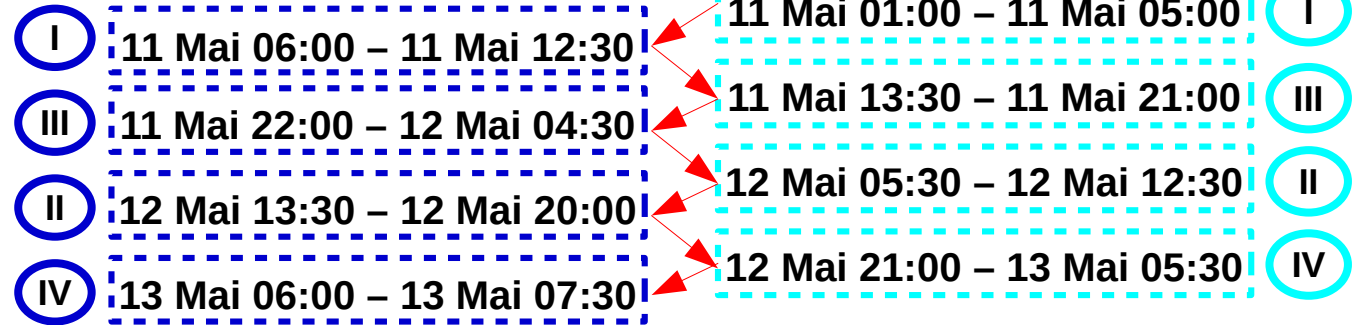
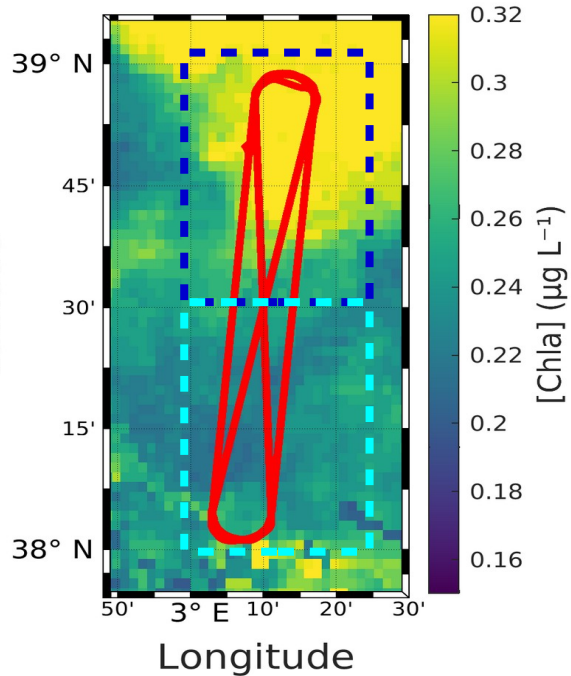
12 Mai 21:00 – 13 Mai 05:30

IV

Reconstruction du cycle cellulaire au cours d'une journée de 24 heures

Recent AW

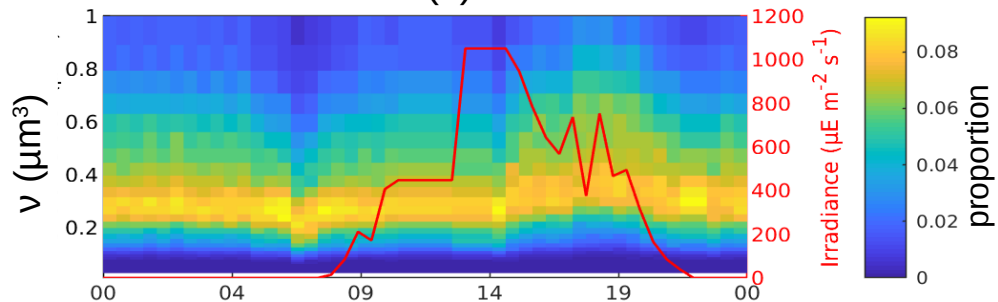
Older AW



Biovolume : *Synechococcus*

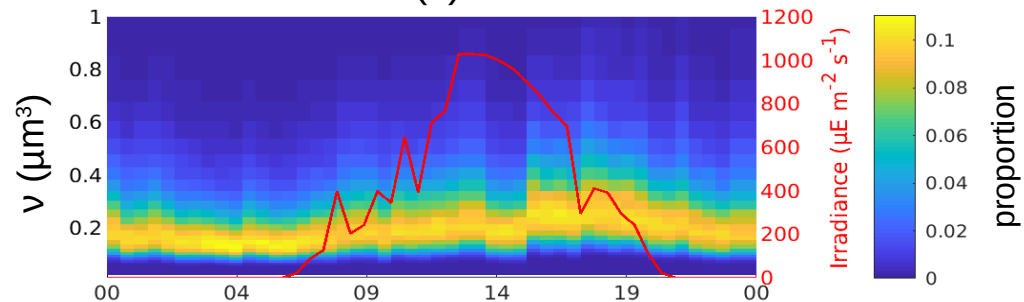
Older AW

Biovolume (v) observé

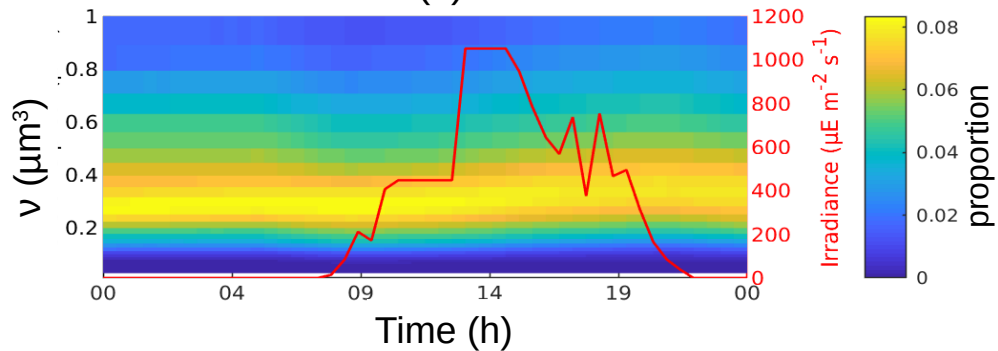


Recent AW

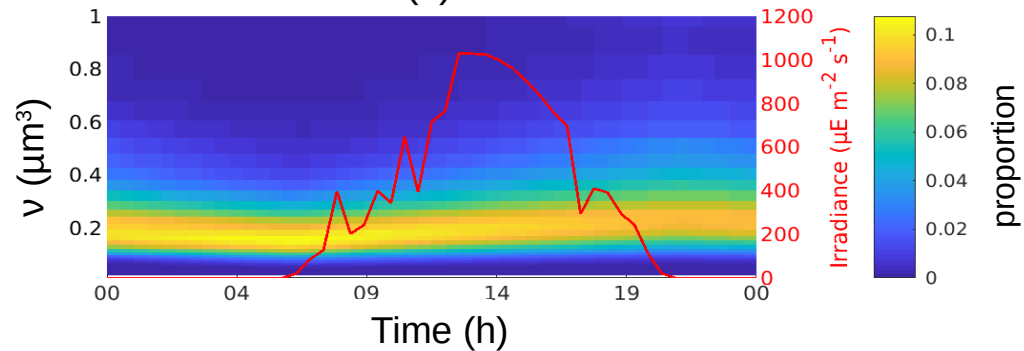
Biovolume (v) observé



Biovolume (v) modélisé



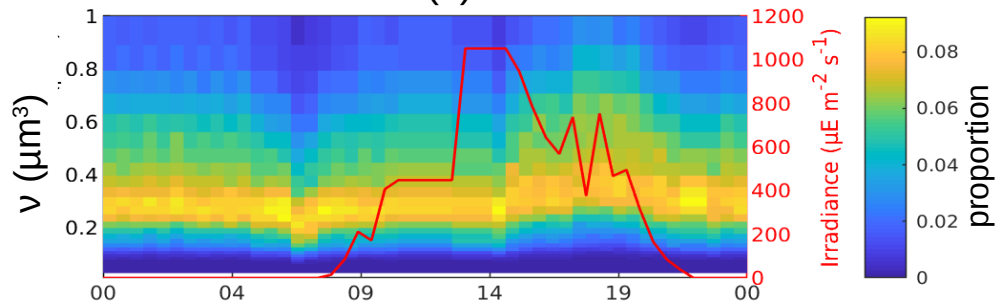
Biovolume (v) modélisé



Biovolume : *Synechococcus*

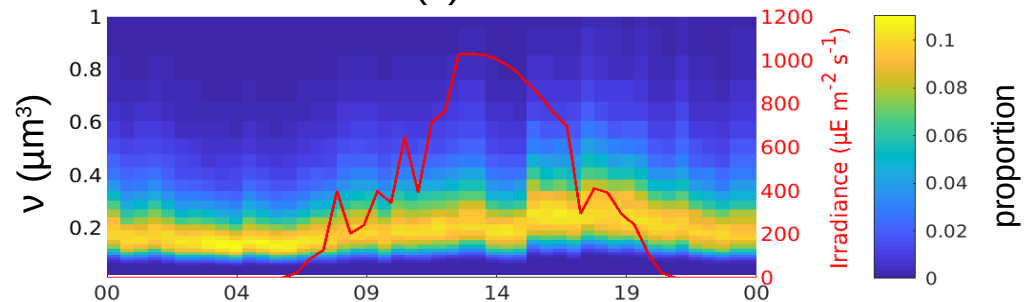
Older AW

Biovolume (v) observé

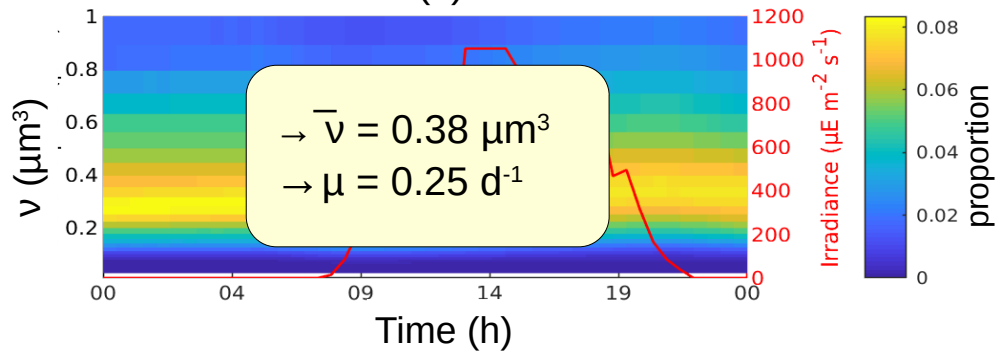


Recent AW

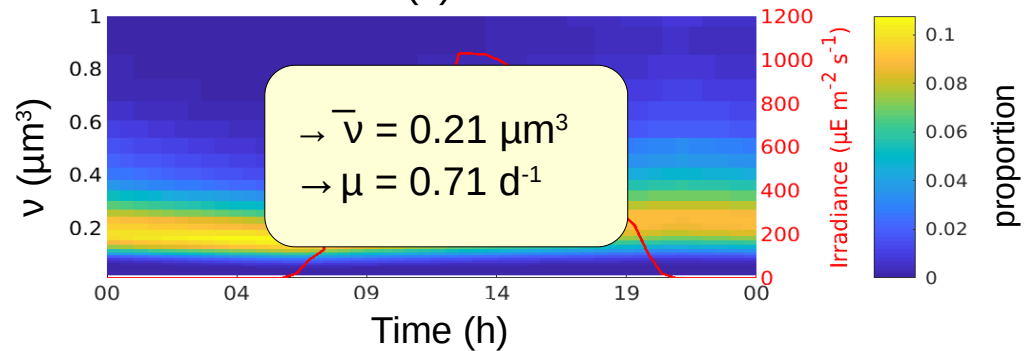
Biovolume (v) observé



Biovolume (v) modélisé



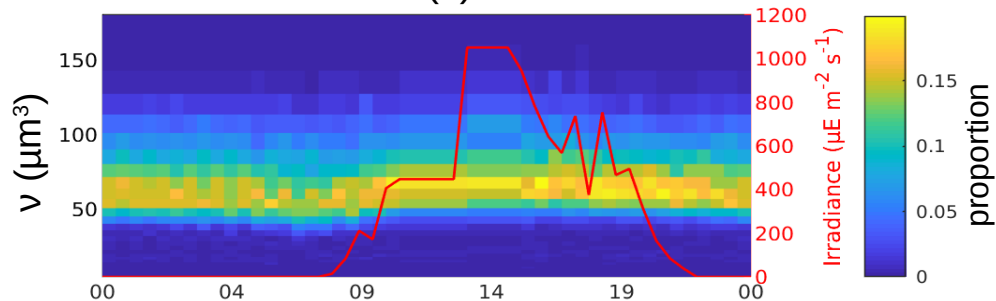
Biovolume (v) modélisé



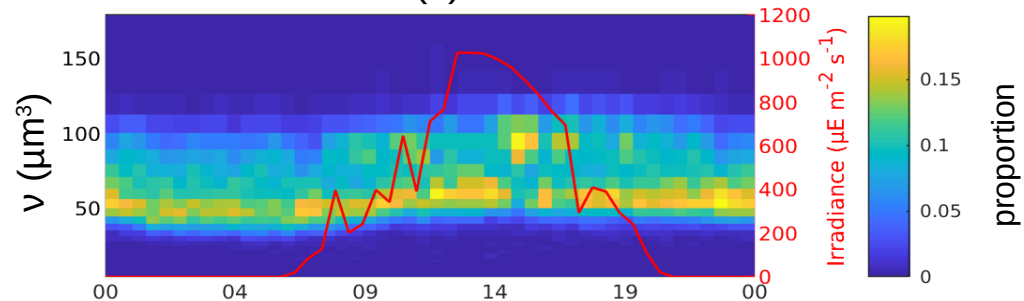
Biovolume : RNano

Older AW

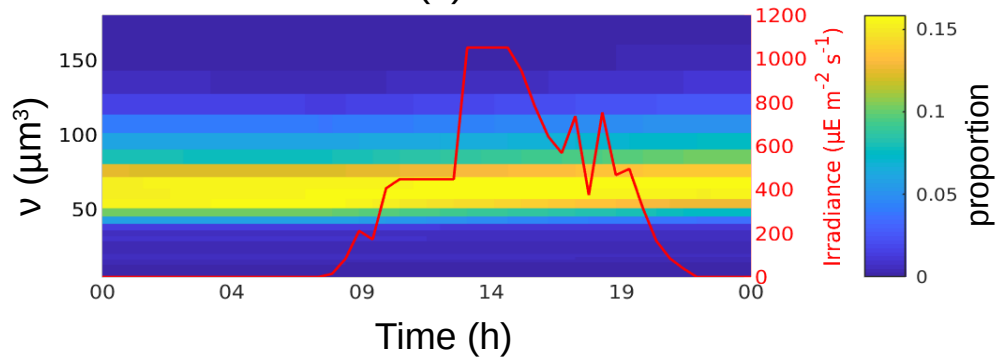
Biovolume (v) observé

**Recent AW**

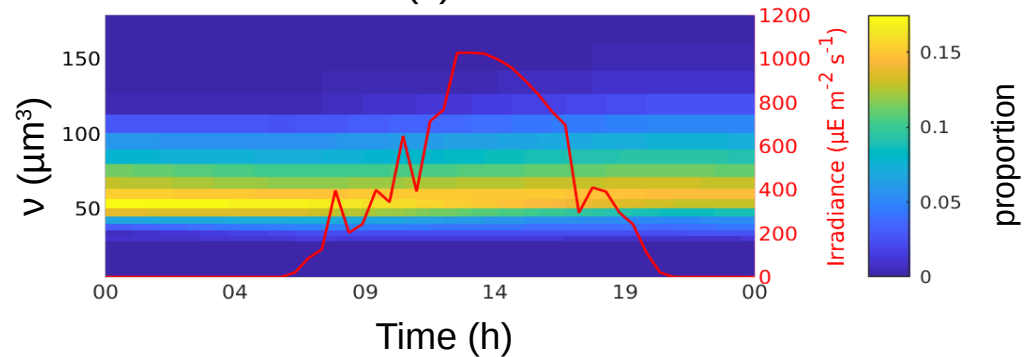
Biovolume (v) observé



Biovolume (v) modélisé



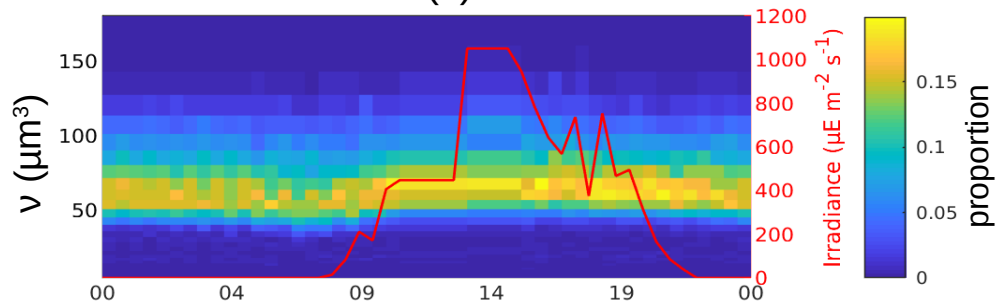
Biovolume (v) modélisé



Biovolume : RNano

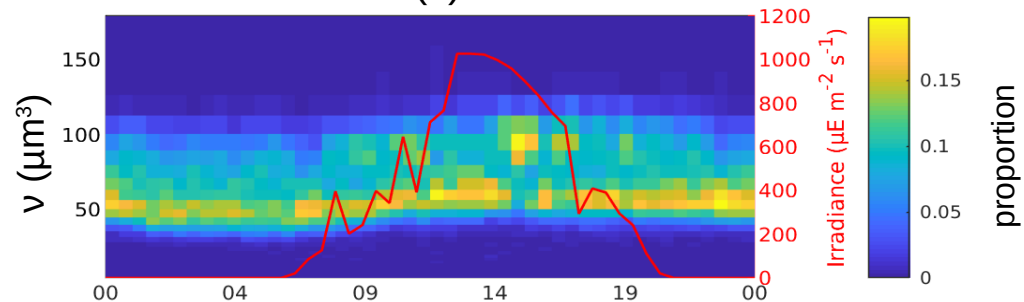
Older AW

Biovolume (v) observé

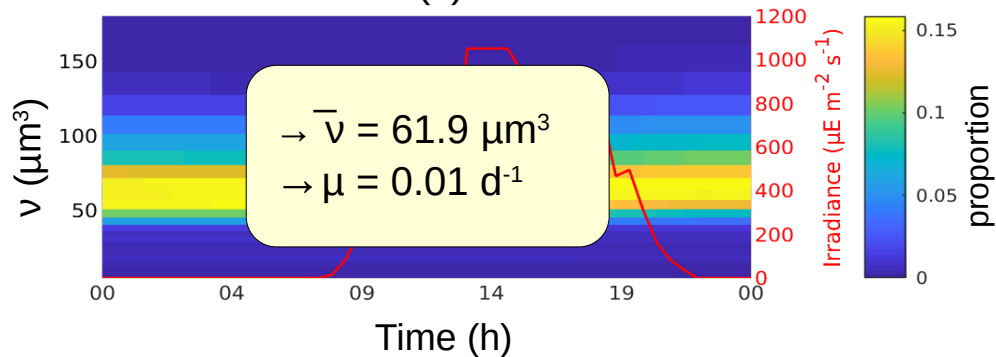


Recent AW

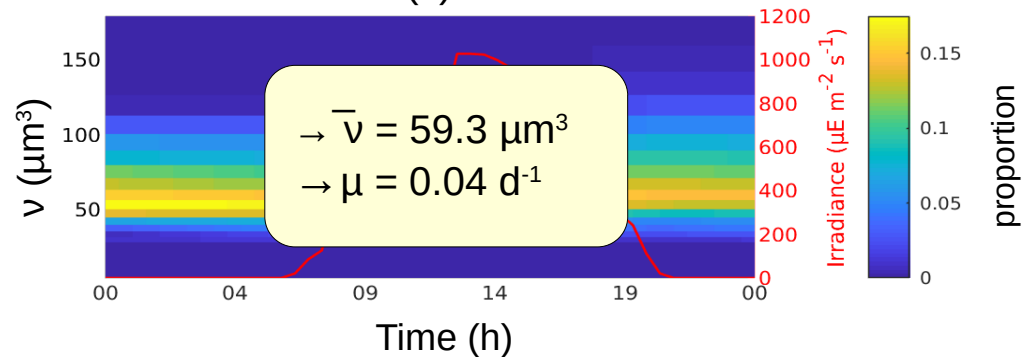
Biovolume (v) observé



Biovolume (v) modélisé

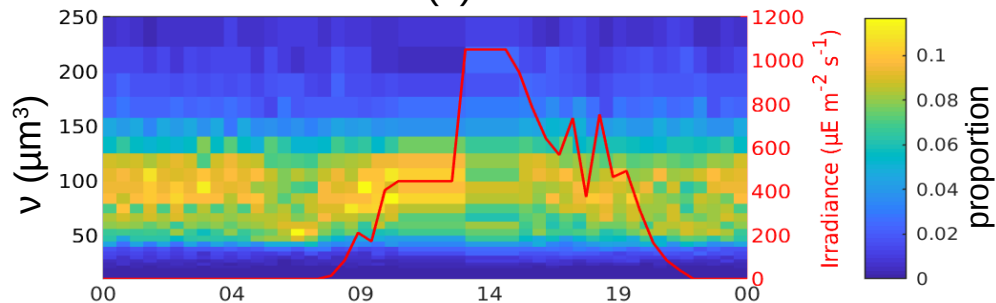


Biovolume (v) modélisé

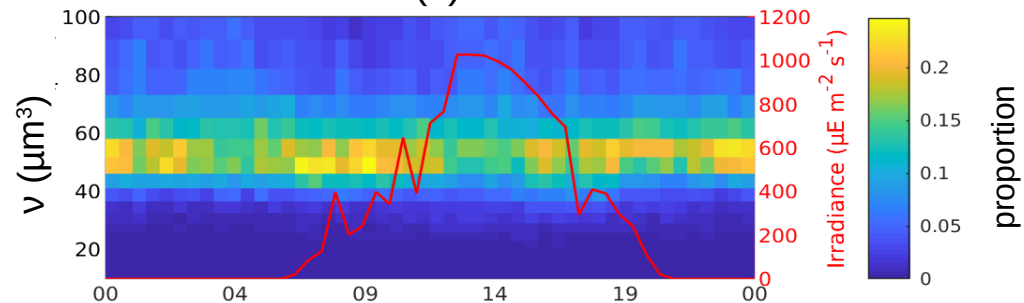
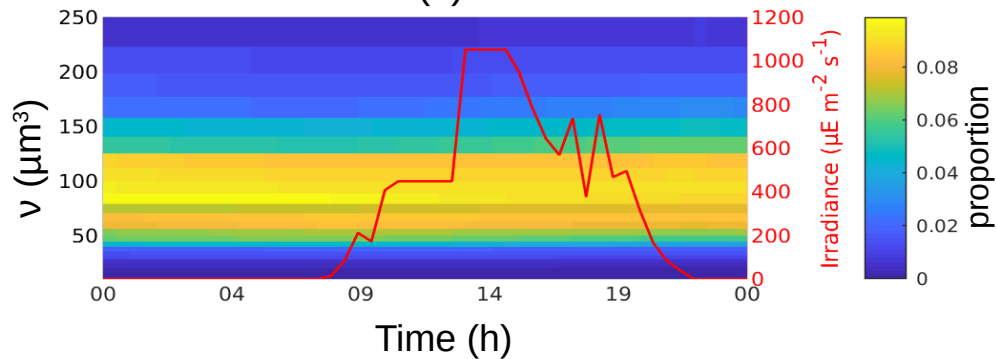
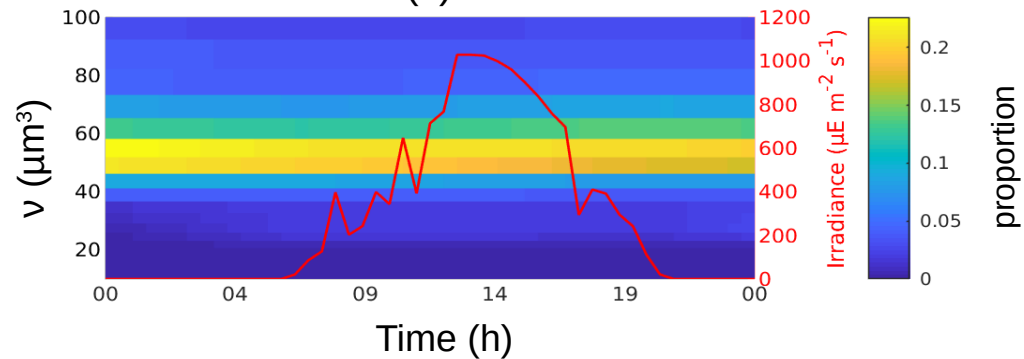


Biovolume : SNano

Older AW

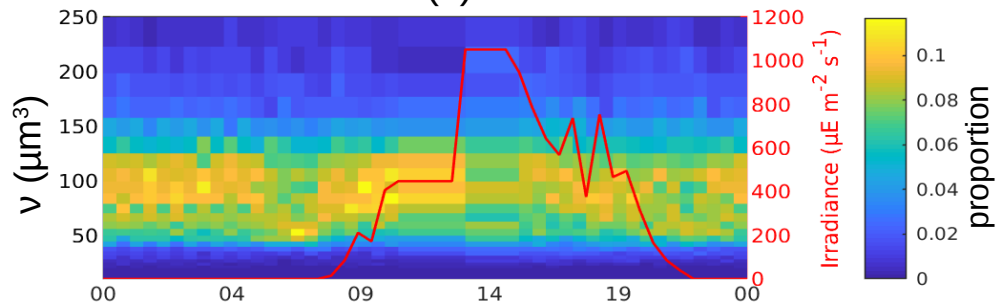
Biovolume (v) observé

Recent AW

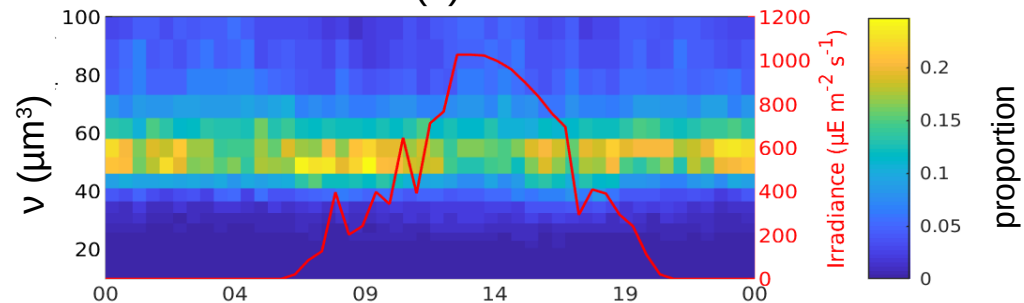
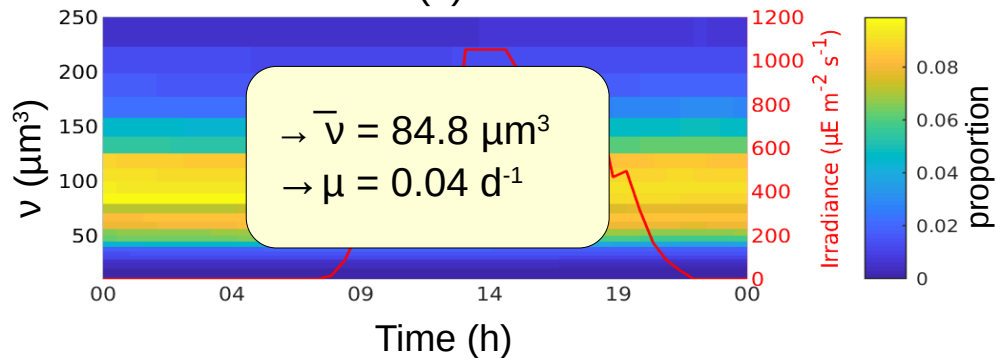
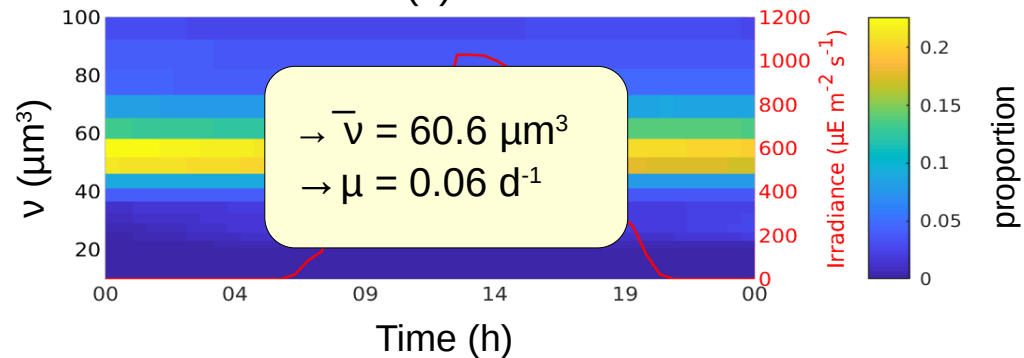
Biovolume (v) observéBiovolume (v) modéliséBiovolume (v) modélisé

Biovolume : SNano

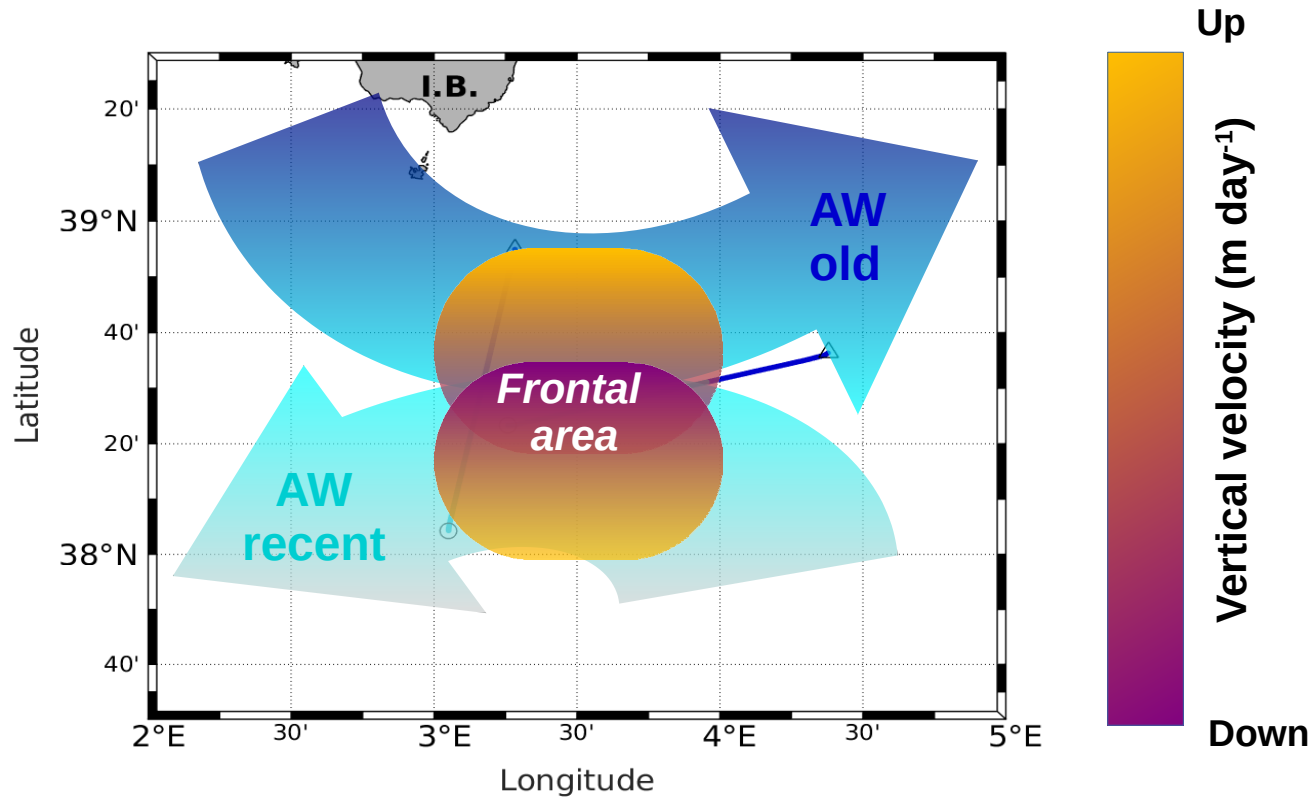
Older AW

Biovolume (v) observé

Recent AW

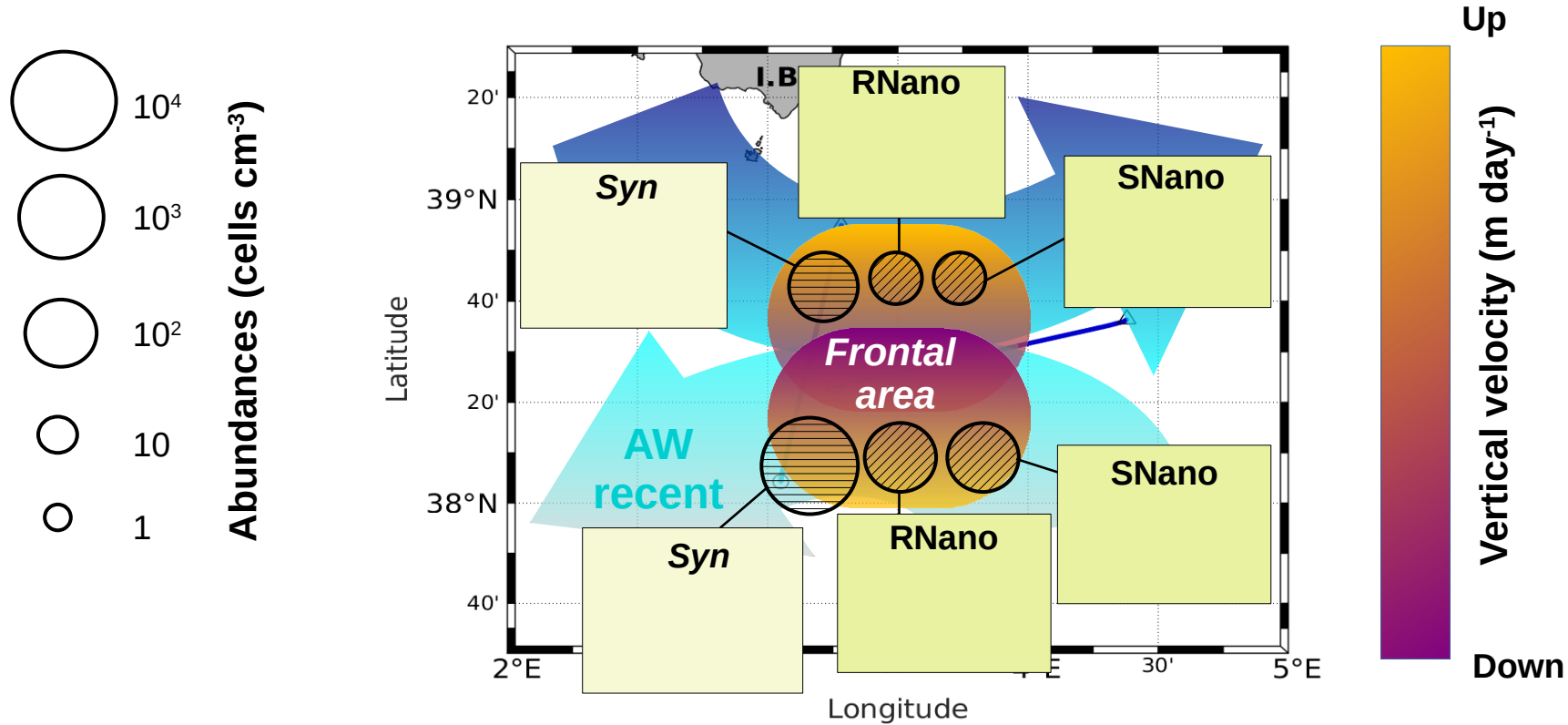
Biovolume (v) observéBiovolume (v) modéliséBiovolume (v) modélisé

Dynamique du phytoplancton dans la zone de front



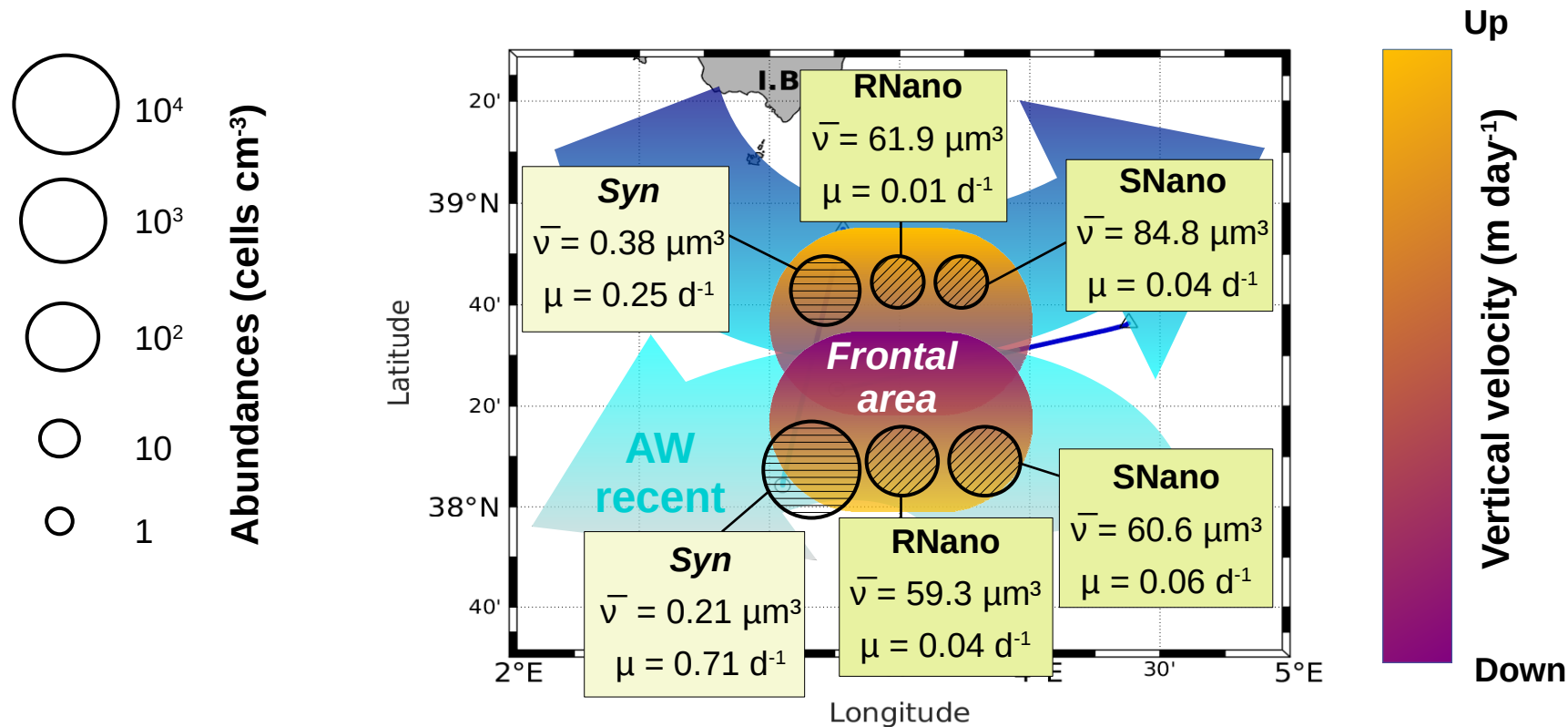
Tzortzis et al., [submitted]

Dynamique du phytoplancton dans la zone de front



Tzortzis et al., [submitted]

Dynamique du phytoplancton dans la zone de front



Tzortzis et al., [submitted]

Conclusion

→ La distribution des abondances phytoplanctoniques est-elle uniquement due à l'effet du front ou des mécanismes **biologiques** (notamment le **cycle cellulaire**) peuvent intervenir ?

- Dynamique cellulaire différente dans les 2 masses d'eau pour *Synechococcus* et les 2 groupes de Nanophytoplancton
- Hypothèse : apports de nutriments par la *AW older* enrichie par des apports fluviaux (Schroeder *et al.*, 2010)

Application du modèle aux autres groupes phytoplanctoniques :

- Modèle non applicable au Microphytoplancton et *Cryptophytes* en raison d'un nombre insuffisant de cellules
- Distribution trop bruitée pour le Picophytoplancton ⇒ plus grande diversité d'espèces (Siokou-Frangou *et al.*, 2010) et donc dynamique différente

Introduction

Matériel et
Méthodes

Couplage physique
et biologique

Dynamique
du phytoplancton

Conclusion &
Perspectives

Apports scientifiques et méthodologiques de cette thèse

- Caractérisation de façon **in situ** d'un **front d'énergie modérée**
- Mise en évidence de l'impact du front sur la **dynamique** et la **distribution** des **communautés phytoplanctoniques**

Apports méthodologiques innovants :

- Développement d'une **stratégie d'échantillonnage adaptative et Lagrangienne**
- Utilisation de la méthode de **calcul des vitesses verticales** par **équation oméga** dans le cadre d'une stratégie Lagrangienne
- Utilisation du **modèle de croissance du phytoplancton** pour des groupes autres que *Synechococcus* et *Prochlorococcus*, dans le cadre d'un échantillonnage Lagrangien

→ De nombreuses perspectives de recherche ...

Mesures directes des vitesses verticales

Campagne FUMSECK 2019 (PI : S. Barrillon)

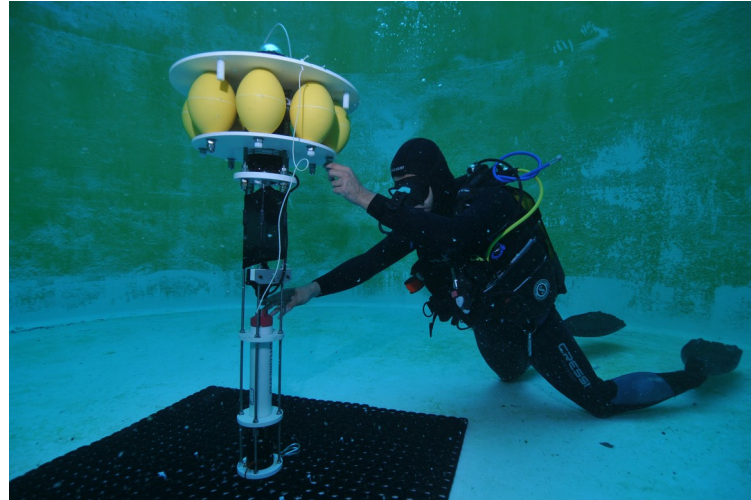
- Méthodes de **mesure directe** des vitesses verticales à l'aide de données in situ provenant de différents **ADCP** associés à des sondes CTD (Comby *et al.*, 2022)

Développement du Vertical Velocity Profiler (VVP)

(J.-L. Fuda, S. Barrillon)

- Test en mer (dans la rade de Marseille)
- Test en bassin à la COMEX

Crédit : Hubert Bataille

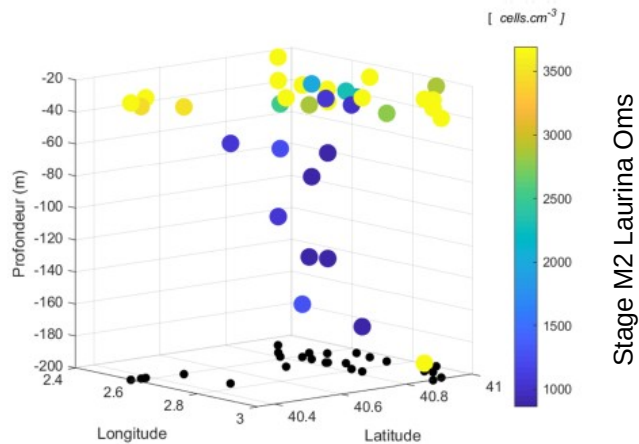


Mesures par cytométrie en profondeur

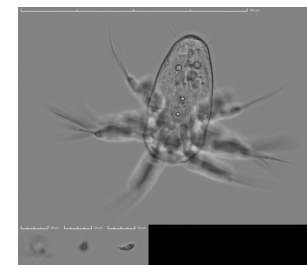
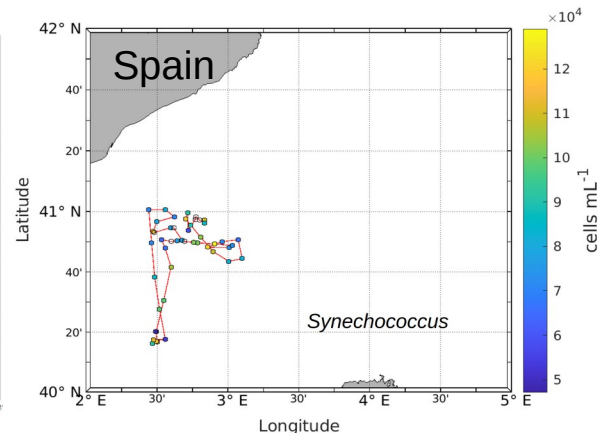
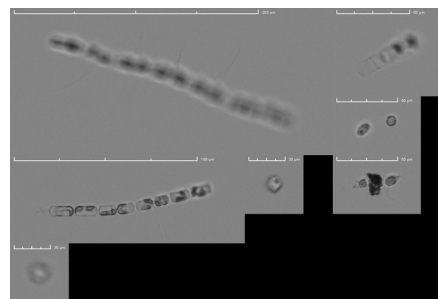
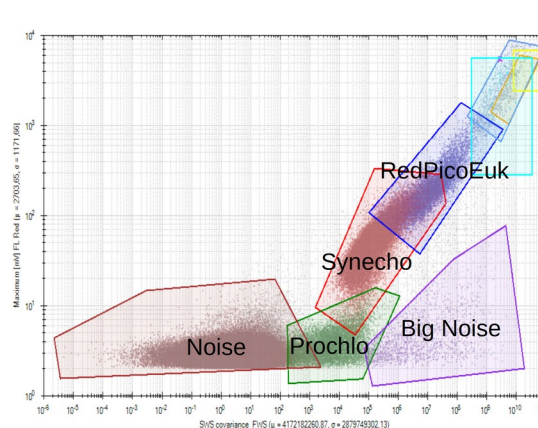
→ Campagne CALYPSO 2022



(PI : A. Mahadevan, E d'Asaro)

→ Influence de la circulation à fine échelle sur la **distribution 3D** des organismes phytoplanctoniques

Abondances de Pico en profondeur



Analyse des données durant la campagne

SWOT

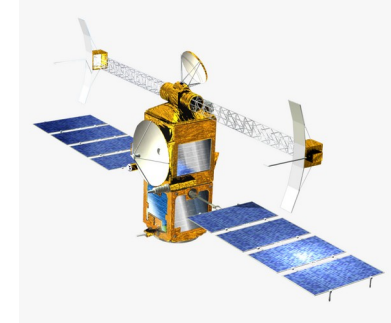
Le nouveau satellite altimétrique : SWOT

- Mesure de **hauteur de l'eau** à une résolution supérieure à celle des satellites actuels
- Lancement le 15/12/2022

"Adopt a SWOT crossover (AdAC)"

- **Crossovers** : Points de **croisement d'orbite** de SWOT
- "**Adopt a crossover initiative**": Encourage la communauté scientifique internationale à **organiser des campagnes en mer** dans les régions des **crossovers**, **avant** et **pendant** la mission de SWOT

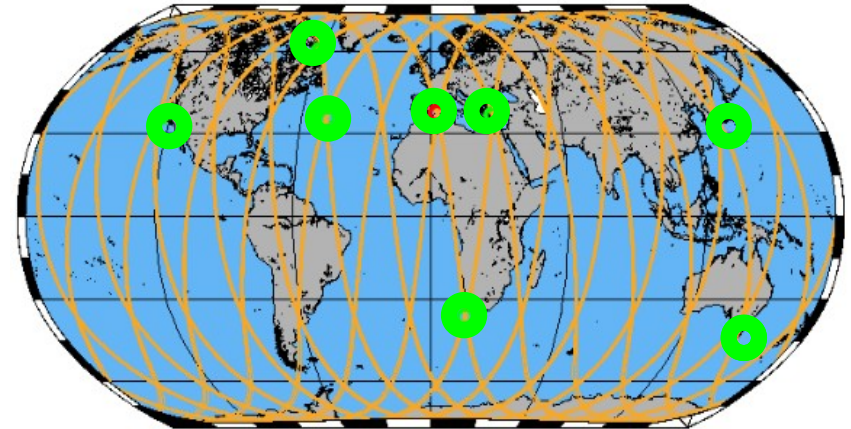
→ **Objectifs** : **Calibrer** et **valider** les données enregistrées par SWOT, grâce aux **données *in situ*** obtenues lors des campagnes en mer



<https://science.nasa.gov>

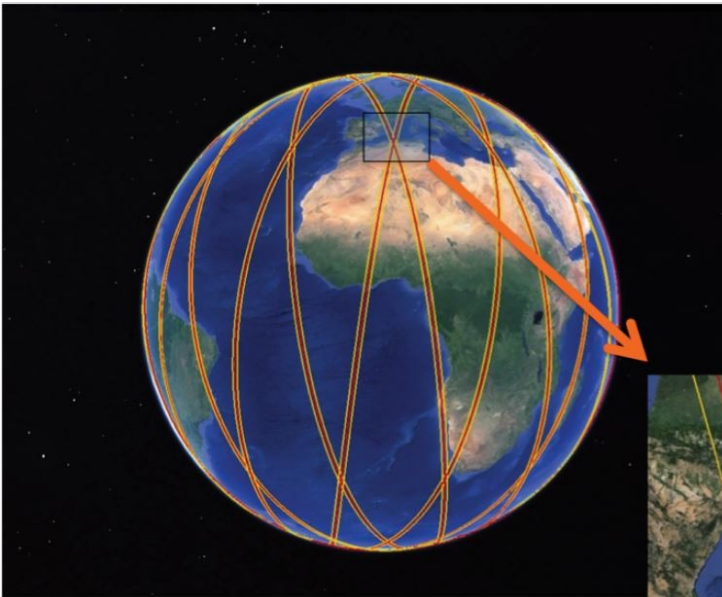


Surface Water Ocean Topography
(SWOT)



d'Ovidio et al., 2019

Les campagnes BIOSWOT-AdAC



Barceló-Llull et al., 2018

→ Différentes campagnes associées au *crossover* de SWOT en Méditerranée Occidentale :

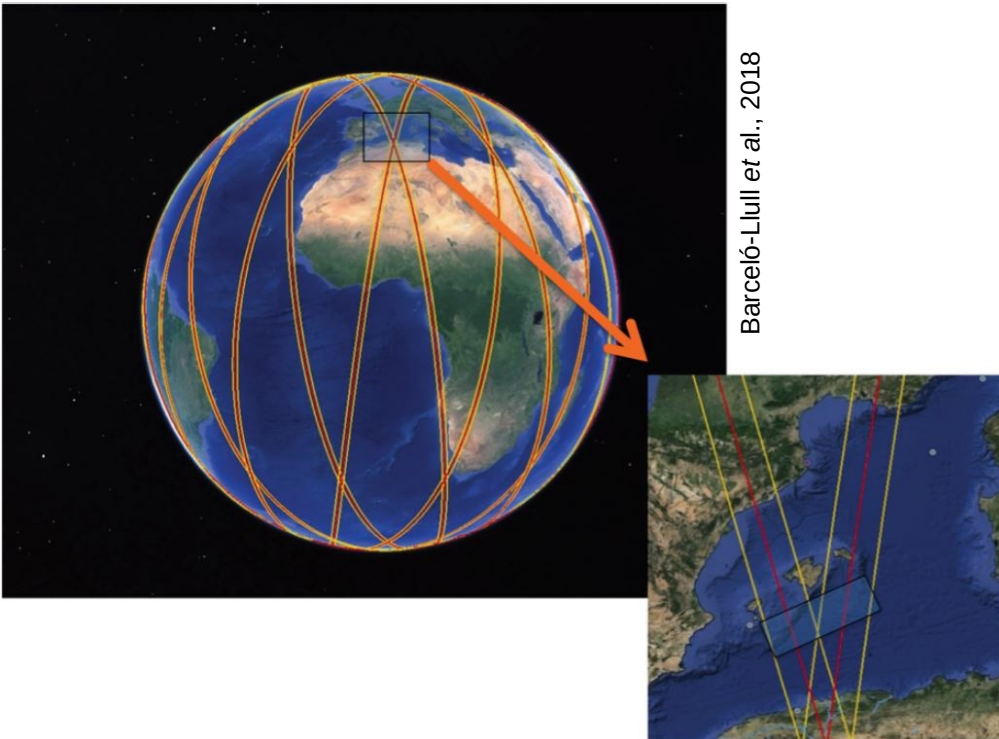
- PROTEVS-SWOT (PI : F. Dumas)
- C-SWOT (PI : P. Garreau)
- Fast SWOT (PI(s) : A. Pascual, B. Mourre)
- BIOSWOT-Med (PI(s) : A. Doglioli, G. Gregori)

Mesures prévues lors de BIOSWOT-Med 2023 :

- Stratégie adaptative et Lagrangienne
- Mesures **biogéochimiques** (notamment des **nutriments**)
- Mesures par cytométrie en flux (phytoplancton, virus, bactéries, protozoaires)
- Zooplancton
- Analyses **génomiques** (*métabarcoding*, métagénomique, métatranscriptomique)
- Mesures directes des **vitesseS verticales**

Crossover de SWOT localisé en Méditerranée Occidentale, au sud des îles Baléares

Les campagnes BIOSWOT-AdAC



Barceló-Llull et al., 2018

→ Ce travail de thèse conforte les bases scientifiques et méthodologiques de la campagne BIOSWOT-Med 2023

Ce travail de thèse ainsi que l'ensemble des campagnes associées au consortium AdAC devraient permettre d'obtenir 'une vue globale' de l'océan à fine échelle

Crossover de SWOT localisé en Méditerranée Occidentale, au sud des îles Baléares

Synthèse personnelle

→ Publications :

- Tzortzis *et al.*, 2021, *Biogeosciences*
- Comby *et al.*, 2022, *JAOT*
- Barrillon *et al.*, *Biogeosciences* [accepted]
- Tzortzis *et al.*, *Biogeosciences* [submitted]

→ Campagnes en mer :

- FUMSECK 2019 (PI : S. Barrillon)
- GIBRALTAR 2020 (PIs : F. Dumas, L. Bordoïs)
- CALYPSO 2022 (PIs : A. Mahadevan, E. d'Asaro)

→ Co-encadrements stages M2 :

- Pierre Agius (Université de Toulon)
- Nathan Kientz (Aix Marseille Université)
- Laurina Oms (Aix Marseille Université)

→ Conférences & vulgarisation scientifique :

- IOCAS (Chine), EGU (*Online*), ASLO (*Online*)
- Congrès des doctorants
- Fête de la Science

→ Collaborations :



中国科学院海洋研究所
INSTITUTE OF OCEANOLOGY, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES



WOODS HOLE
OCEANOGRAPHIC
INSTITUTION



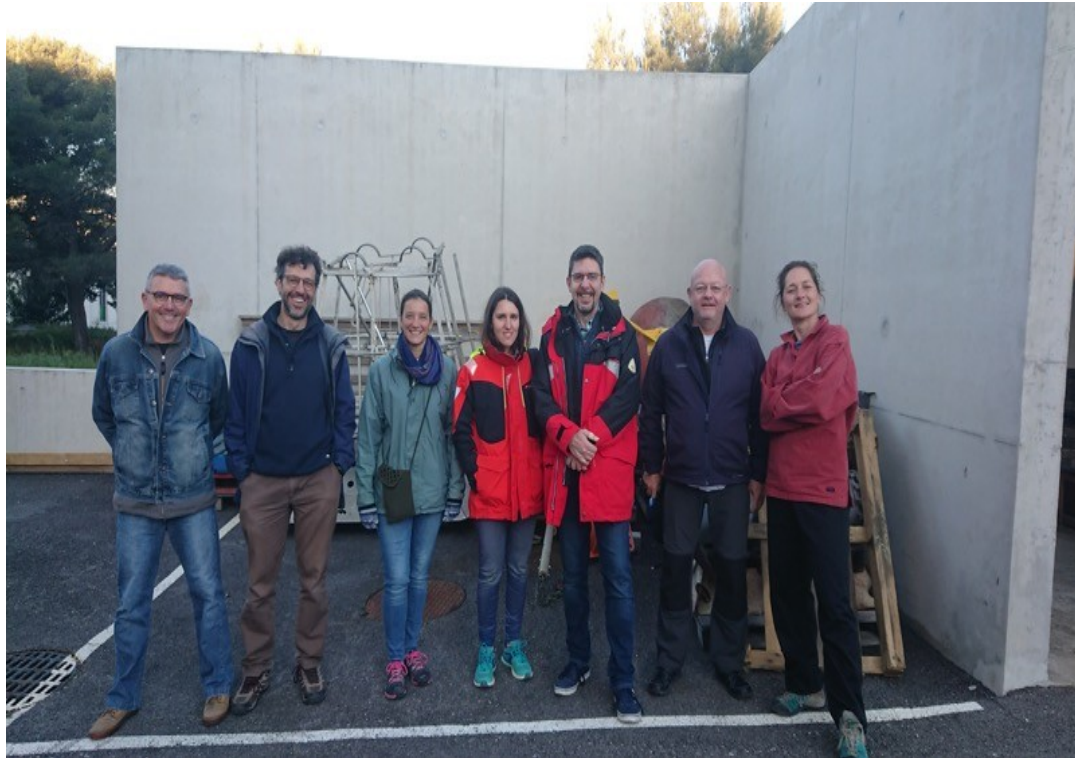
UIB
Universitat de les
Illes Balears



Fisheries and Oceans
Canada



Merci de votre attention !



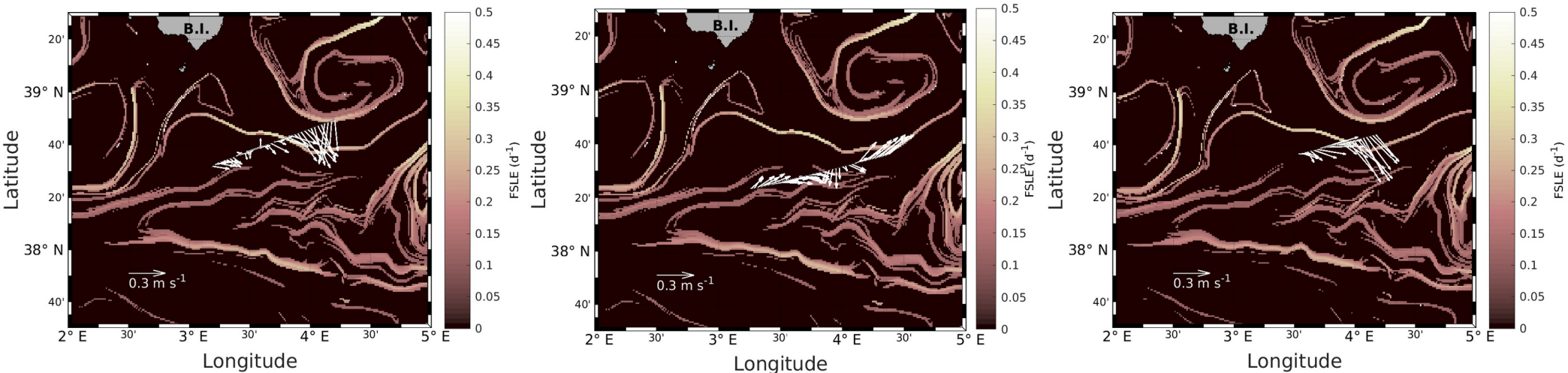
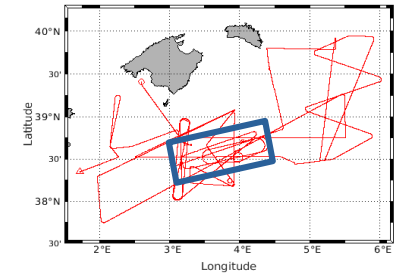
Références

- Barceló-Llull et al., 2021 : Uncovering fine-scale ocean currents from in situ observations to anticipate SWOT satellite mission capabilities, *Frontiers in Marine Science*, <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.679844>.
- Barrillon et al., 2022** : Phytoplankton reaction to an intense storm in the northwestern Mediterranean Sea, *EGU sphere* [in revision], <https://doi.org/10.5194/egusphere-2022-478>.
- Barton et al., 2010 : Patterns of diversity in marine phytoplankton, *Science*, <https://doi.org/10.1126/science.118496>.
- Clayton et al., 2014 : Fine scale phytoplankton community structure across the Kuroshio Front, *Journal of Plankton Research*, <https://doi.org/10.1093/plankt/fbu020>.
- Comby et al., 2022** : Measuring vertical velocities with ADCPs in low-energy ocean, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-21-0180.1>.
- Doglioli et al., 2013 : A software package and hardware tools for in situ experiments in a Lagrangian reference frame, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-12-00183.1>.
- D'Ovidio et al., 2004 : Mixing structures in the Mediterranean Sea from finite-size Lyapunov exponents, *Geophysical Research Letters*, <https://doi.org/10.1029/2004GL020328>.
- D'Ovidio et al., 2010 : Fluid dynamical niches of phytoplankton types, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, <https://doi.org/10.1073/pnas.1004620107>.
- D'Ovidio et al., 2019 : Frontiers in Fine-Scale in situ Studies: Opportunities During the SWOT Fast Sampling Phase, *Frontiers in Marine Science*, <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00232>.
- Dugenne et al., 2014 : Consequence of a sudden wind event on the dynamics of a coastal phytoplankton community: an insight into specific population growth rates using a single cell high frequency approach, *Frontiers in microbiology*, <https://doi.org/10.3389/fmicb.2014.00485>.
- Falkowski et al., 1998 : Biogeochemical controls and feedbacks on ocean primary production, *Science*, <https://doi.org/10.1126/science.281.5374.200>.
- Hoskins et al., 1978 : A new look at the ω -equation, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, <https://doi.org/10.1002/qj.49710443903>.
- Lévy et al., 2018. The role of submesoscale currents in structuring marine ecosystems. *Nat. Commun*, <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07059-3>.
- Le Quéré et al., 2015 : Global carbon budget 2015, *Earth System Science Data*, <https://doi.org/10.5194/essd-7-349-2015>.
- Mahadevan, 2016 : The impact of submesoscale physics on primary productivity of plankton, *Annual review of marine science*, <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010814-015912>.
- Marrec et al., 2018 : Coupling physics and biogeochemistry thanks to high-resolution observations of the phytoplankton community structure in the northwestern Mediterranean Sea, *Biogeosciences*, <https://doi.org/10.5194/bg-15-1579-2018>.
- Millot, 1999 : Circulation in the western Mediterranean Sea, *Journal of Marine Systems*, [https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(98\)00078-5](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(98)00078-5).
- Nencioli et al., 2011 : Surface coastal circulation patterns by in-situ detection of Lagrangian coherent structures, *Geophysical Research Letters*, <https://doi.org/10.1029/2011GL048815>.
- Petrenko et al., 2017 : A review of the LATEX project: mesoscale to submesoscale processes in a coastal environment, *Ocean Dynamics*, <https://doi.org/10.1007/s10236-017-1040-9>.
- Rousselet et al., 2019 : Vertical motions and their effects on a biogeochemical tracer in a cyclonic structure finely observed in the Ligurian Sea, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, <https://doi.org/10.1029/2018JC014392>.
- Rudnick, 1996 : Intensive surveys of the Azores Front : 2. Inferring the geostrophic and vertical velocity fields. *J. Geophys. Res.-Oceans*, <https://doi.org/10.1029/96JC01144>.
- Sosik et al., 2003 : Growth rates of coastal phytoplankton from time-series measurements with a submersible flow cytometer, *Limnology and Oceanography*, <https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.5.1756>.
- Tzortzis et al., 2021** : Impact of moderately energetic fine-scale dynamics on the phytoplankton community structure in the western Mediterranean Sea, *Biogeosciences*, <https://doi.org/10.5194/bg-18-6455-21>.
- Tzortzis et al., 2022** : The contrasted phytoplankton dynamics across a frontal system in the southwestern Mediterranean Sea, *EGU sphere* [submitted], <https://doi.org/10.5194/egusphere-2022-1008>.

Hydrodynamique

Courants horizontaux le long de l'hippodrome OE :

- Courants horizontaux mesurés par *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP)
- Superposés avec les **FSLE(s)**



→ Identification d'un front localisé aux alentours de 4°E

Nombre de Rossby

$$R_o = \frac{U}{fL}$$

U : vitesse (m s⁻¹)

f : paramètre de Coriolis (s⁻¹)

L : Longueur (m)

$R_o \ll 1$: géostrophie ou quasi-géostrophie

$R_o \gg 1$: vagues et la houle

$R_o \approx 1$: sous méso-échelle

Equilibre hydrostatique & géostrophique

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + fv$$

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - fu$$

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g$$

Fréquence de Brunt-Väisälä

$$N^2 = -\frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z}$$

Détermination de la taille de la grille d'interpolation

→ Solver oméga utilise les données au format d'une grille **Arakawa C**.

→ Les variables (**inputs**) doivent donc être sous la forme suivante :

- $\rho(L+1, M+1, N)$ L: nb de mailles de la grille sur l'axe x
- $u(L, M+1, N)$ M : nb de mailles de la grille sur l'axe y
- $v(L+1, M, N)$ N : nb de mailles de la grille sur l'axe z

==> $w(Lm, M, N)$

→ L, M et N définies de la façon suivante dans le solver oméga :

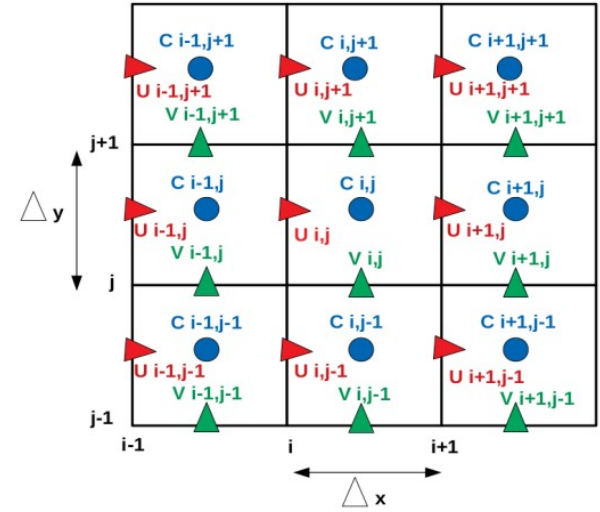
- $Lm = L-1 = i_{xp} \times 2^{(i_{ex}-1)} + 1$
- $M = jyq \times 2^{(j_{ey}-1)} + 1$
- $N = k_zr \times 2^{(k_{ez}-1)} + 1$

→ Le solveur commence par faire un calcul itératif sur une grille de dimension $[i_{xp}+1, j_{yq}+1, k_{zr}+1]$ puis va incrémenter la résolution au fur et à mesure des itérations.

→ Pour réduire le temps de calcul il faut donc que les coefs i_{xp} , j_{yq} , k_{zr} soient les plus petits possible, 2 ou 3 (éventuellement 5) mais pas plus au risque de réduire les taux de convergence de la solution.

→ i_{ex} , j_{ey} et k_{ez} permettent alors d'ajuster la taille de la grille à la taille du domaine d'observation.

→ L'idéal est d'avoir des i_{xp} les plus petits possibles et des i_{ex} les plus grands possible.



Objective mapping

- L'objective mapping consiste à reconstruire les champs de masse volumique et de vitesses horizontales.
- L'intérêt de l'objective mapping (par rapport à une interpolation simple) est qu'il permet d'obtenir un seuil de confiance du mapping (calcul de la variance des données = grille d'erreur).
- Selon Le Traon, 1990 le signal (u) de l'objective map est composé du signal moyen (\bar{u}), des fluctuations (u') et du bruit (n) (causé par la variabilité des fines échelles et des erreurs de mesure des instruments)

$$\mathbf{u} = \bar{\mathbf{u}} + \mathbf{u}' + \mathbf{n}$$

- Selon Le Traon, 1990 les fluctuations (u') du signal sont supposées être anisotropique (i.e. dépendant de la direction), avec une auto-covariance (C) Gaussienne :

$$C(x,y) = A \exp \left[-\frac{(x \cos \theta - y \sin \theta)^2}{L_x^2} - \frac{(x \sin \theta + y \cos \theta)^2}{L_y^2} \right]$$

Site de Rudnick :
http://chowder.ucsd.edu/Rudnick/SIO_221B.html

- L_x, L_y : échelle de décorrélation
- θ : angle orientation structure
- $E/A = 0,05$ le rapport bruit signal (Rudnick, 1996)
- E : matrice de covariance incluant la contribution des fluctuations u' et du bruit n (erreur) $\mathbf{E} = \langle (\mathbf{u}' + \mathbf{n})(\mathbf{u}' + \mathbf{n})^T \rangle$

Objective mapping

→ L'objective mapping consiste à reconstruire les champs de masse volumique et de vitesses horizontales.

→ L'intérêt de l'objective mapping (par rapport à une interpolation) est la confiance du mapping (calcul de la variance des données =

→ Selon Le Traité de l'océanographie physique et du bruit (n)

→ Selon Le Traité de l'océanographie physique dépendant d

Dans code objective mapping:

→ L'utilisateur doit rentrer L_x , L_y , θ , E/A

→ L_x , L_y influence surtout la matrice d'erreur

$$C(x,y) = A \exp \left[- \frac{(x \cos \theta - y \sin \theta)^2}{L_x^2} \right]$$

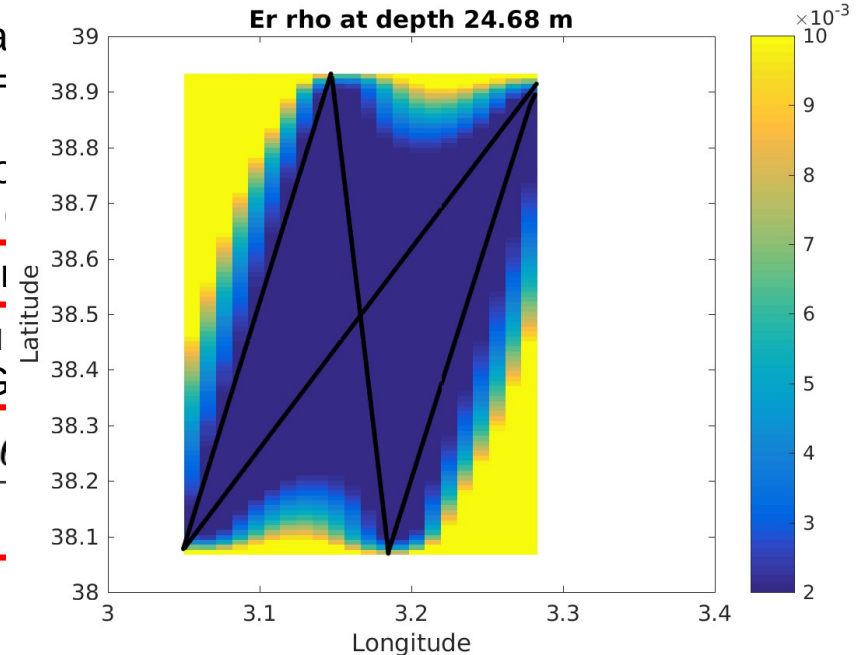
→ L_x , L_y : échelle de décorrélation

→ θ : angle orientation structure

→ $E/A = 0,05$ le rapport bruit signal (Rudnick, 1996)

→ E : matrice de covariance incluant la contribution des fluctuations u' et du bruit n (erreur)

$$\mathbf{E} = \langle (\mathbf{u}' + \mathbf{n})(\mathbf{u}' + \mathbf{n})^T \rangle$$



Vertical velocities

- Omega equation (Hoskin et al., 1978)

$$f^2 \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + \nabla_h (N^2 \cdot \nabla_h w) = \nabla \cdot \mathbf{Q}$$

- f : parameter of Coriolis (s^{-1})
- w : vertical velocity ($m s^{-1}$)
- N^2 : Brünt Väisälä frequency
- \mathbf{Q} : \mathbf{Q} -vector

- Different forcings can be considered (Giordani et al., 2006 ; presentation of Alice Pietri <https://spark.adobe.com/page/0eLbCh7FF1et5/>)

$$\mathbf{Q} = \mathbf{Q}_{th} + \mathbf{Q}_{dm} + \underbrace{2\mathbf{Q}_{tg} + \mathbf{Q}_{tag}}_{\mathbf{Q}_{tw}} + \mathbf{Q}_{dag} + \mathbf{Q}_{dr}$$

\mathbf{Q}_{tg} : Geostrophic

$$\mathbf{Q} = \left(\frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \mathbf{V}_g}{\partial x} \nabla \rho, \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \mathbf{V}_g}{\partial y} \nabla \rho \right)$$

\mathbf{V}_g : geostrophic horizontal velocity

\mathbf{Q}_{tag} : Ageostrophic

$$\mathbf{Q} = \left(\frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \mathbf{V}_{ag}}{\partial x} \nabla \rho, \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \mathbf{V}_{ag}}{\partial y} \nabla \rho \right)$$

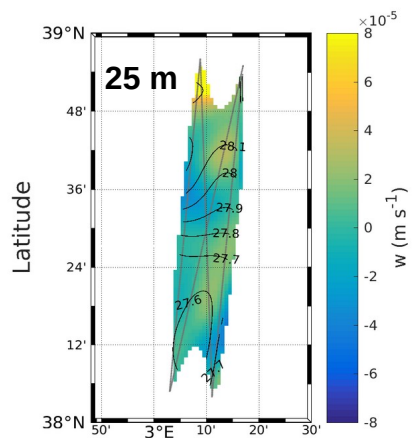
\mathbf{V}_{ag} : ageostrophic horizontal velocity

\mathbf{Q}_{dag} : Thermal wind imbalance TWI

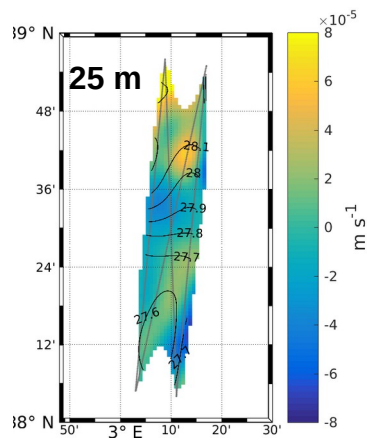
$$\begin{cases} Q_{dagx} = f \left(\frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial u_{ag}}{\partial z} - \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial v_{ag}}{\partial z} \right) \\ Q_{dagy} = f \left(\frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial u_{ag}}{\partial z} - \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v_{ag}}{\partial z} \right) \end{cases}$$

with

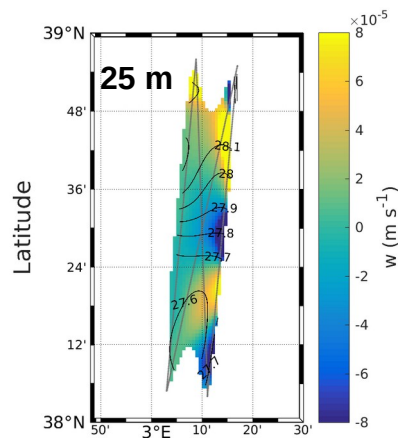
$$\begin{cases} TWI(x) = f \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} = f \frac{\partial u_{ag}}{\partial z} \\ TWI(y) = f \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} = f \frac{\partial v_{ag}}{\partial z} \end{cases}$$



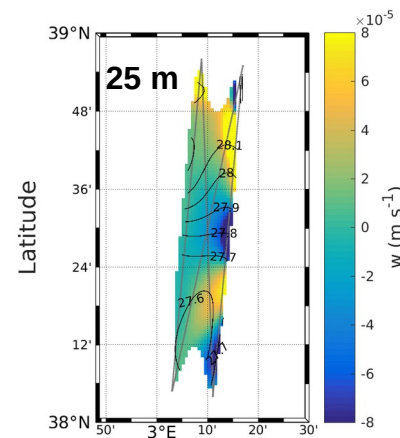
W TWI = 10^{-18}



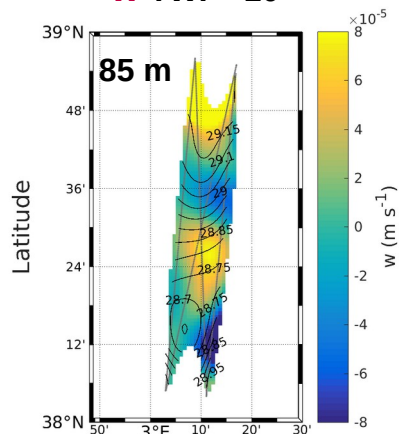
W with TWI



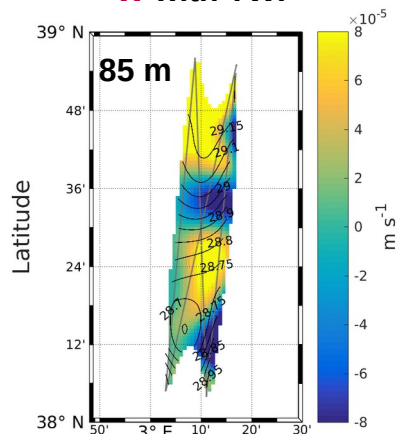
Wgeo TWI = 10^{-18}



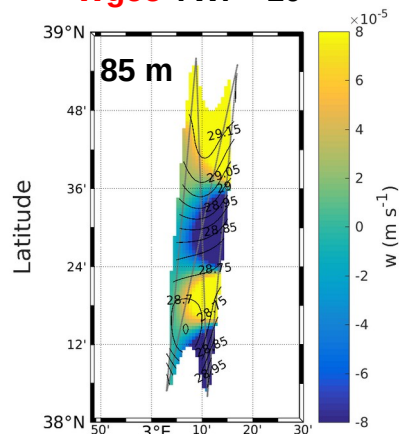
Wgeo with TWI



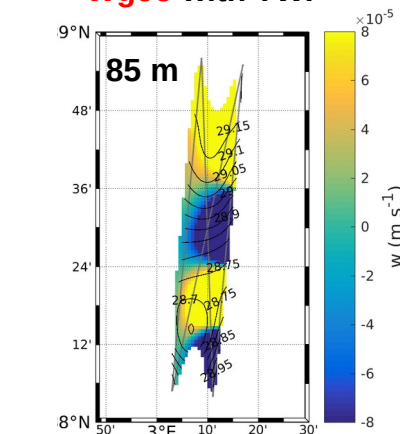
Longitude



Longitude



Longitude



Longitude

Hydrology

- An **iterative method** to **separate** types of water in surface (separation between 28.6 of density $\sim 0 - 80$ m) :

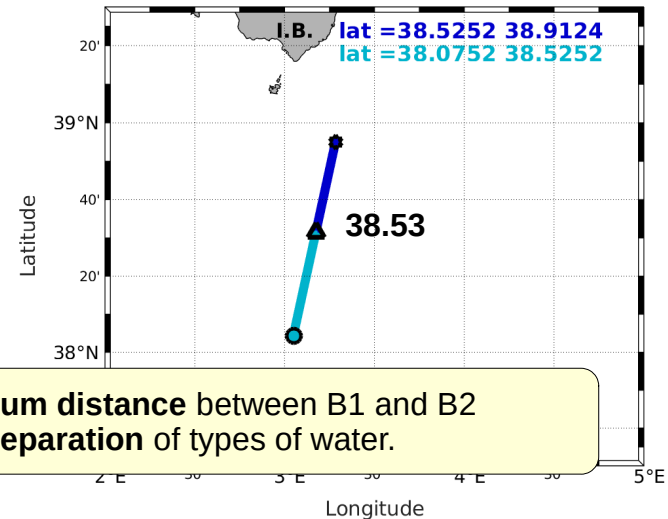
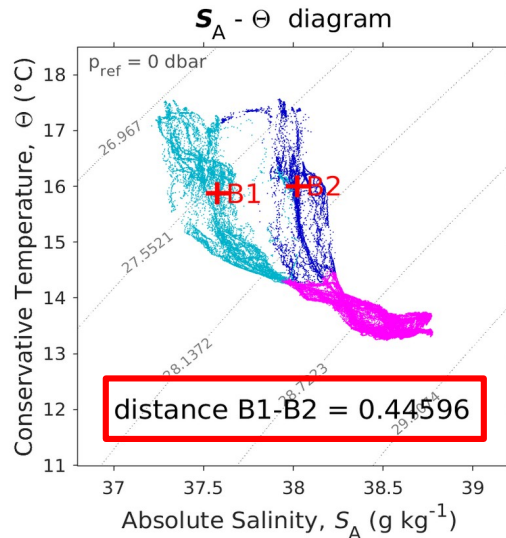
- L
→

Selection of temperature (T) and salinity (S) along each transect, **every 0.1 degrees of latitude**.

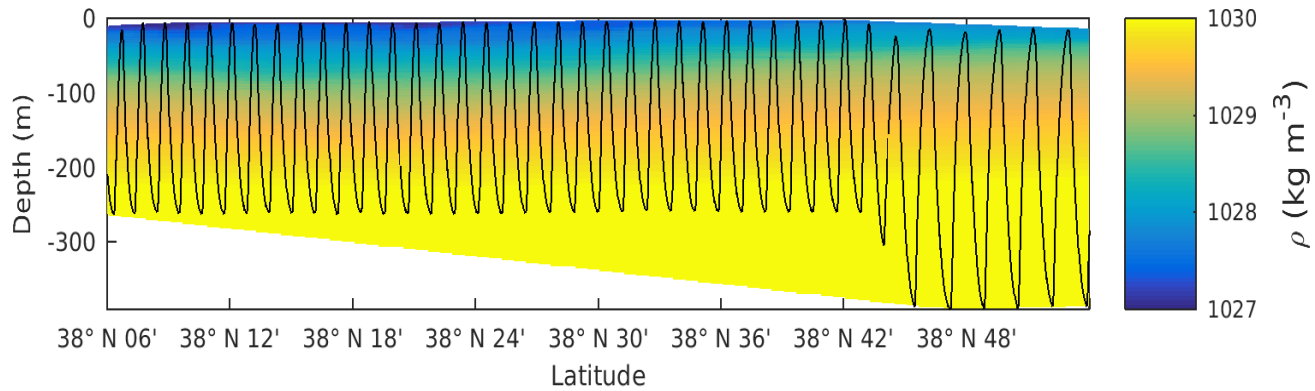
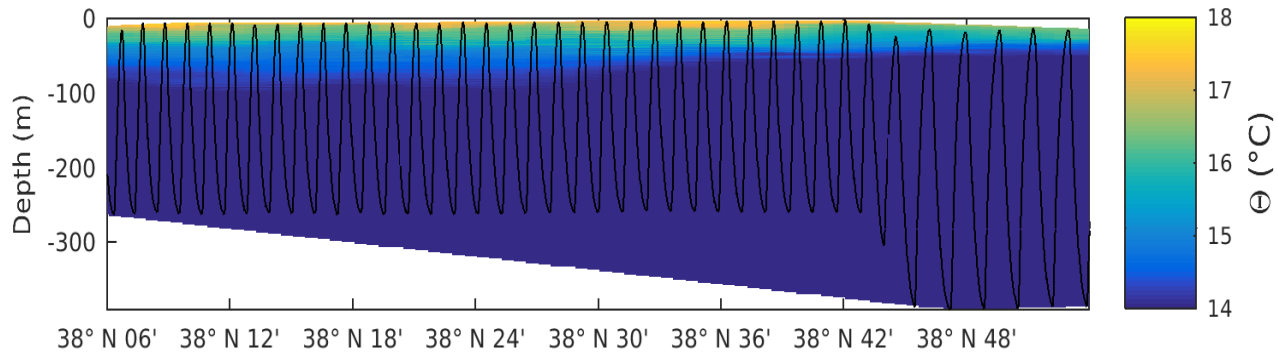
Calculation of the **barycenters B1 = (S1, T1)** and **B2 = (S2, T2)** along each transect, every 0.1 degrees of latitude.

With $S1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S1_i$ and $T1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T1_i$; $S2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S2_i$ and $T2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T2_i$

Calculation of the distance : $B1 - B2 = |S1 - S2|$.



Selection of the **maximum distance** between B1 and B2 to find the **best separation** of types of water.



Statistical analysis

Principal component analysis (PCA):

→ Classification of 11 variables:

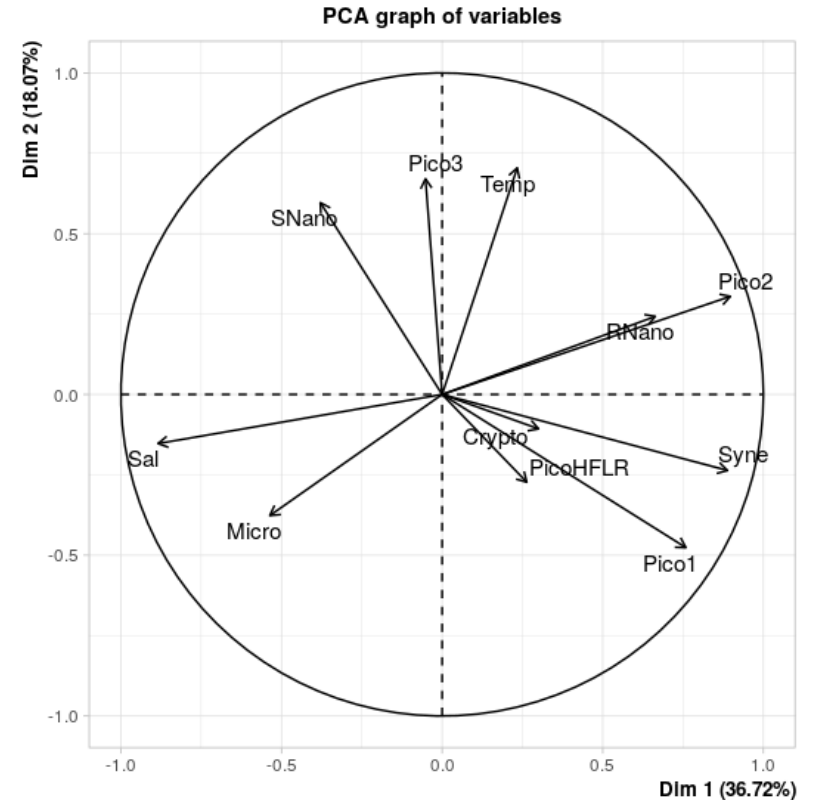
- Salinity
- Temperature
- Abundances of the different types of phytoplankton (Micro, Pico, *Synechococcus*, etc)

→ Identification of 3 clusters (or groups):

Cluster 1: Salinity (Sal) and Micro Phytoplankton (Micro)

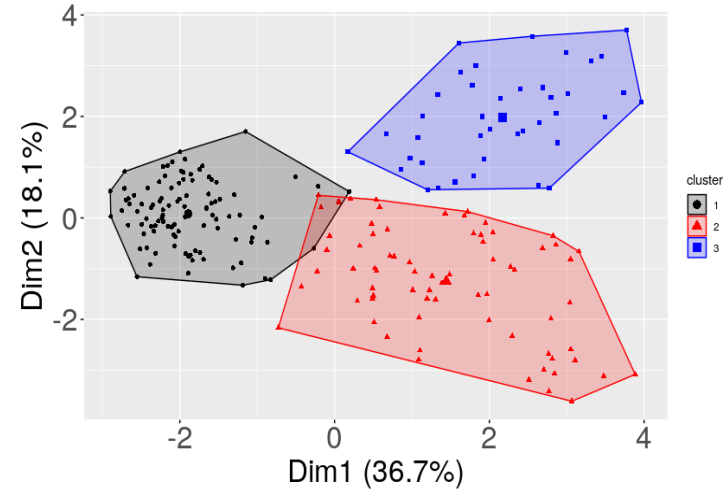
Cluster 2: Temperature (Temp), Pico Phytoplankton (Pico3), Nano Phytoplankton (SNano)

Cluster 3: Pico Phytoplankton (Pico1 & 2), *Synechococcus* (Syne), Nano Phytoplankton (RNano)

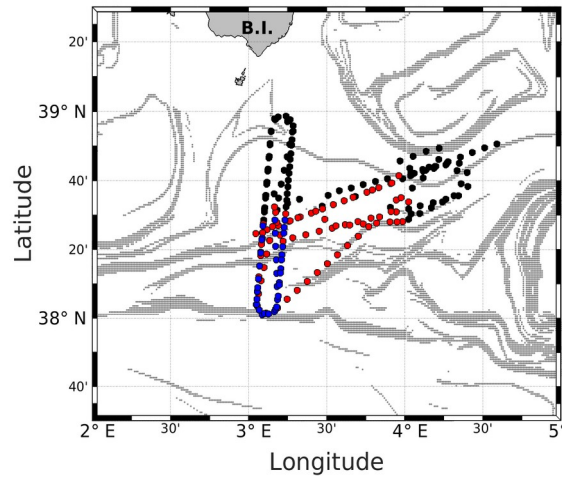


Statistical analysis

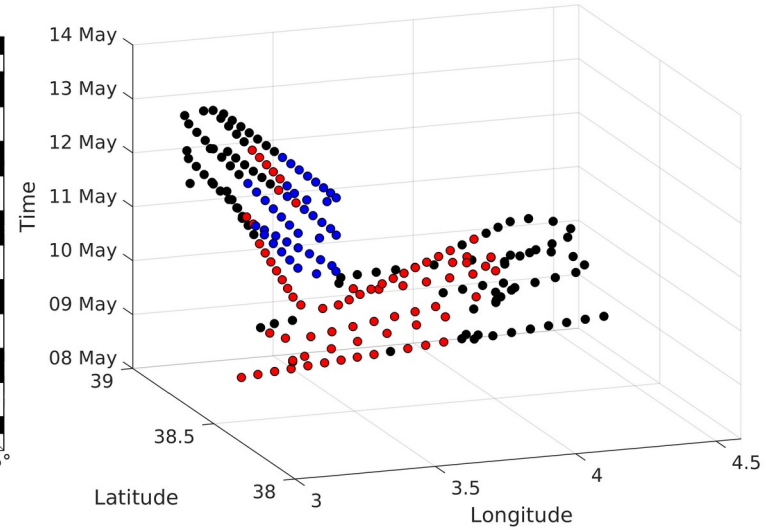
Analysis with the K-medoid algorithm (Hartigan and Wong, 1979 ; Kaufman and Rousseeuw, 1987):



→ Classification in 3 clusters

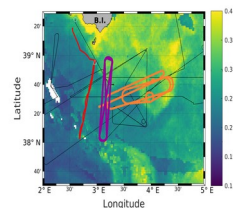


→ Localization of the clusters

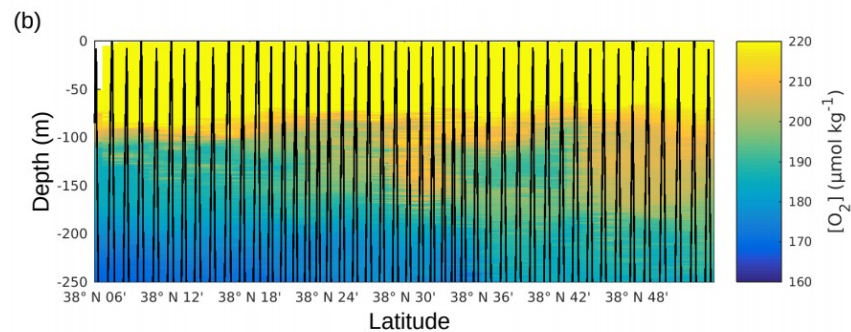
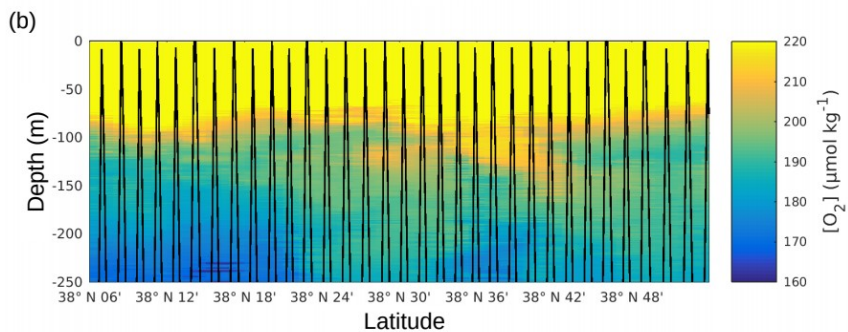
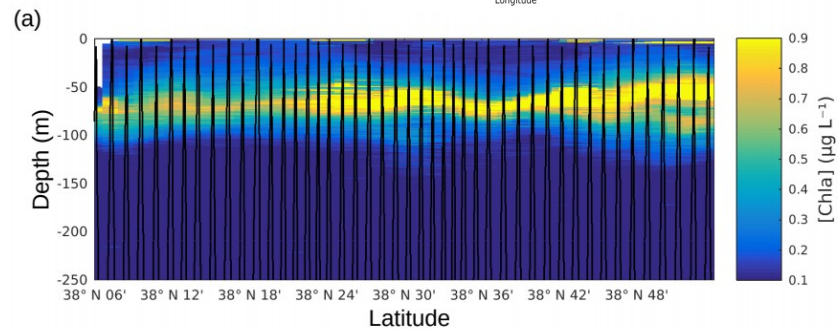
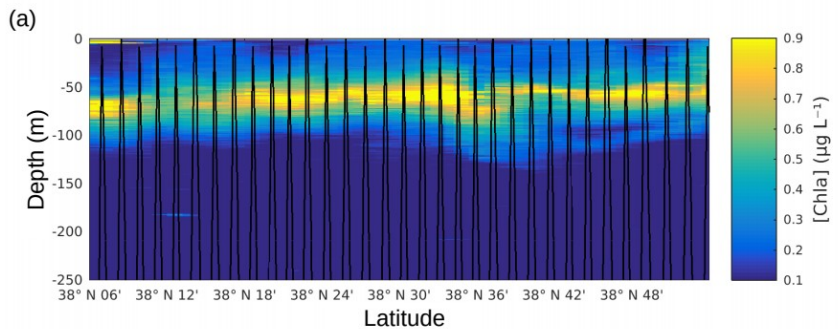


→ Spatio-temporal evolution

SeaExplorer Glider

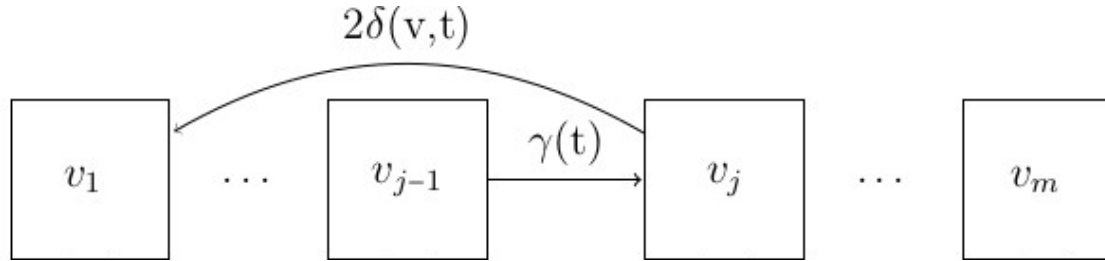


Glider's route
(in red)



Estimation de la dynamique des groupes phytoplanctoniques : The size-structured population model (Sosik et al., 2003)

→ Chaque cellule transite à travers plusieurs classes de taille au cours d'une journée



Probabilité de croissance d'une cellule, dépend de la lumière

$$\gamma(t) = \gamma_{max} \left[1 - \exp\left(-\frac{E(t)}{E^*}\right) \right]$$

- E : light intensity
- E^* : constant
- γ : proportion of cells
- γ_{max} : constant

Probabilité d'une cellule de se diviser par mitose

$$\delta(t) = \delta_{max} f(\mu_v \sigma_v^2) f(\mu_t \sigma_t^2)$$

Taux de croissance

$$\mu_{size} = \frac{1}{t + dt} \ln \left(\frac{\hat{N}(t + dt)}{N(t)} \right)$$

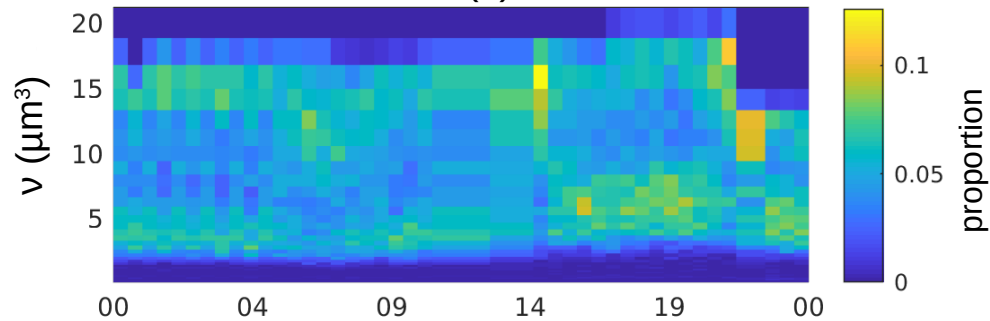
- μ : growth rates
- N : number (proportion) of cells in size classes
- t : time

Taux de perte

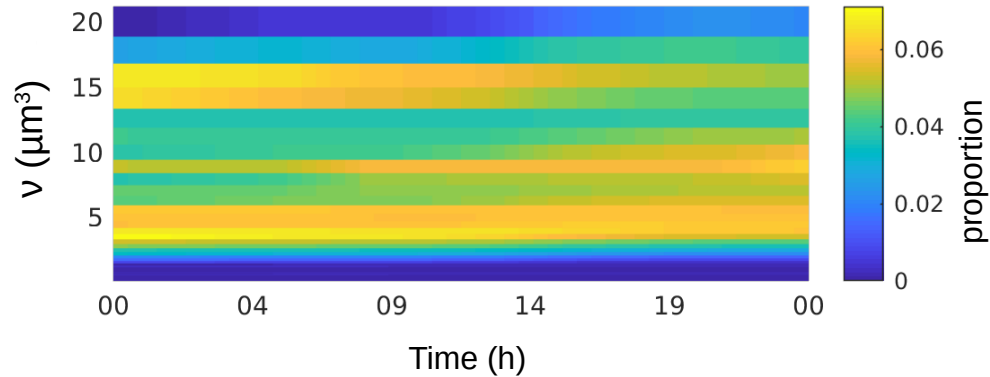
$$\bar{l} = \int_{dt=1h} \mu_{size}(dt) - \frac{1}{dt} \cdot \ln\left(\frac{\mathbf{N}(t + dt)}{\mathbf{N}(t)}\right)$$

Older AW

Biovolume (v) observé

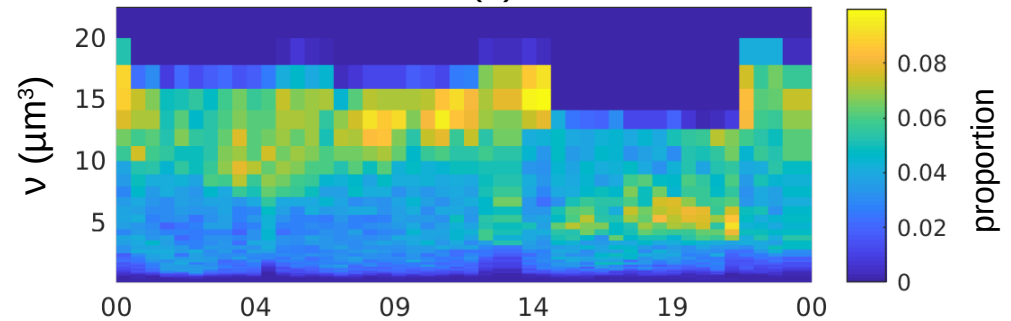


Biovolume (v) modélisé

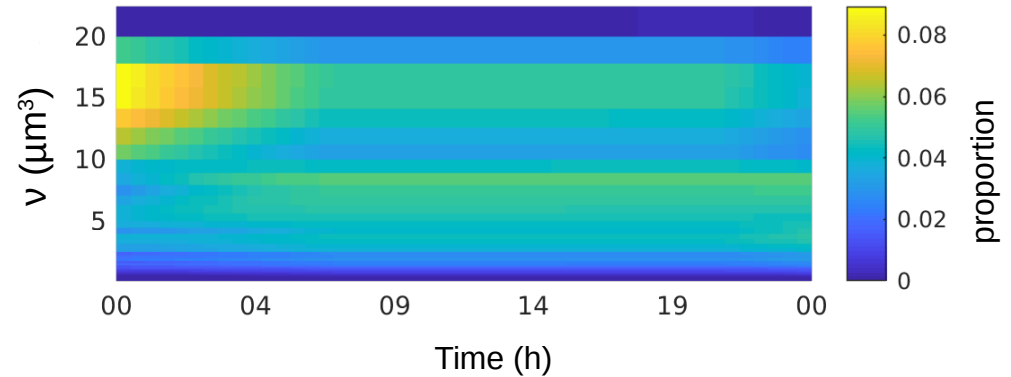


Pico1

Biovolume (v) observé



Biovolume (v) modélisé



GIBRALTAR 2020

Participant to the **Protevs-Gibraltar** in October 2020, in the Strait of Gibraltar.
Analysis of MVP, Seasoar, TSG, ADCP and drifters data on board.

