

Influence des structures physiques de fines échelles sur la répartition du phytoplancton au niveau des couches profondes

Laurina OMS

Stage M2 – Institut Méditerranéen d'Océanologie (M.I.O)

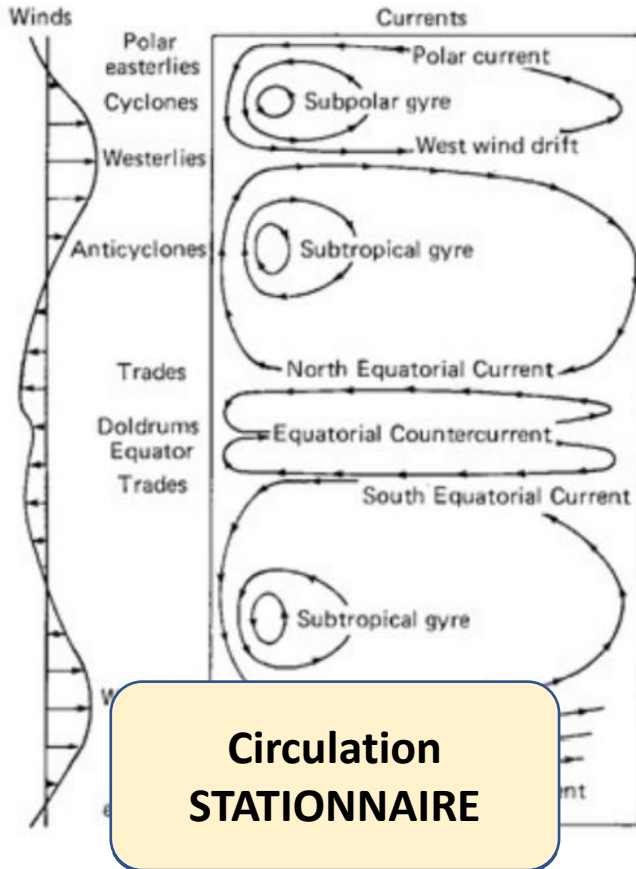
Directeurs : Gérald Grégori, Andréa Doglioli

Année universitaire : 2021-2022

INTRODUCTION

❖ Point historique

La circulation océanique



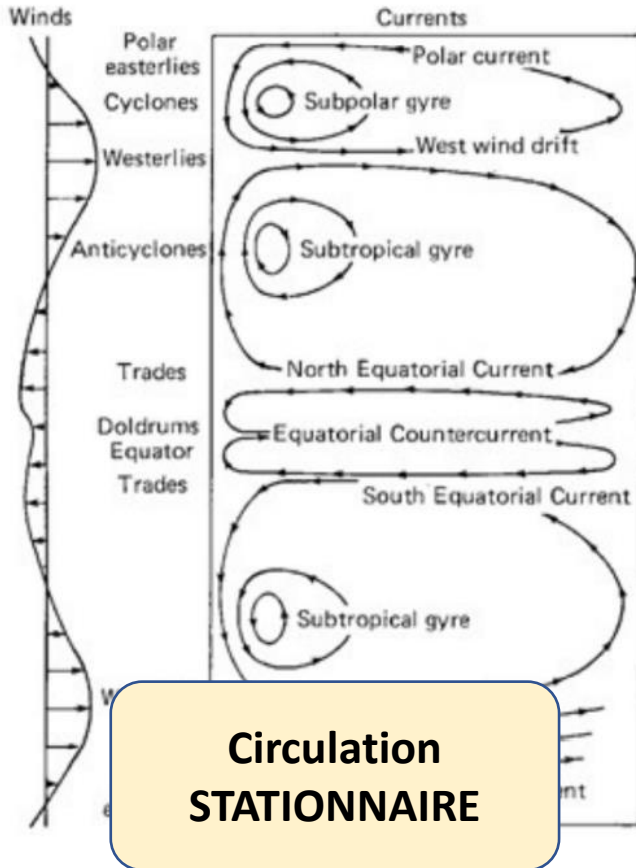
Combinaison des résultats des travaux
d'Ekman, Sverdrup et Stommel (*OPB206*,
M.Baklouti)

Années 40

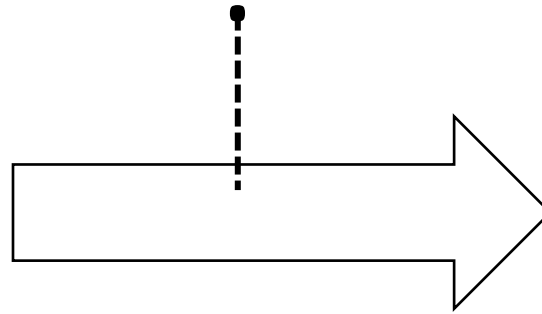
INTRODUCTION

❖ Point historique

La circulation océanique



Bouées dérivantes
Méthodes numériques
Imagerie satellitaire



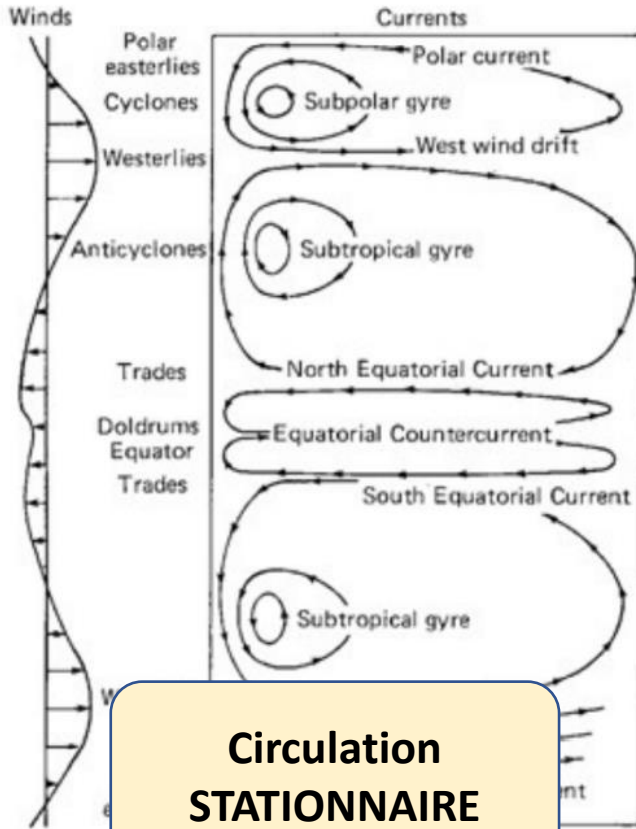
Combinaison des résultats des travaux
d'Ekman, Sverdrup et Stommel (*OPB206*,
M.Baklouti)

Années 40

INTRODUCTION

❖ Point historique

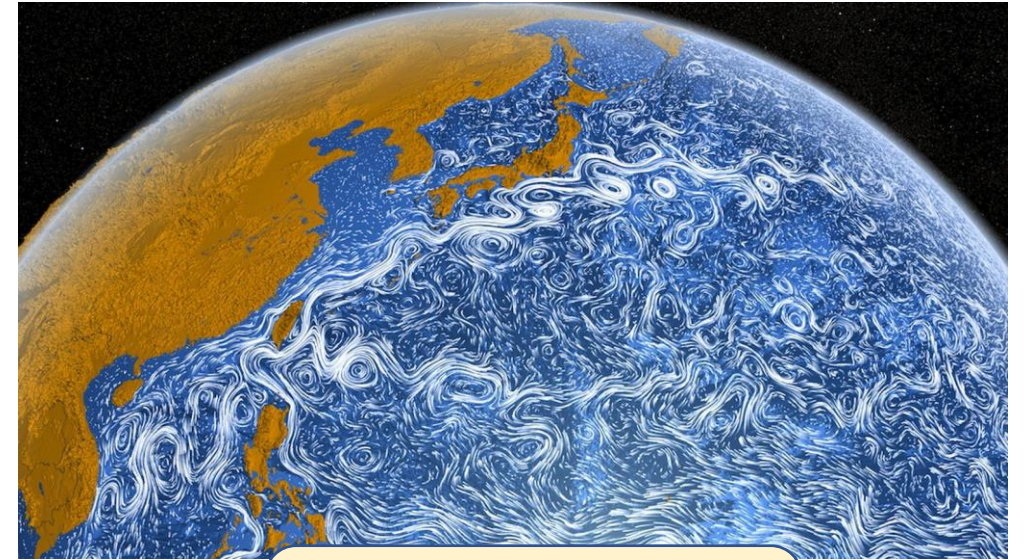
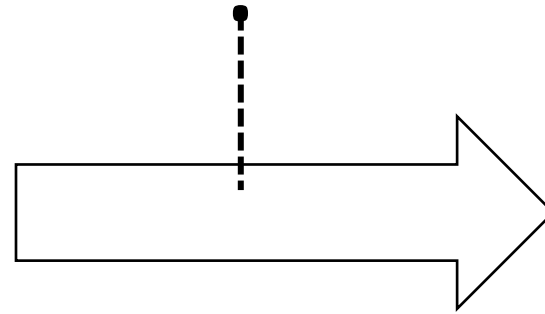
La circulation océanique



Combinaison des résultats des travaux d'Ekman, Sverdrup et Stommel (*OPB206, M.Baklouti*)

Années 40

Bouées dérivantes
Méthodes numériques
Imagerie satellitaire

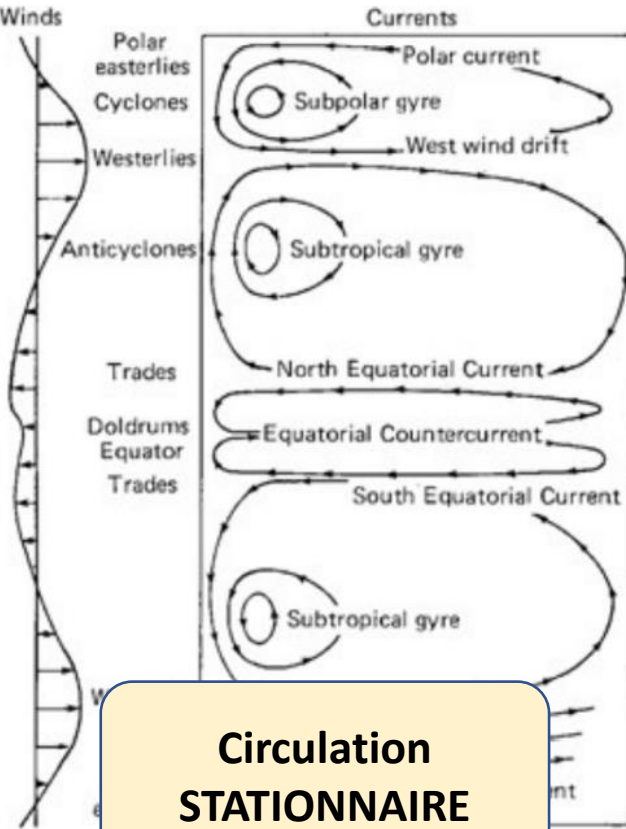


**VARIABILITE SPATIO-
TEMPORELLE**

Années 2000

INTRODUCTION

❖ Point historique

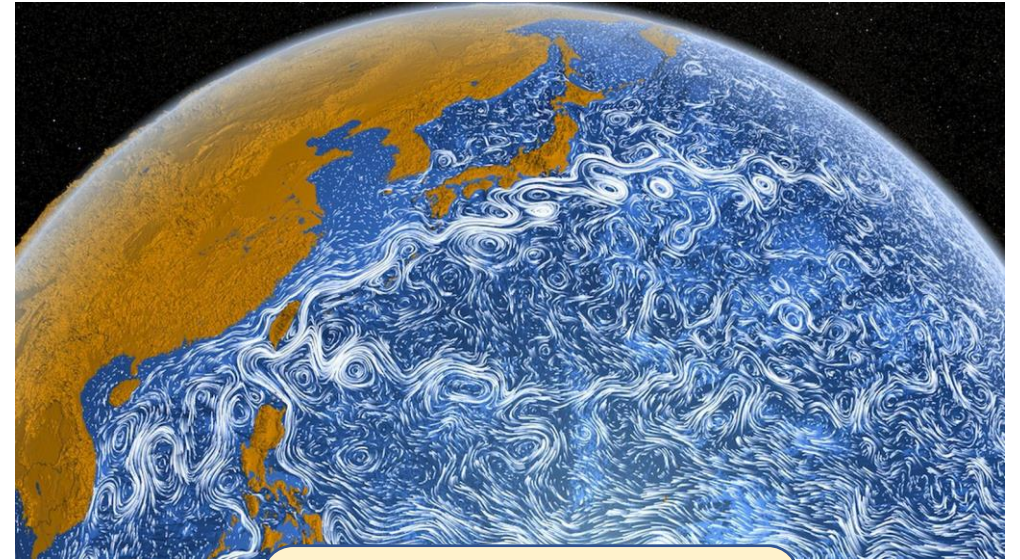
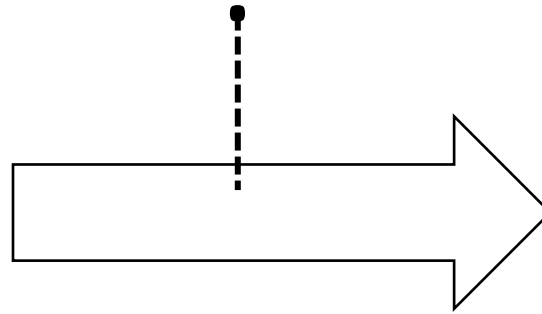


Combinaison des résultats des travaux d'Ekman, Sverdrup et Stommel (OPB206, M.Baklouti)

Années 40

La circulation océanique

Bouées dérivantes
Méthodes numériques
Imagerie satellitaire



VARIABILITE SPATIO-TEMPORELLE

Années 2000

La circulation océanique influence :

- La disponibilité des ressources (nutriments+lumière)
- **Le transport des organismes**

❖ Quels organismes ?

Le phytoplancton

Micro-organismes marins



<https://biologo.com.br/bio/plankton/>

❖ Quels organismes ?

Le phytoplancton

Micro-organismes marins



<https://biologo.com.br/bio/plankton/>

- Responsable de 50% de l'O₂ atmosphérique produit/an
- Possède une immense diversité d'espèce

INTRODUCTION

❖ Quels organismes ?

Le phytoplancton

Micro-organismes marins



- Responsable de 50% de l'O₂ atmosphérique produit/an
- Possède une immense diversité d'espèce

Rôle clé dans le fonctionnement de la planète

INTRODUCTION

❖ Quels organismes ?

Le phytoplancton

Micro-organismes marins



- Responsable de 50% de l'O₂ atmosphérique produit/an
- Possède une immense diversité d'espèce

Rôle clé dans le fonctionnement de la planète

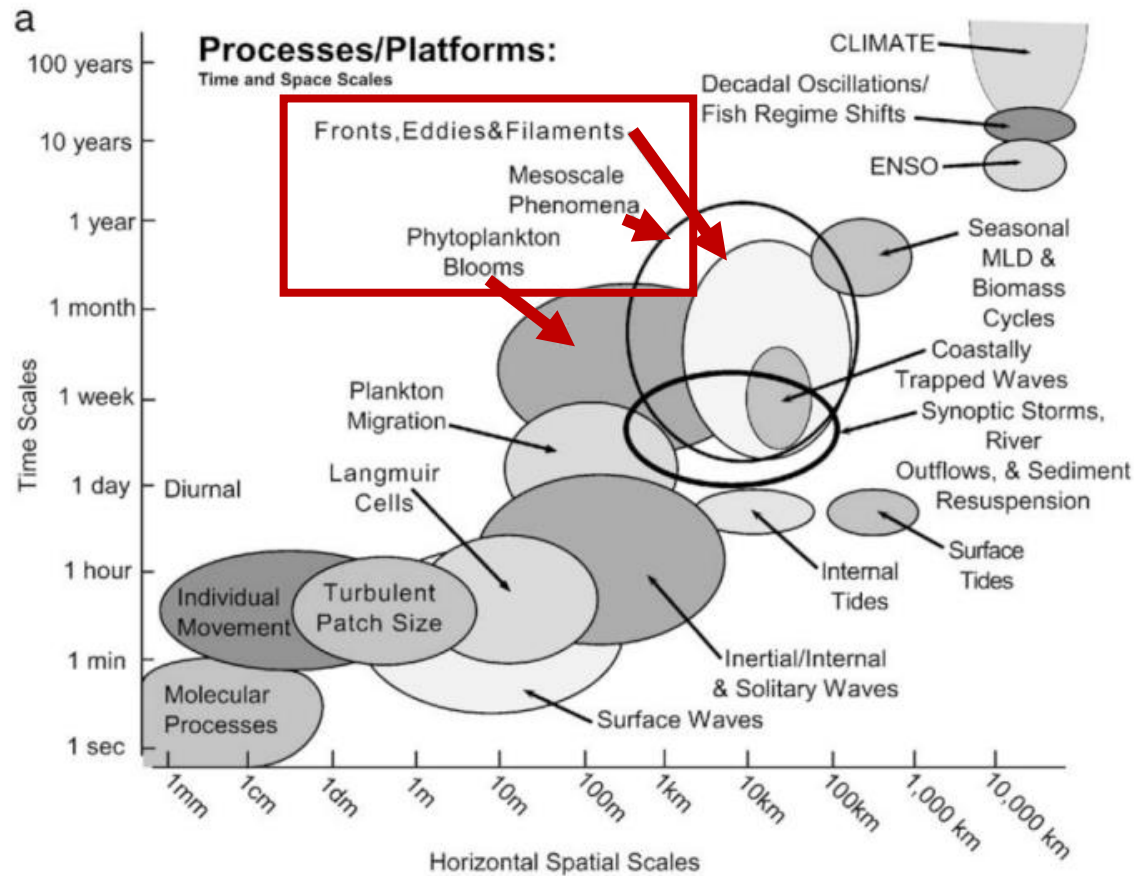
PARADOXE DU PLANCTON

Grande diversité et milieu oligotrophe
contredit le principe de l'exclusion compétitive ! (Ex : Mer Méditerranée)

INTRODUCTION

❖ Rôle de la physique ?

Connaissances actuelles



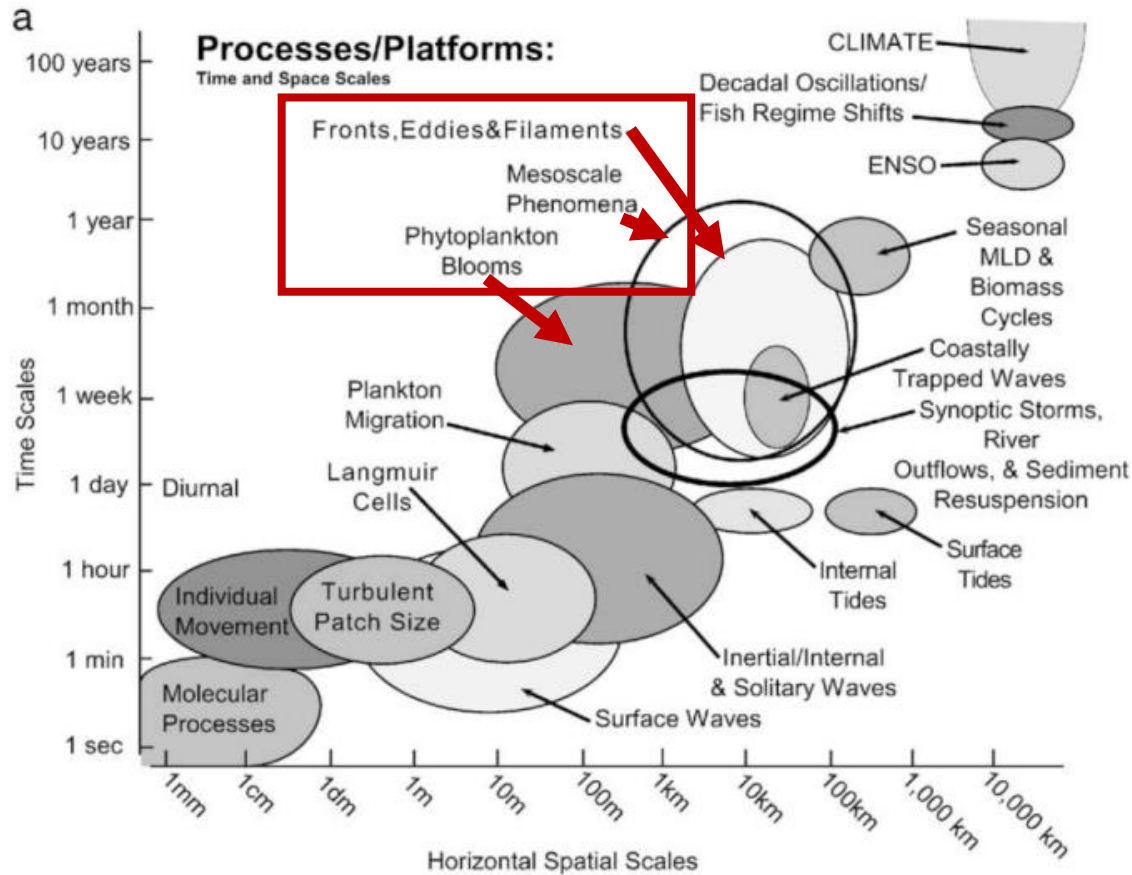
Variabilité spatio-temporelle du phytoplancton

TD Dickey, 2003

INTRODUCTION

❖ Rôle de la physique ?

Connaissances actuelles



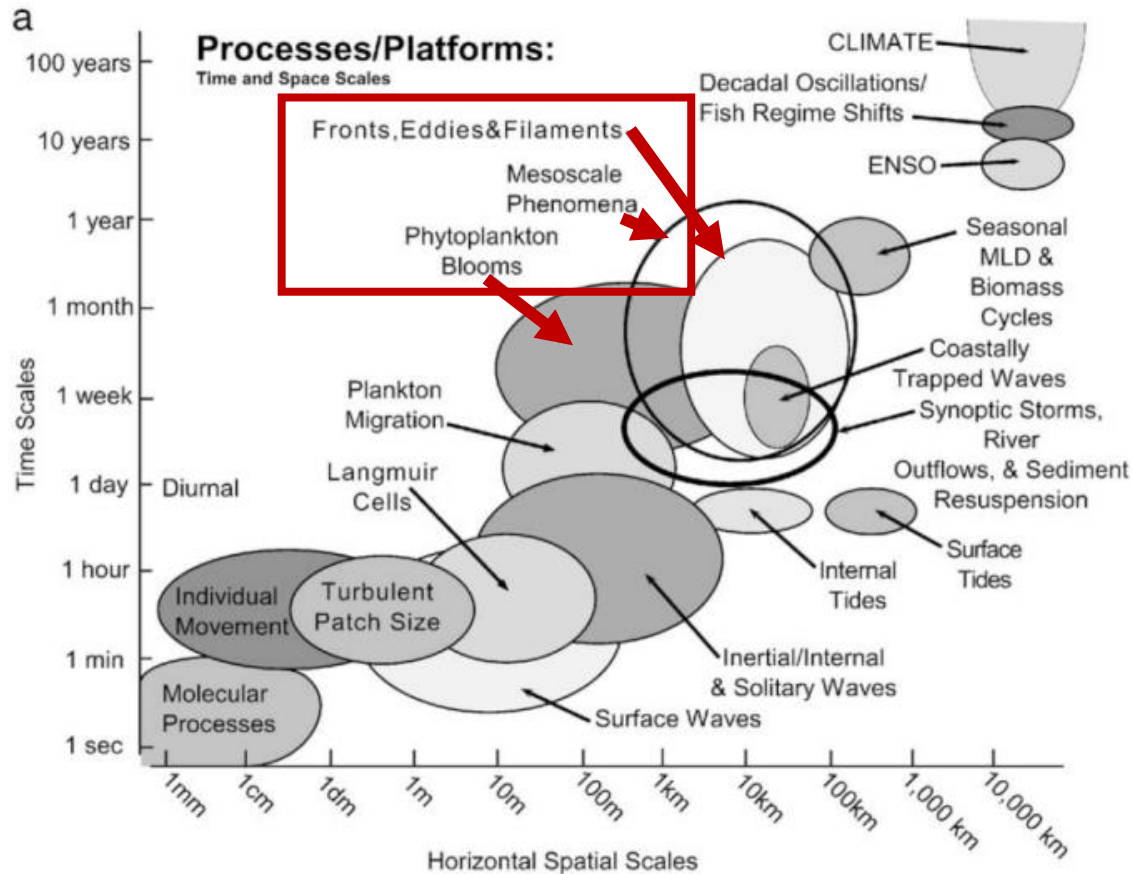
Variabilité spatio-temporelle du phytoplancton

**Aux fines échelles :
dynamique contrôlée par l'advection verticale
et horizontale**

INTRODUCTION

❖ Rôle de la physique ?

Connaissances actuelles



Variabilité spatio-temporelle du phytoplancton

**Aux fines échelles :
dynamique contrôlée par l'advection verticale
et horizontale**

*En surface :
répartition en mosaïque des communautés*

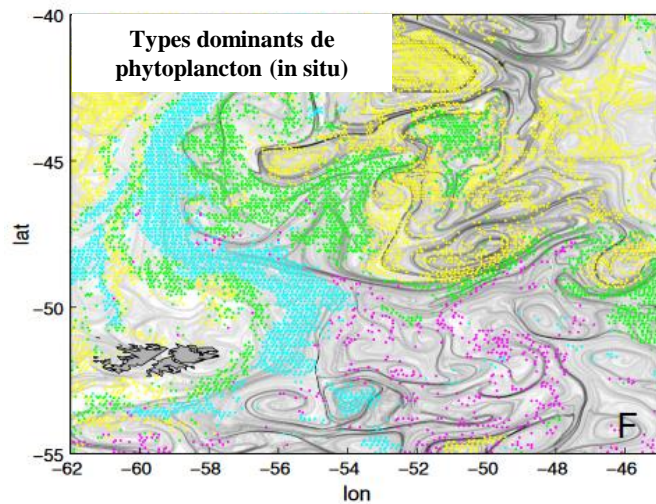
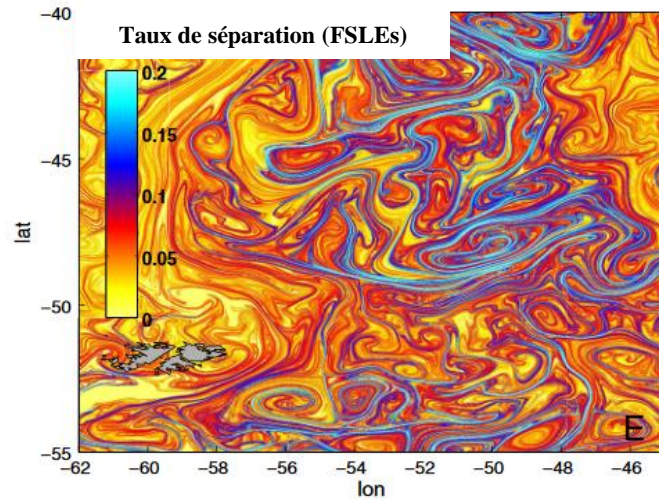
notion de niches fluidodynamiques

INTRODUCTION

❖ Rôle de la physique ?

Connaissances actuelles

Notion de niches fluidodynamiques



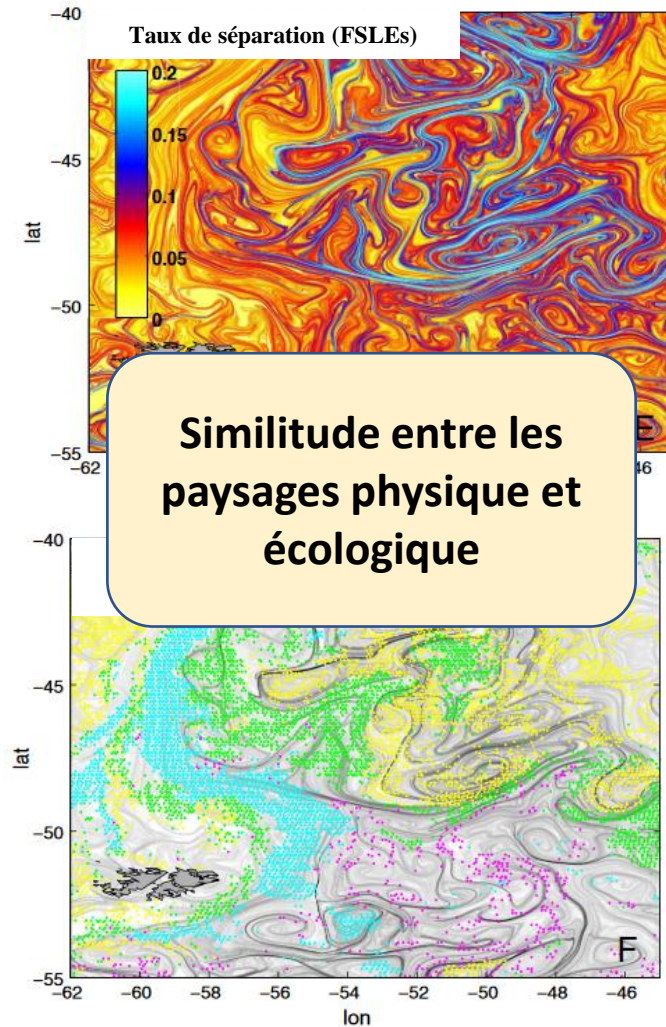
F. d'Ovidio, 2010

INTRODUCTION

❖ Rôle de la physique ?

Connaissances actuelles

Notion de niches fluidodynamiques



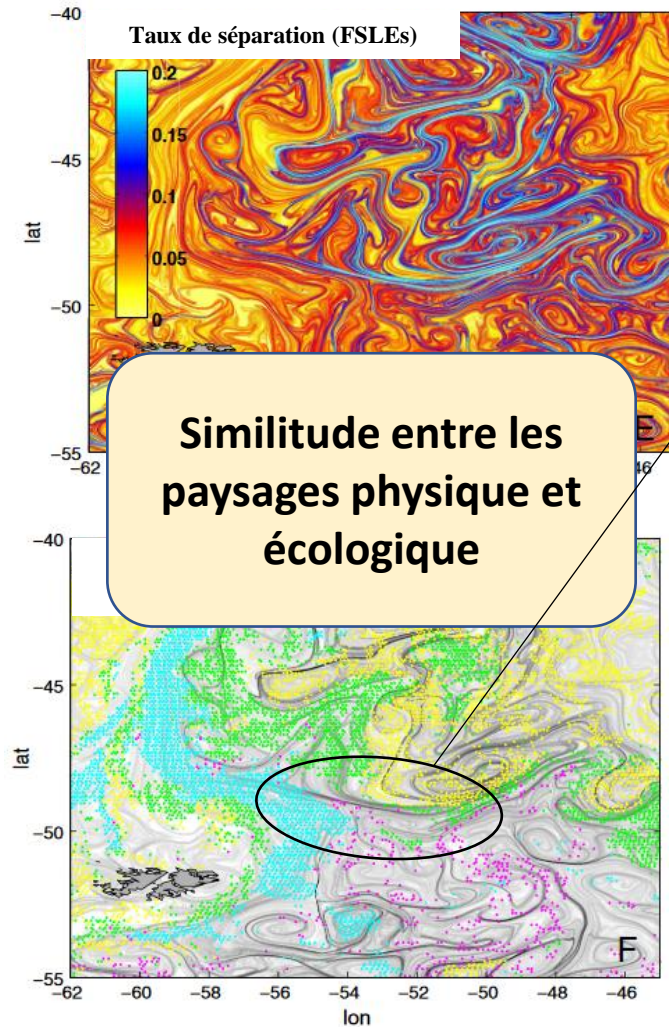
F. d'Ovidio, 2010

INTRODUCTION

❖ Rôle de la physique ?

Connaissances actuelles

Notion de niches fluidodynamiques



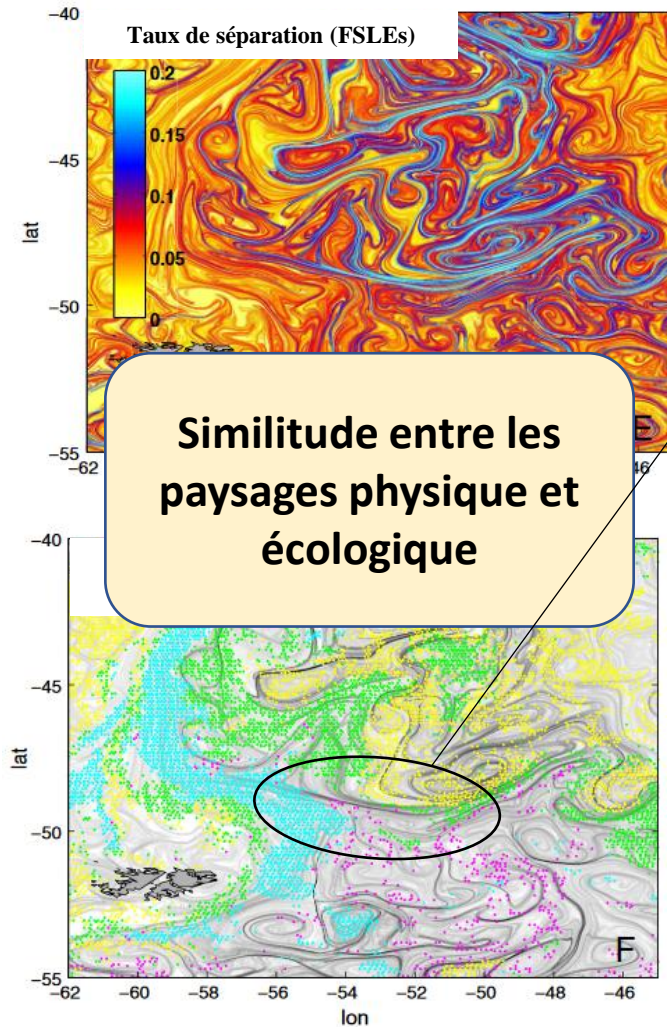
F. d'Ovidio, 2010

INTRODUCTION

❖ Rôle de la physique ?

Connaissances actuelles

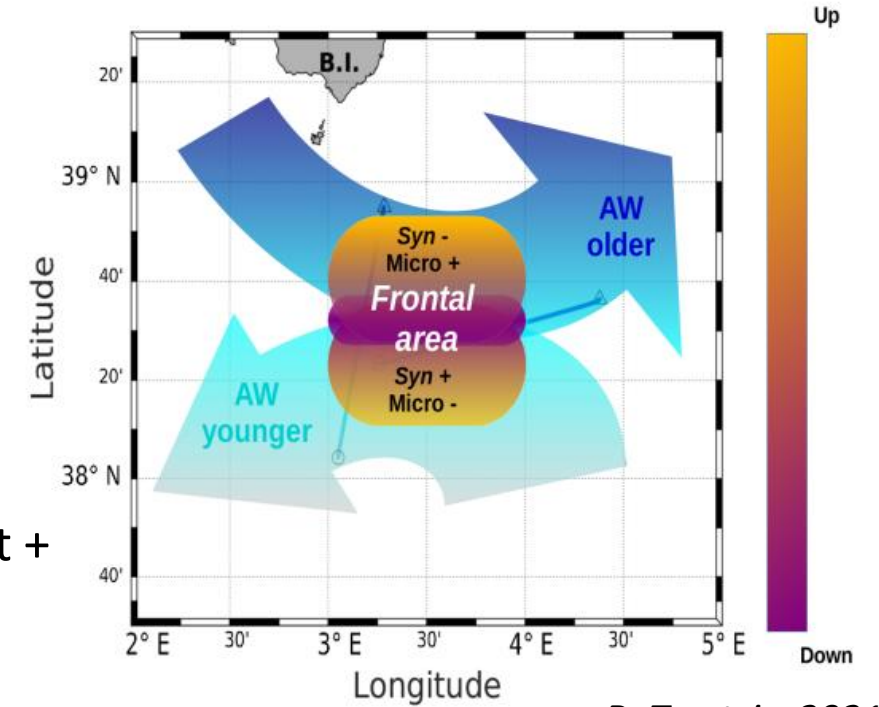
Notion de niches fluidodynamiques



F. d'Ovidio, 2010

Au niveau d'un front ?

- En surface front = **barrière hydrodynamique** contre le transport + sépare les communautés phytoplanctoniques
- En profondeur génère des **vitesse**s verticales



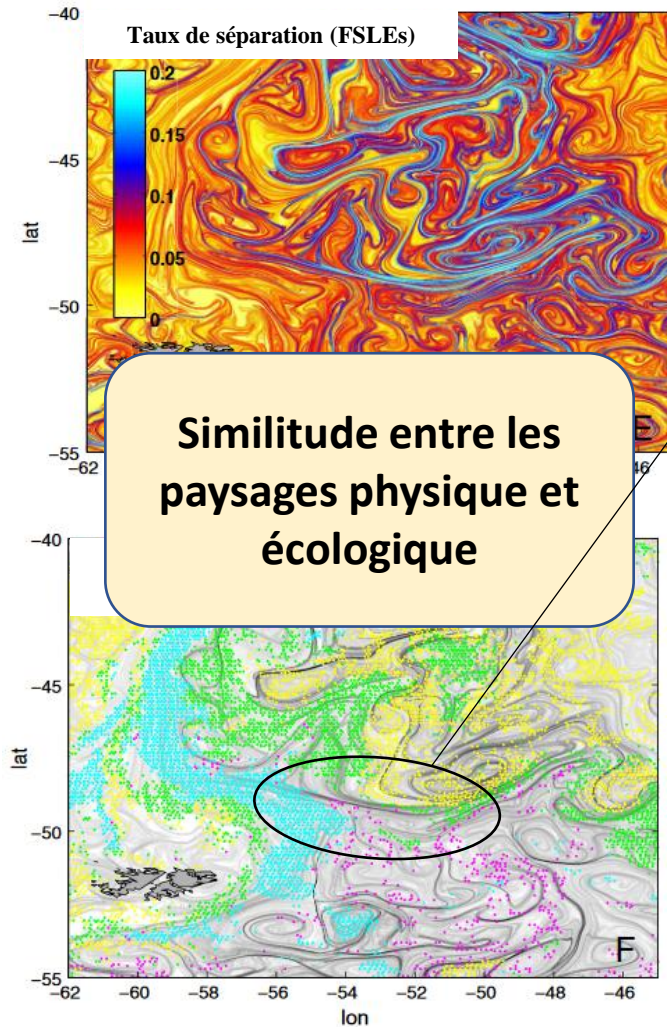
R. Tzortzis, 2021

INTRODUCTION

❖ Rôle de la physique ?

Connaissances actuelles

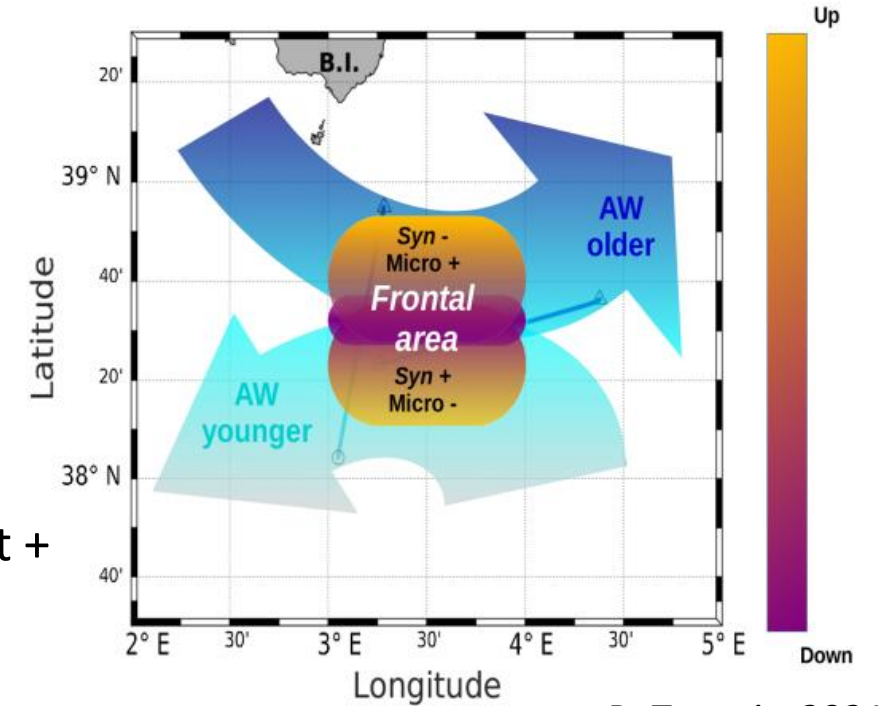
Notion de niches fluidodynamiques



F. d'Ovidio, 2010

Au niveau d'un front ?

- En surface front = **barrière hydrodynamique** contre le transport + sépare les communautés phytoplanctoniques
- En profondeur génère des **vitesse**s verticales



R. Tzortzis, 2021

Stage : Intérêt porté sur les conséquences en sub-surface des structures physiques de fines échelles

OBJECTIFS

❖ *Question principale :*

Comment les organismes phytoplanctoniques s'organisent-ils à l'échelle des processus physiques tels que les fronts et les tourbillons ?

OBJECTIFS

❖ *Question principale :*

Comment les organismes phytoplanctoniques s'organisent-ils à l'échelle des processus physiques tels que les fronts et les tourbillons ?

❖ *Question du stage :*

Quelle est l'influence de ces structures physiques en profondeur ?

OBJECTIFS

❖ *Question principale :*

Comment les organismes phytoplanctoniques s'organisent-ils à l'échelle des processus physiques tels que les fronts et les tourbillons ?

❖ ***Question du stage :***

Quelle est l'influence de ces structures physiques en profondeur ?

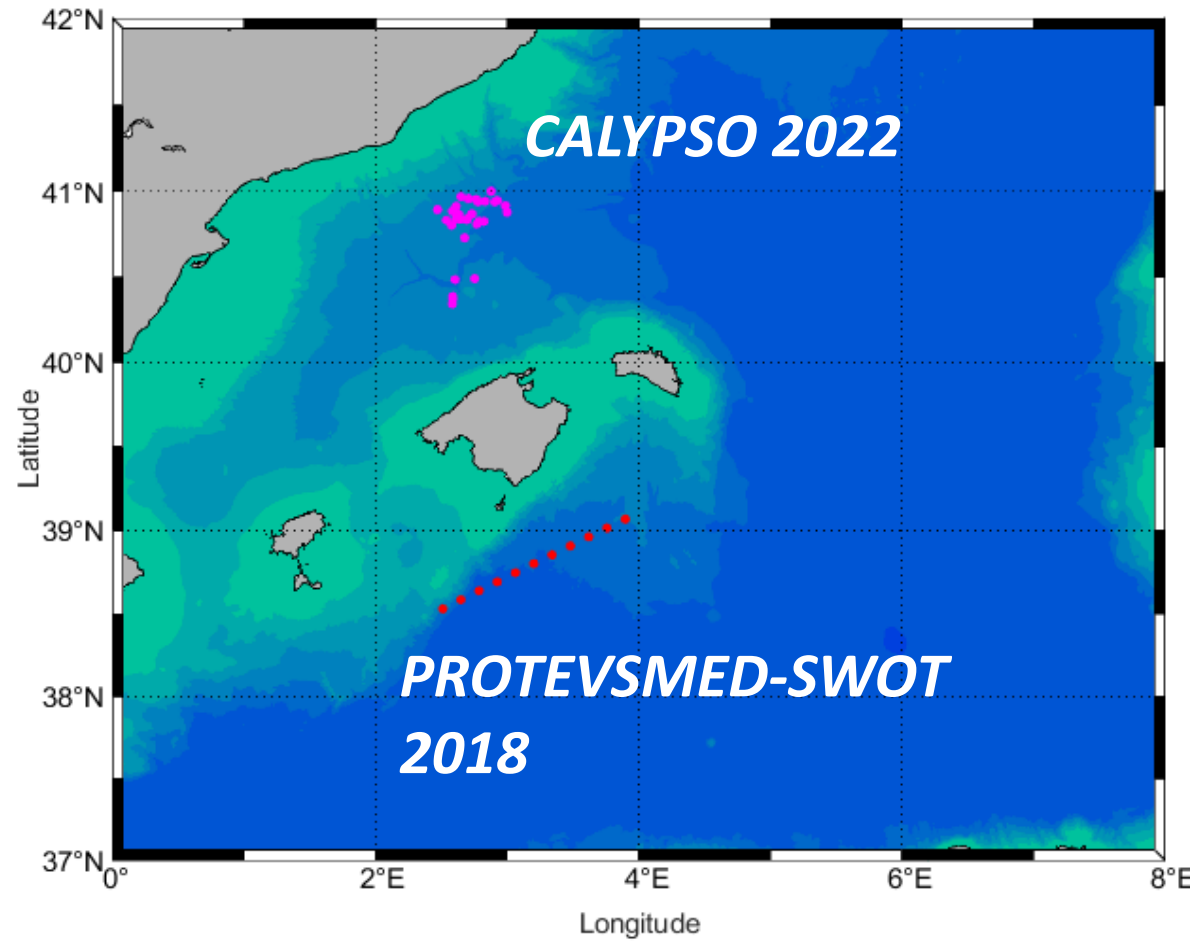
**Importances biogéochimiques
et écologiques des couches
phytoplanctoniques profondes**



Zone d'intense activité biologique

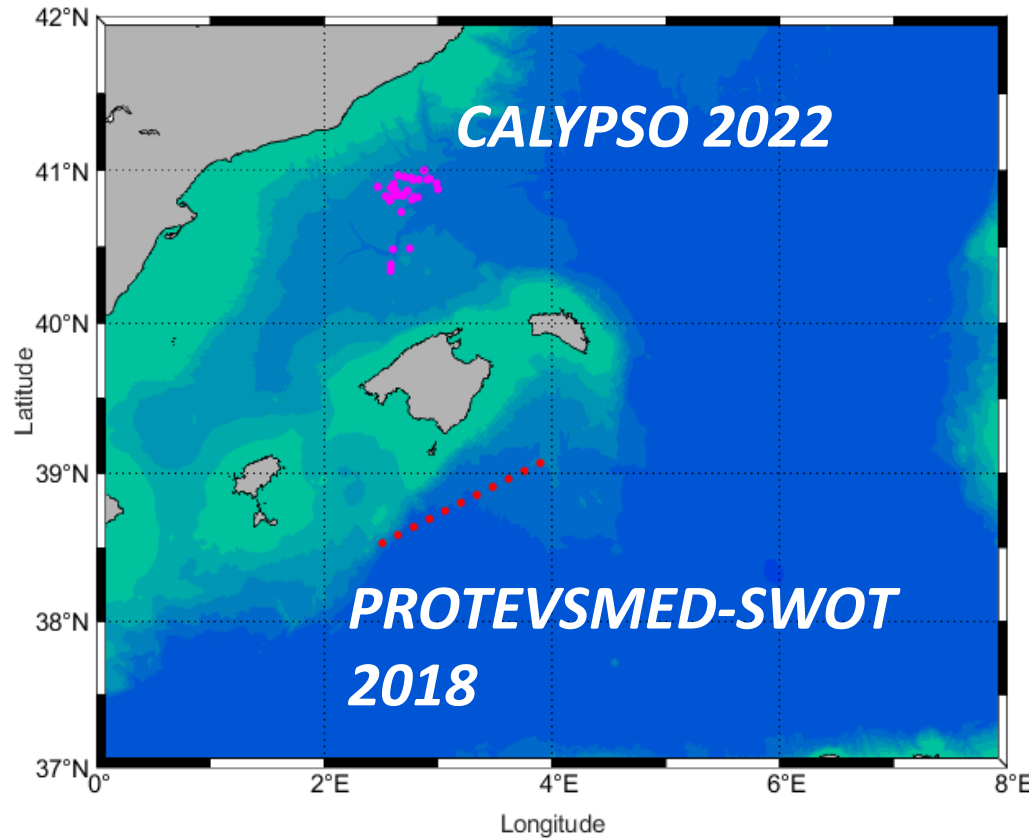
PRÉSENTATION DES CAMPAGNES

❖ 2 Campagnes autour des Îles Baléares



PRÉSENTATION DES CAMPAGNES

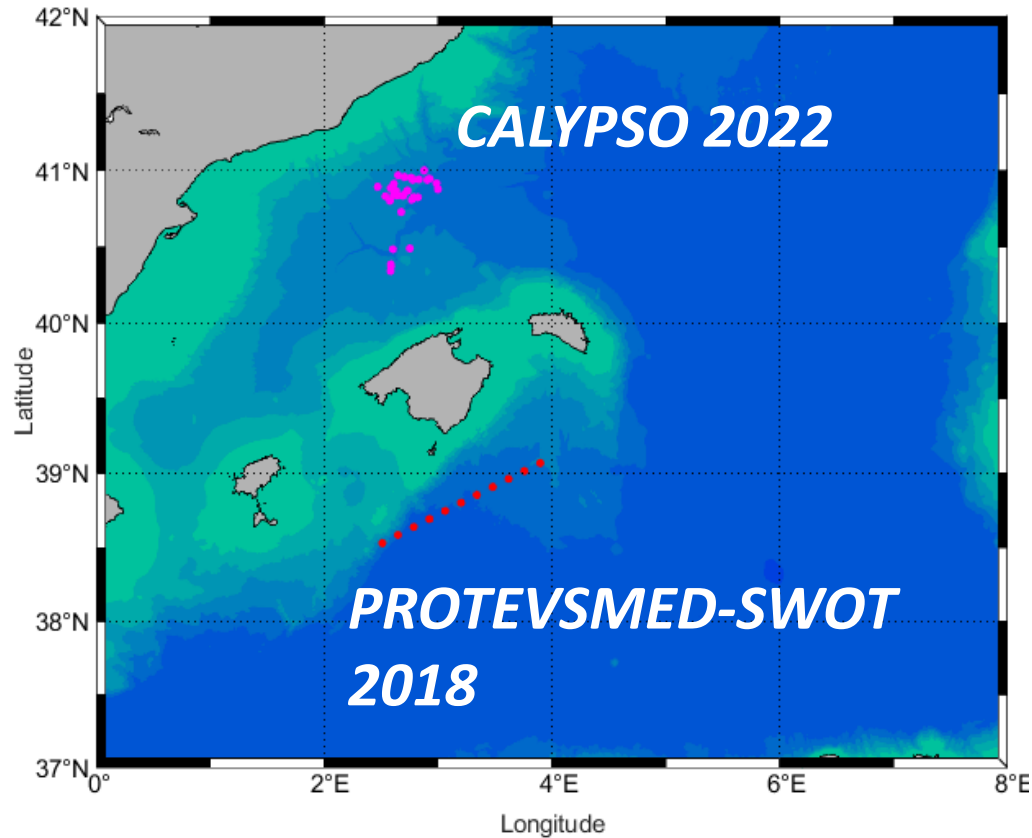
❖ 2 Campagnes autour des Îles Baléares



- Stratégie Lagrangienne adaptative

PRÉSENTATION DES CAMPAGNES

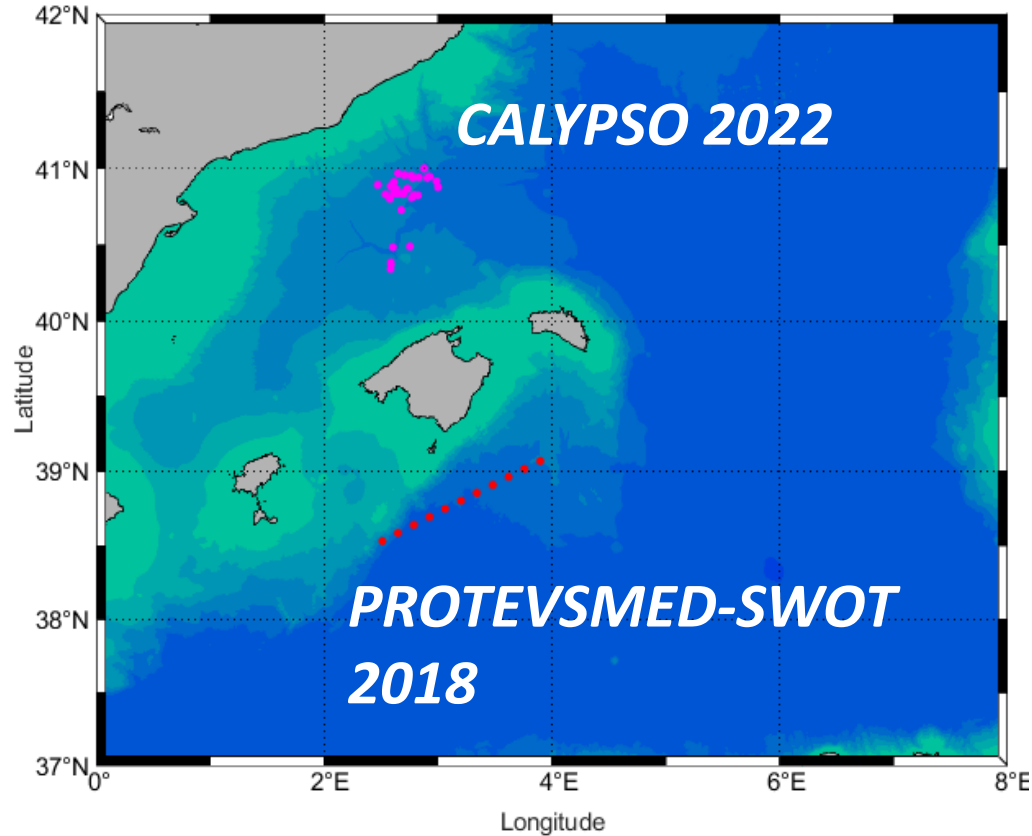
❖ 2 Campagnes autour des Îles Baléares



- Stratégie Lagrangienne adaptative
- Poisson tracté (Seasoar/EcoCTD)

PRÉSENTATION DES CAMPAGNES

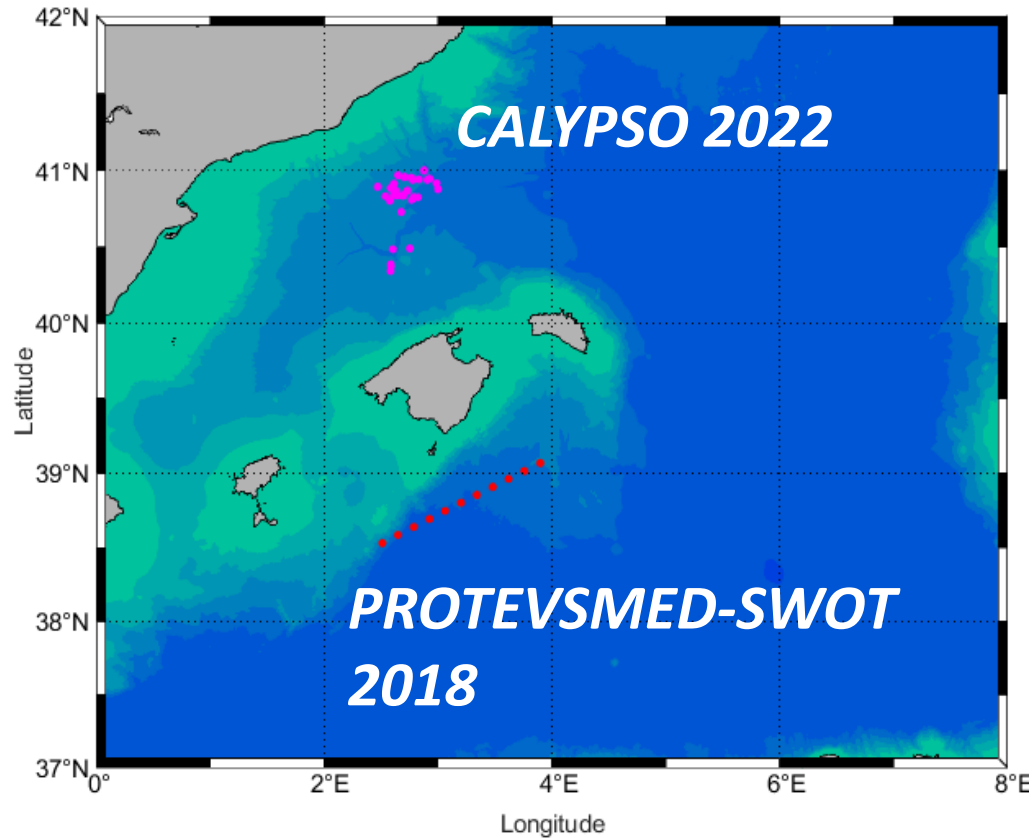
❖ 2 Campagnes autour des Îles Baléares



- Stratégie Lagrangienne adaptative
- Poisson tracté (Seasoar/EcoCTD)
- Analyses cytométriques sur échantillon CTD (données en sub-surface)

PRÉSENTATION DES CAMPAGNES

❖ 2 Campagnes autour des Îles Baléares

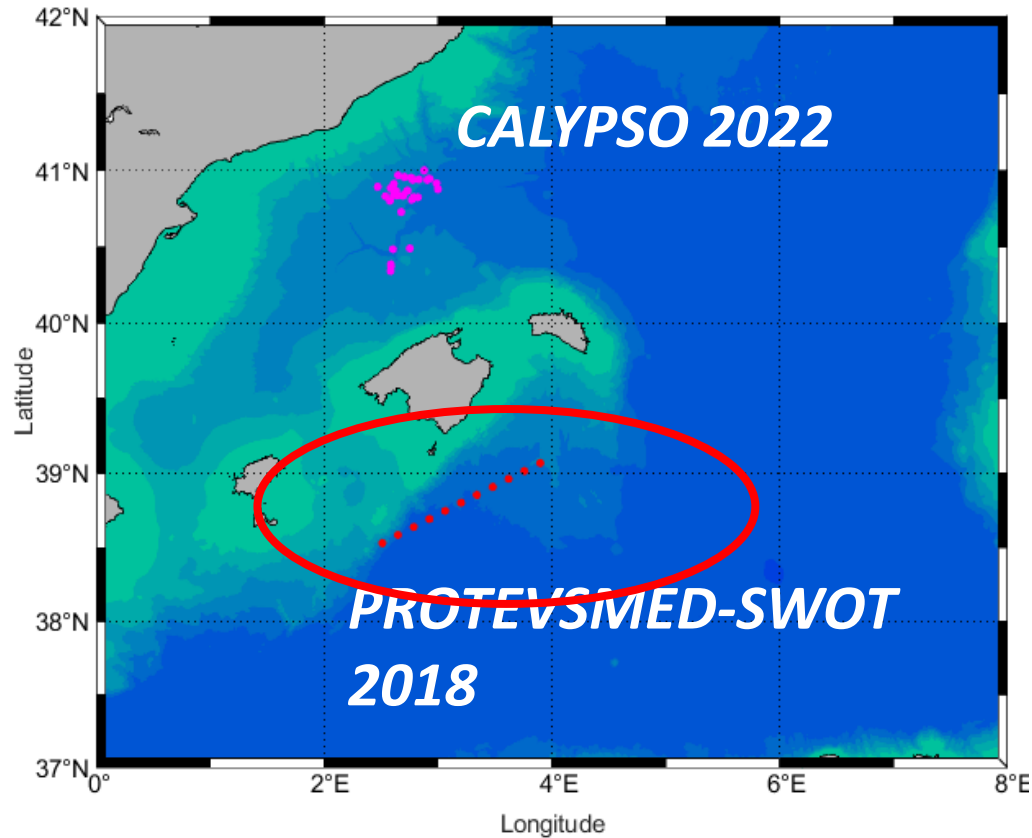


- Stratégie Lagrangienne adaptative
- Poisson tracté (Seasoar/EcoCTD)
- Analyses cytométriques sur échantillon CTD (données en sub-surface)

- *Comparaison entre 2 structures physiques différentes*

PRÉSENTATION DES CAMPAGNES

❖ 2 Campagnes autour des Îles Baléares



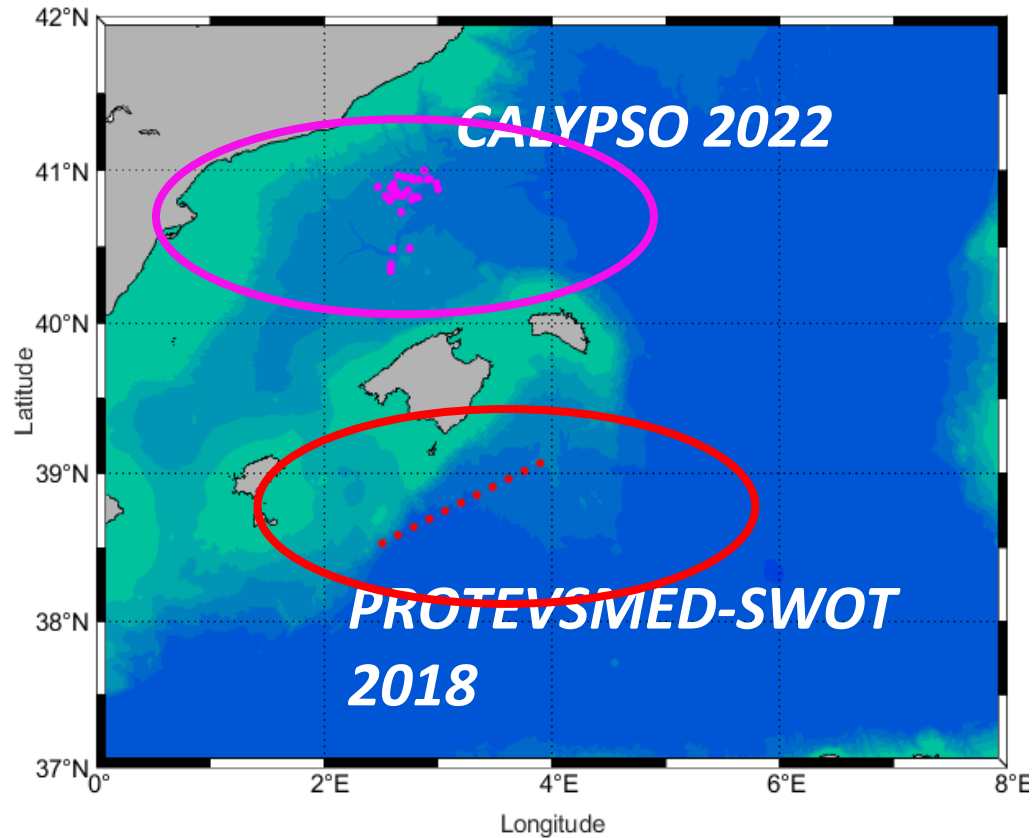
- Stratégie Lagrangienne adaptative
- Poisson tracté (Seasoar/EcoCTD)
- Analyses cytométriques sur échantillon CTD (données en sub-surface)

- *Comparaison entre 2 structures physiques différentes*

Région frontale

PRÉSENTATION DES CAMPAGNES

❖ 2 Campagnes autour des Îles Baléares



- Stratégie Lagrangienne adaptative
- Poisson tracté (Seasoar/EcoCTD)
- Analyses cytométriques sur échantillon CTD (données en sub-surface)

- *Comparaison entre 2 structures physiques différentes*

Région frontale

VS

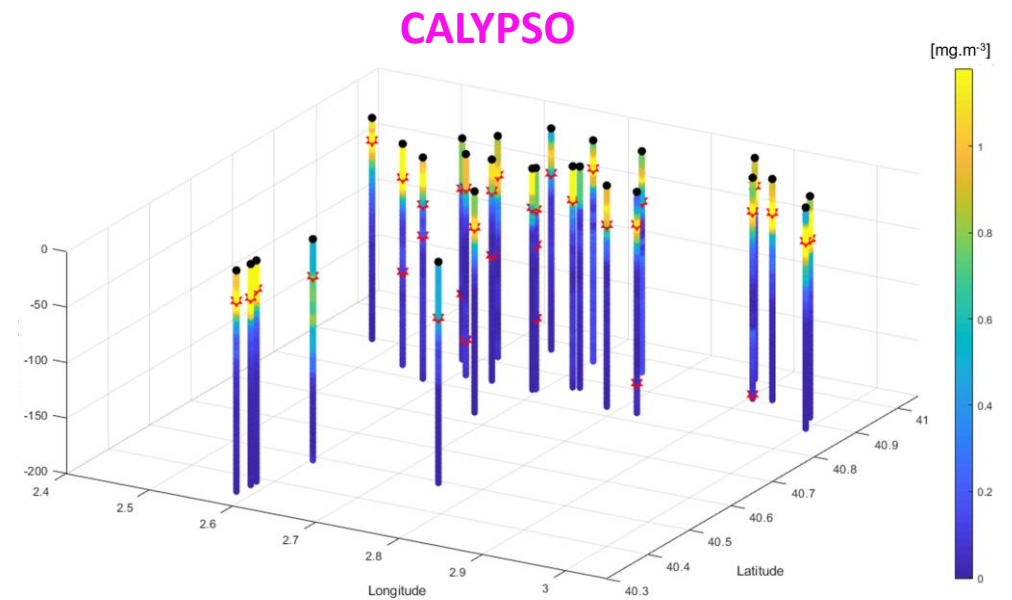
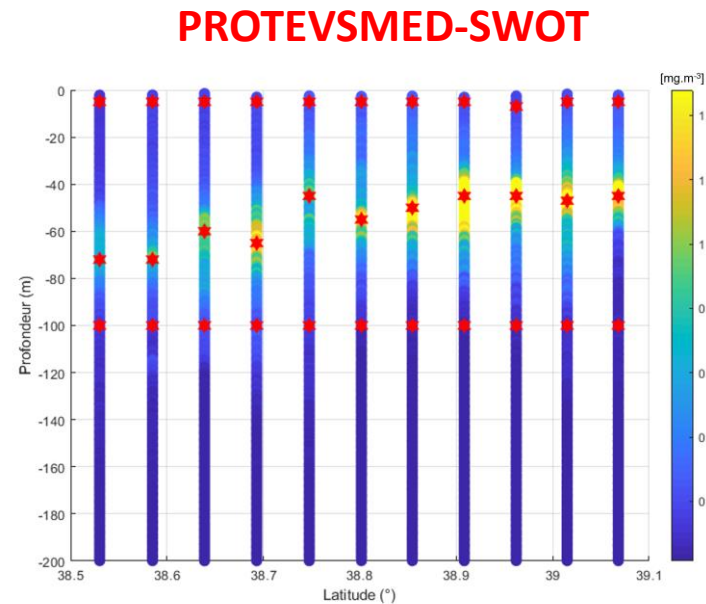
Région
tourbillonnaire

PRÉSENTATION DES CAMPAGNES

❖ Méthodes

Biologie : Identification *in situ* des régions intéressantes d'un point de vue biologique et biogéochimique

★ = Analyses
cytométriques

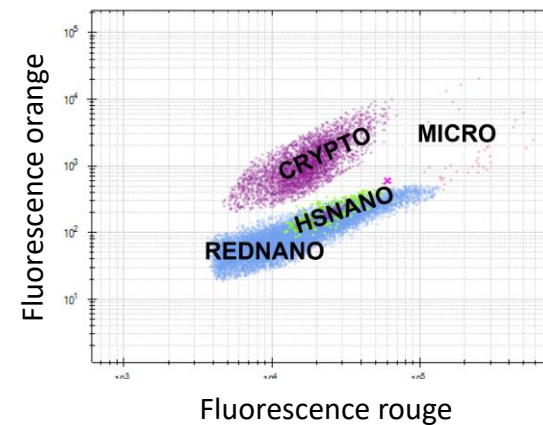
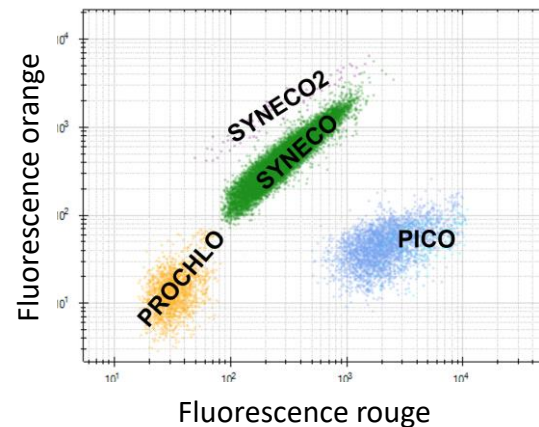
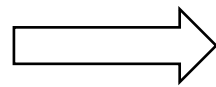
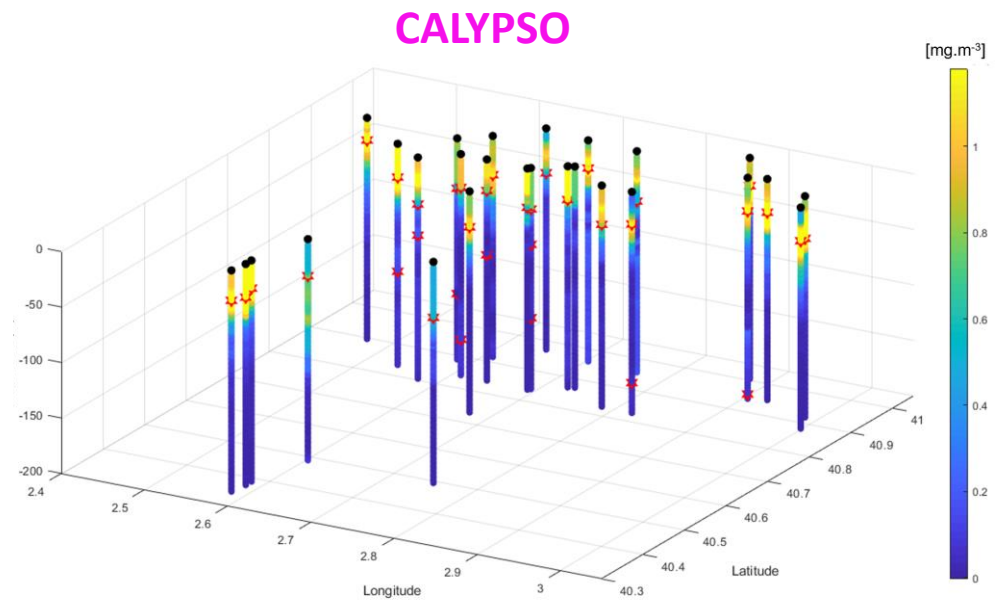
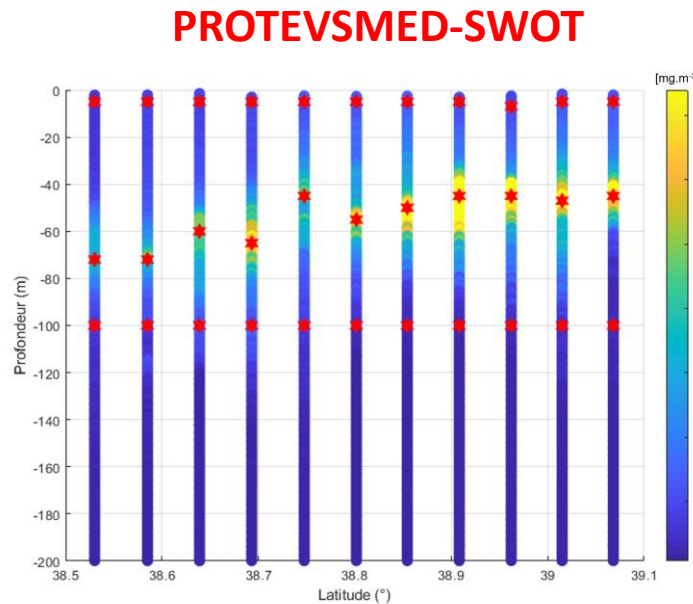
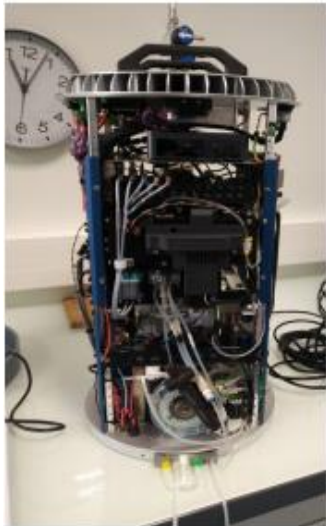


PRÉSENTATION DES CAMPAGNES

❖ Méthodes

Biologie : Identification *in situ* des régions intéressantes d'un point de vue biologique et biogéochimique

★ = Analyses
cytométriques

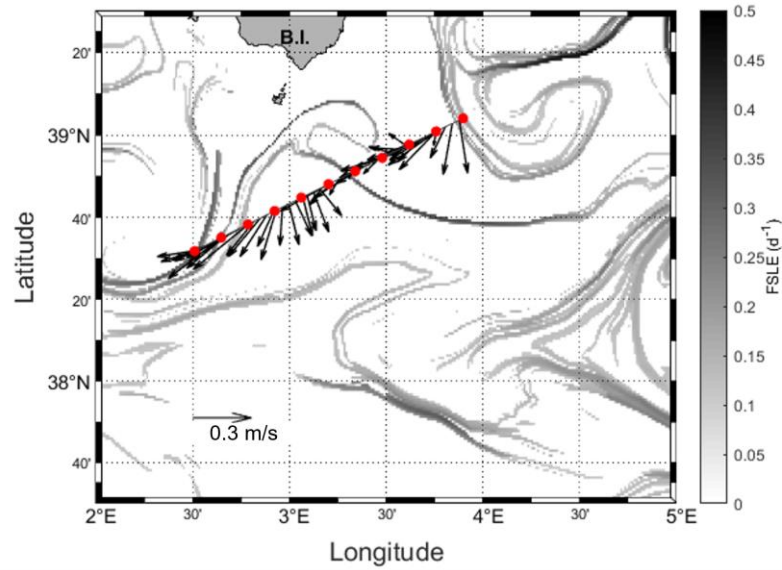


**Cytométrie en flux
automatisée**

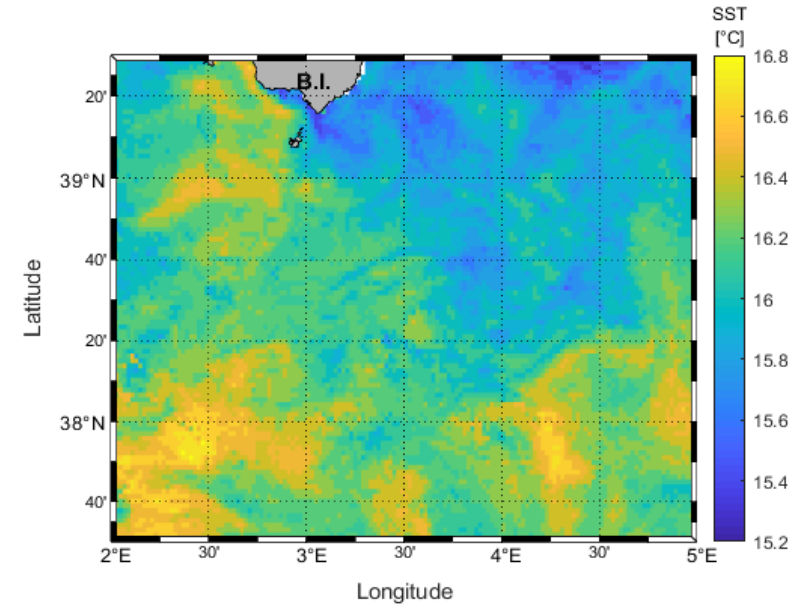
RESULTATS/DISCUSSION

Structures physiques

PROTEVSMED-SWOT



FSLEs

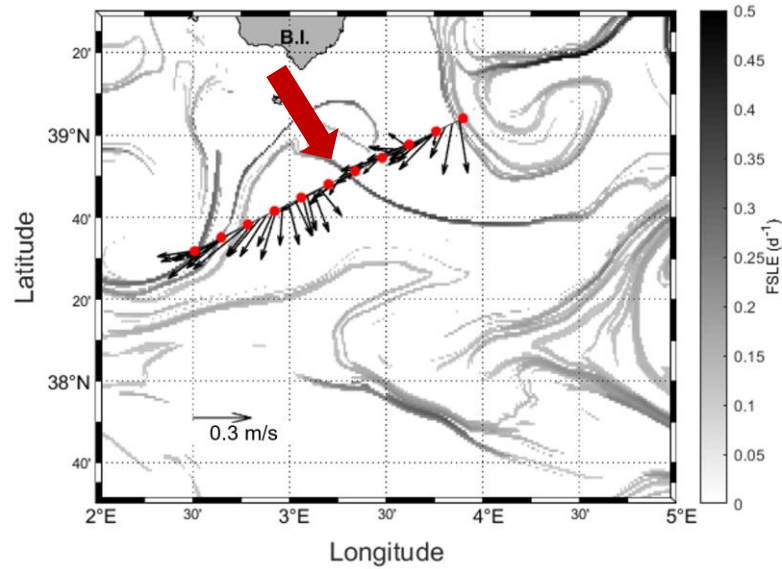


SST

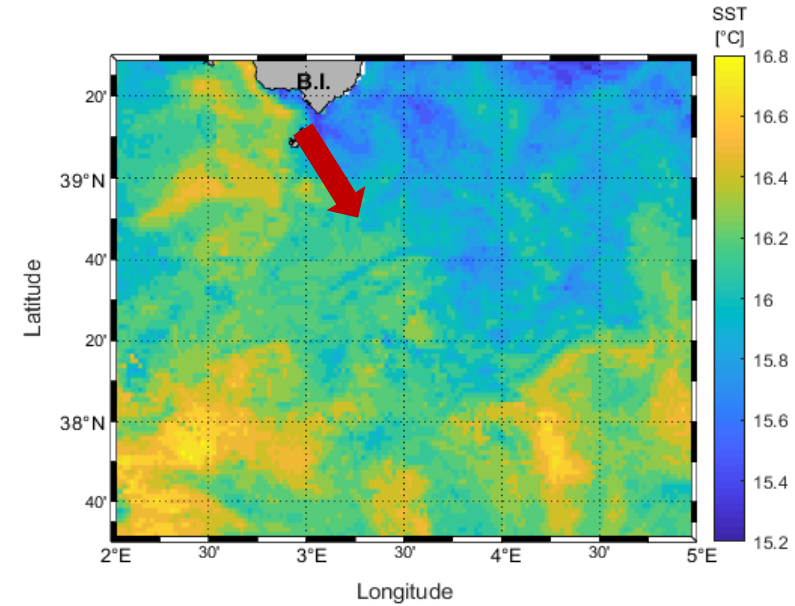
RESULTATS/DISCUSSION

Structures physiques

PROTEVSMED-SWOT



FSLEs



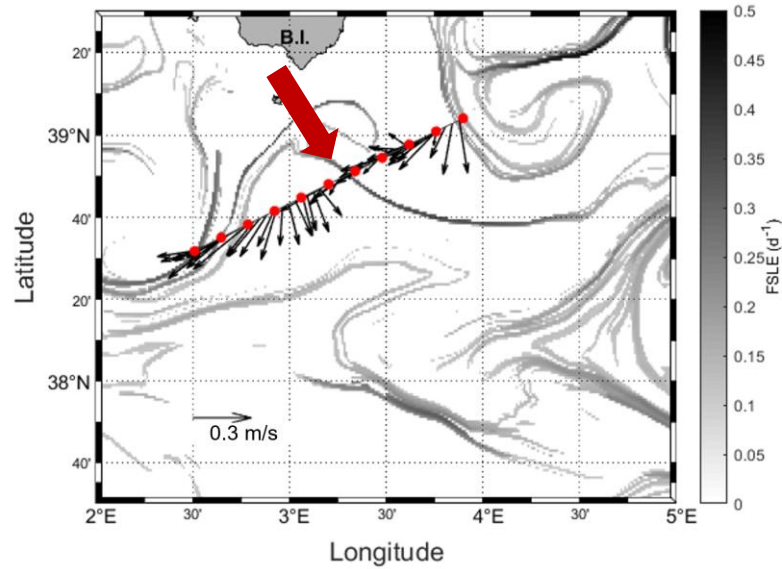
SST

- Fort FSLE
- Changements direction des courants horizontaux
- Transition entre une eau chaude et une eau froide

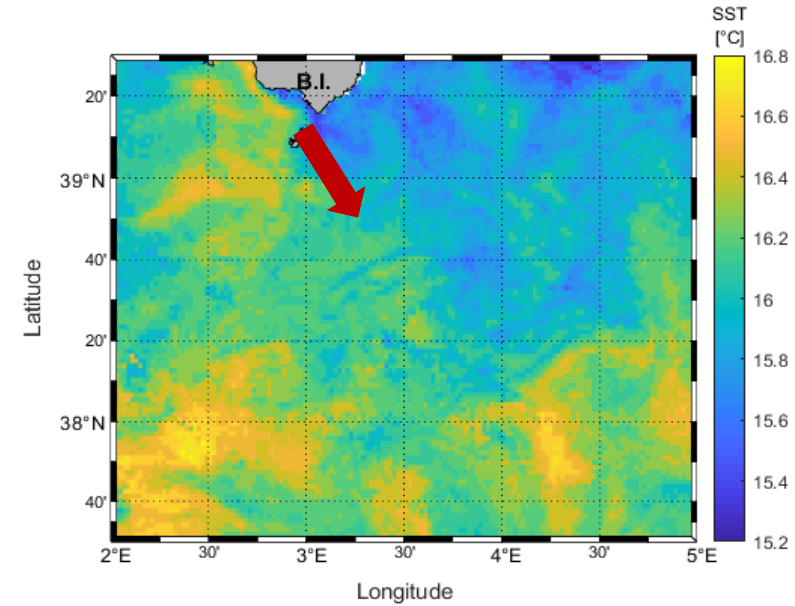
RESULTATS/DISCUSSION

Structures physiques

PROTEVSMED-SWOT



FSLEs



SST

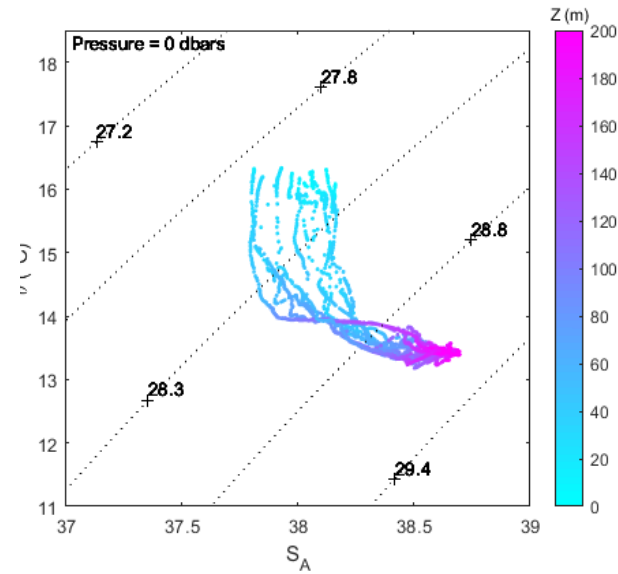
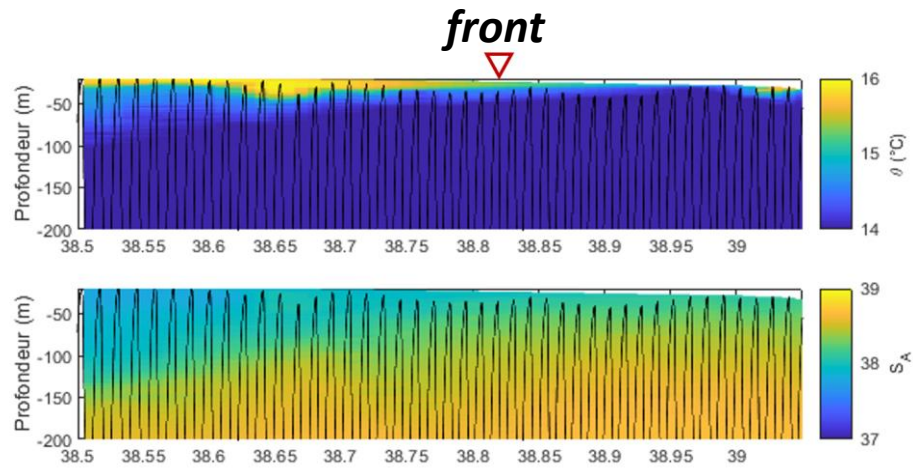
- Fort FSLE
- Changements direction des courants horizontaux
- Transition entre une eau chaude et une eau froide

Identification d'une **structure frontale**
à travers le transect

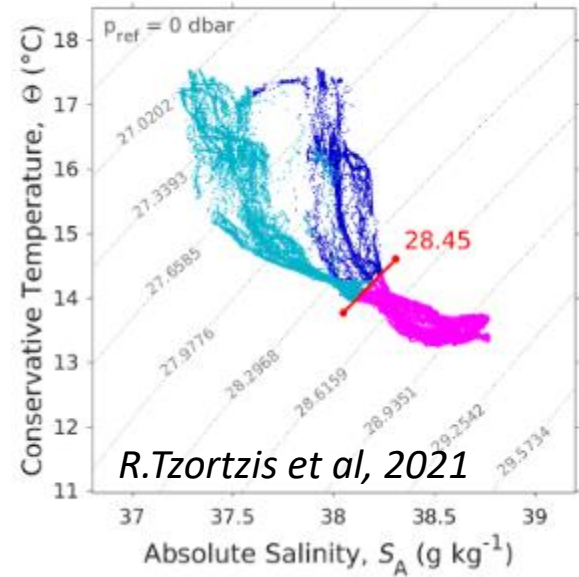
RESULTATS/DISCUSSION

Structures physiques

PROTEVSMED-SWOT



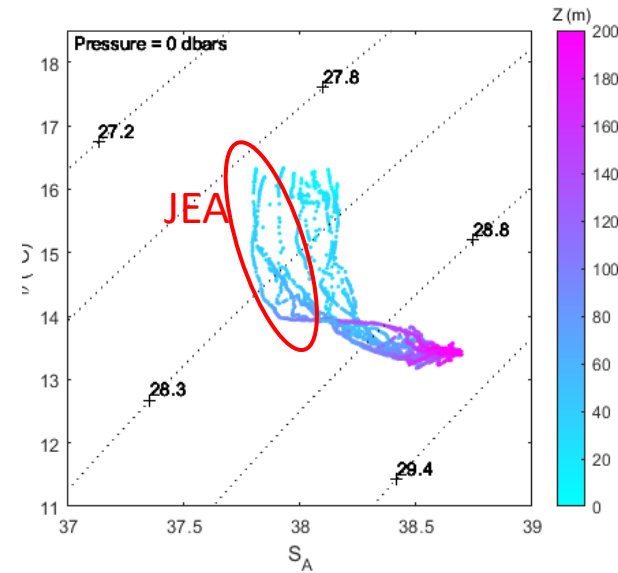
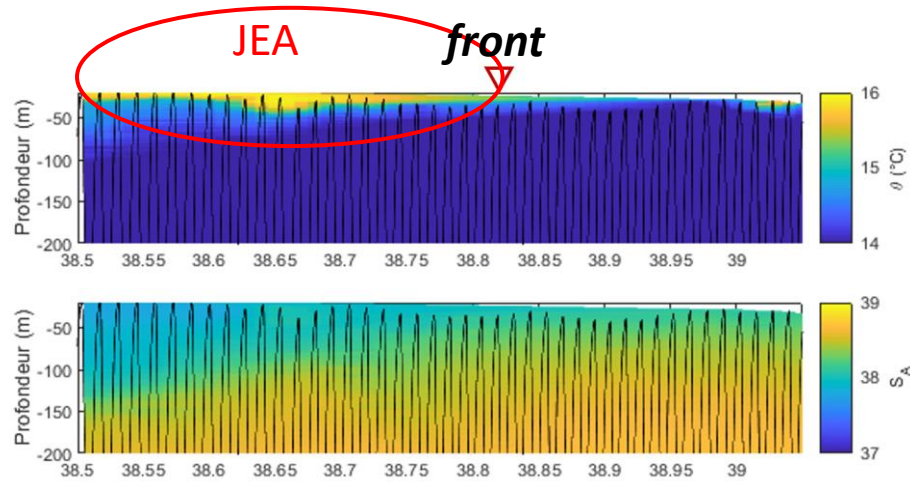
Même observation pour un autre front sud-Baléares



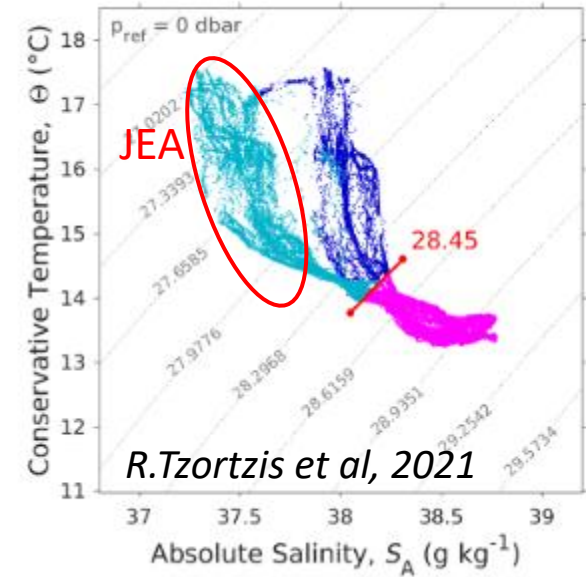
RESULTATS/DISCUSSION

Structures physiques

PROTEVSMED-SWOT



Même observation pour un autre front sud-Baléares

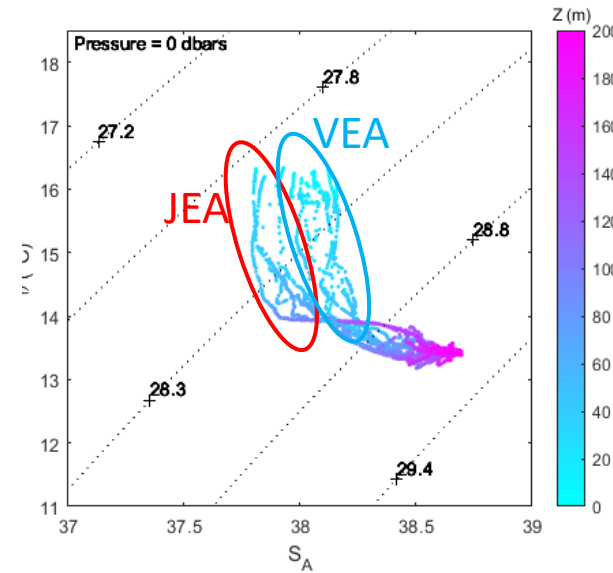
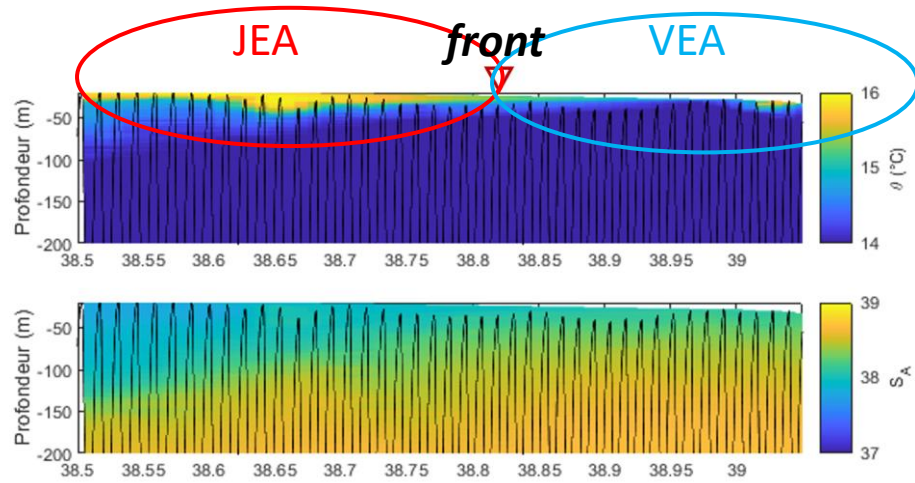


Identification de 2 masses d'eau :
Jeune Eau Atlantique (JEA)

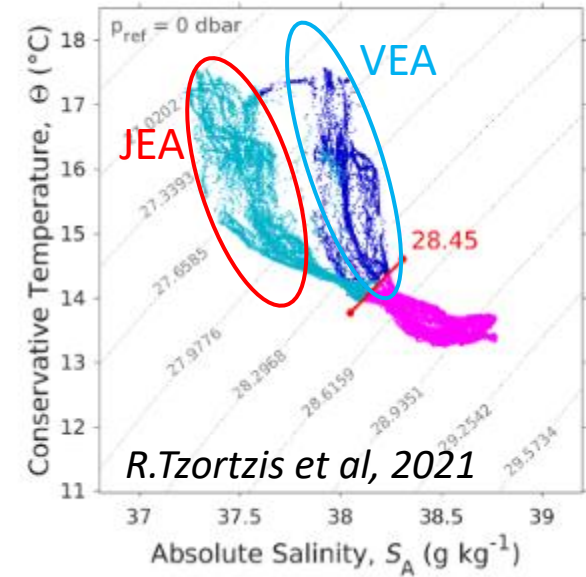
RESULTATS/DISCUSSION

Structures physiques

PROTEVSMED-SWOT



Même observation pour un autre front sud-Baléares

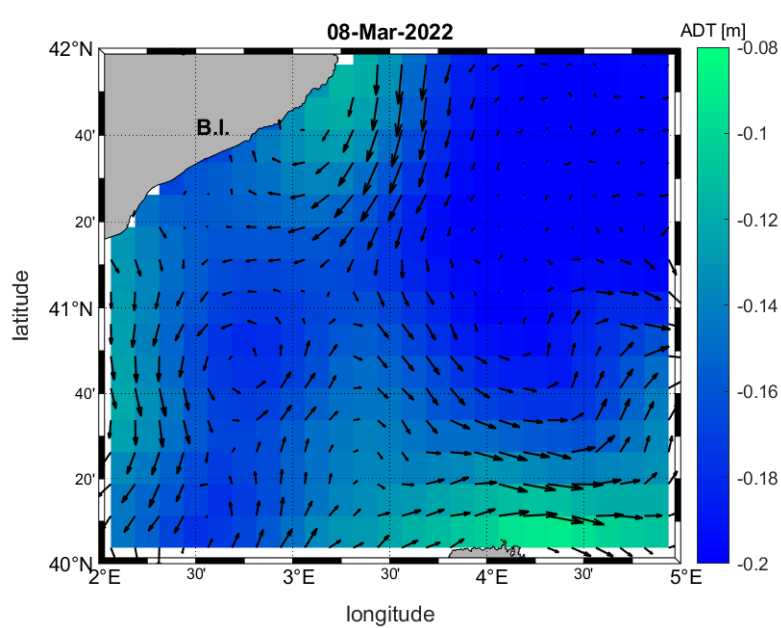


Identification de 2 masses d'eau :
Jeune Eau Atlantique (JEA)
Vieille Eau Atlantique (VEA)

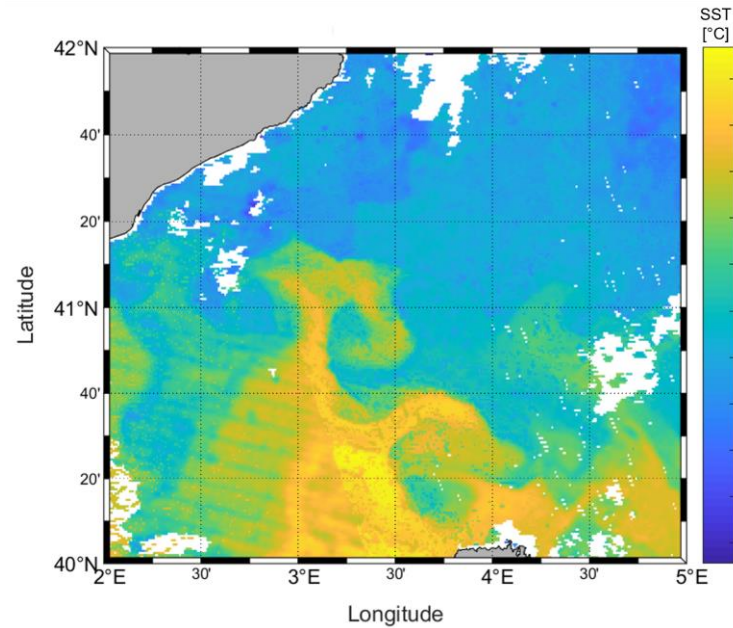
RESULTATS/DISCUSSION

Structures physiques

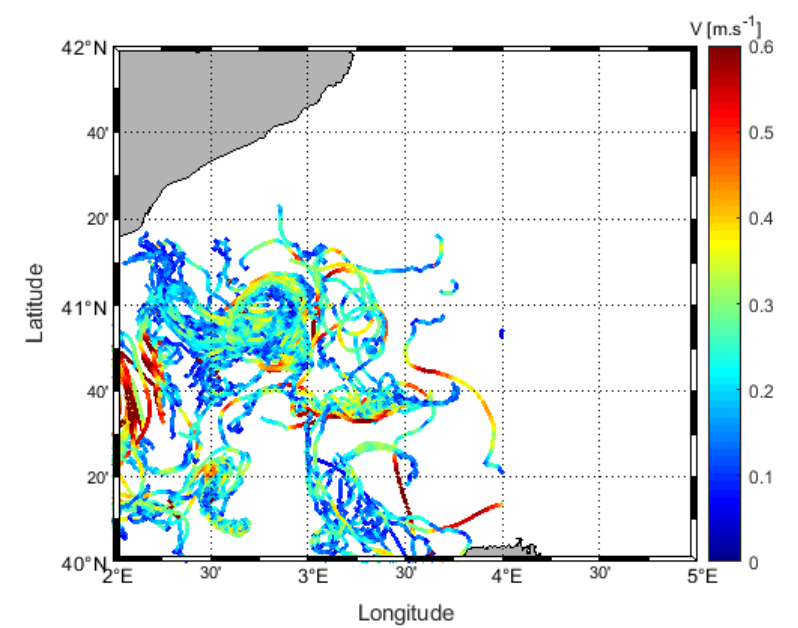
CALYPSO



Vitesse horizontale (AVISO)



SST

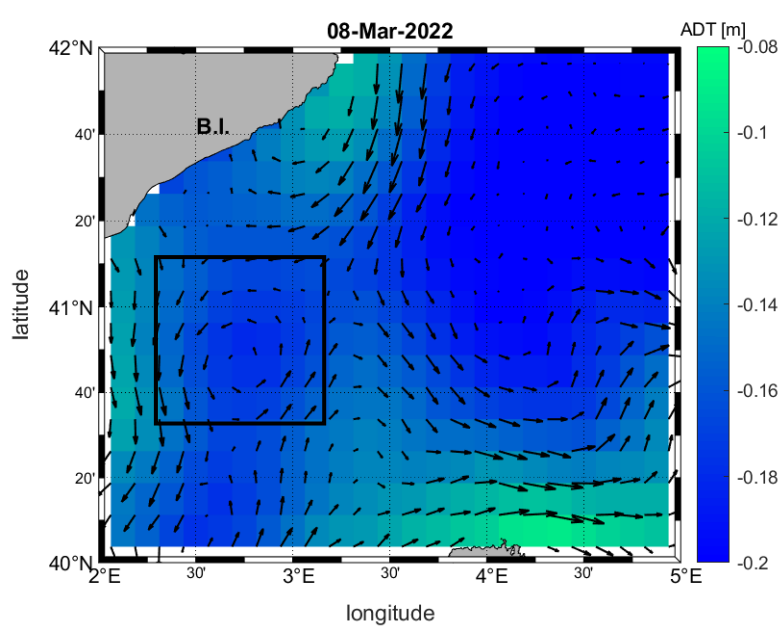


Trajectoire bouées dérivantes

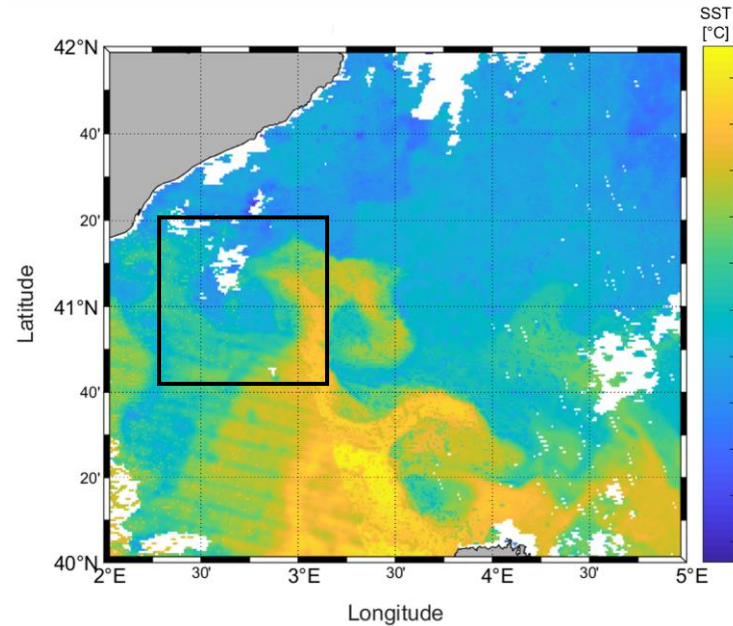
RESULTATS/DISCUSSION

Structures physiques

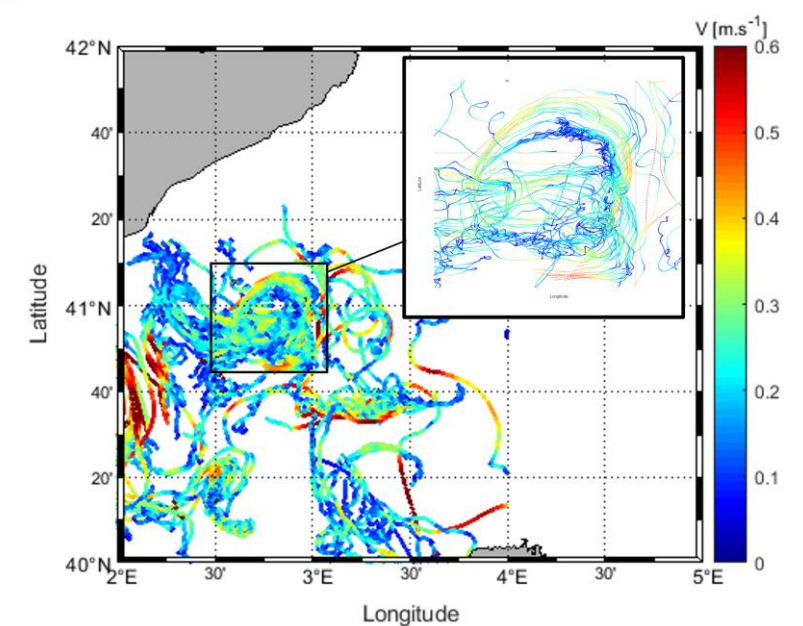
CALYPSO



Vitesse horizontale (AVISO)



SST



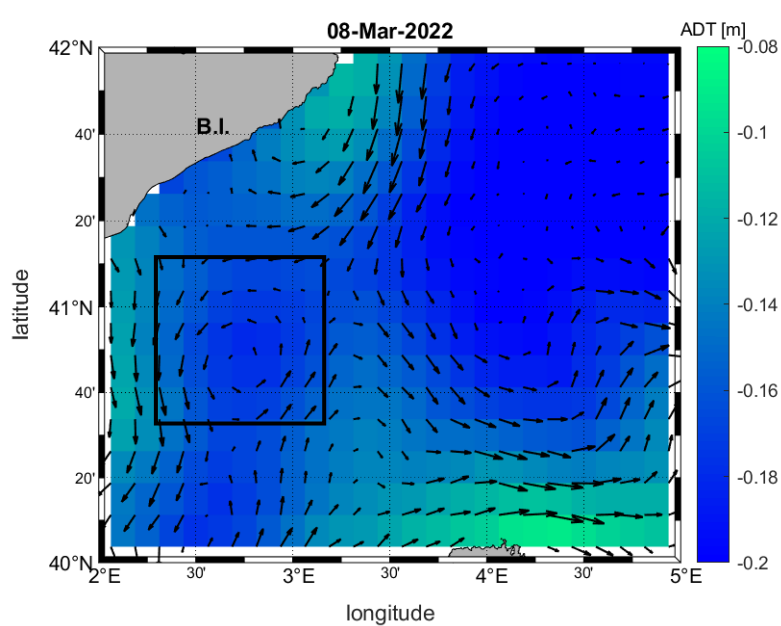
Trajectoire bouées dérivantes

- Présence d'une structure cyclonique entre le 28 février et le 12 mars
- Apport d'eau chaude venant du sud par filament

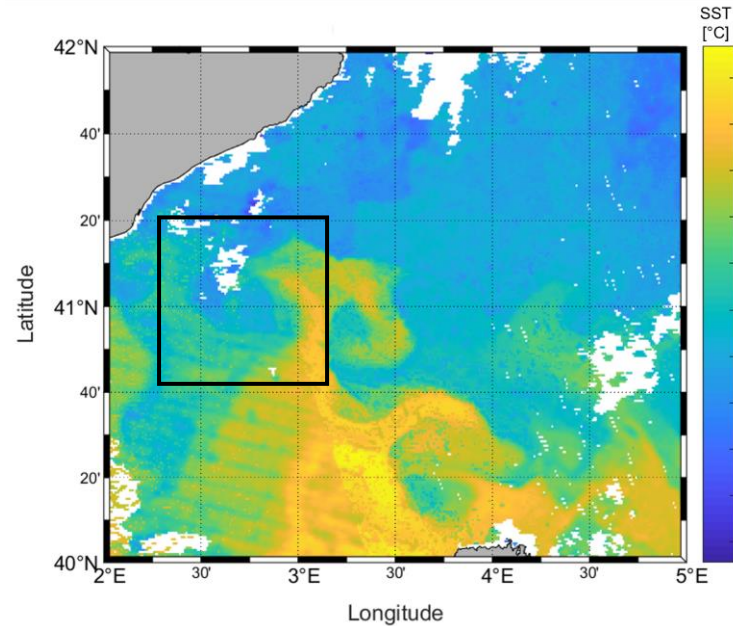
RESULTATS/DISCUSSION

Structures physiques

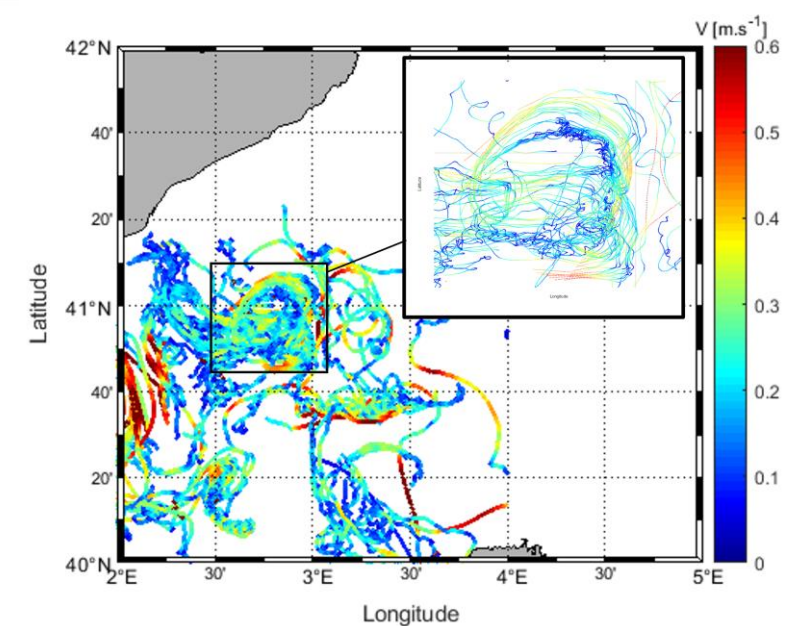
CALYPSO



Vitesse horizontale (AVISO)



SST



Trajectoire bouées dérivantes

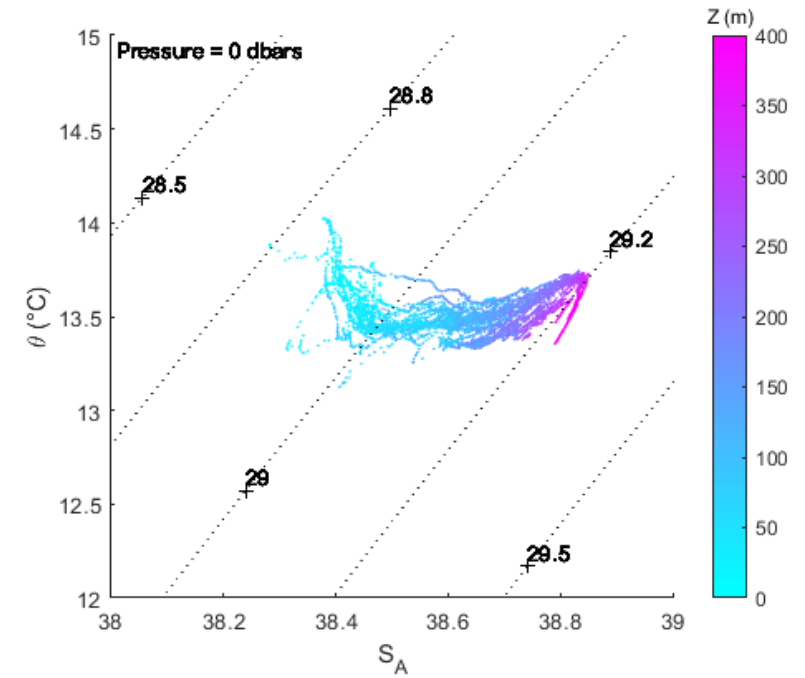
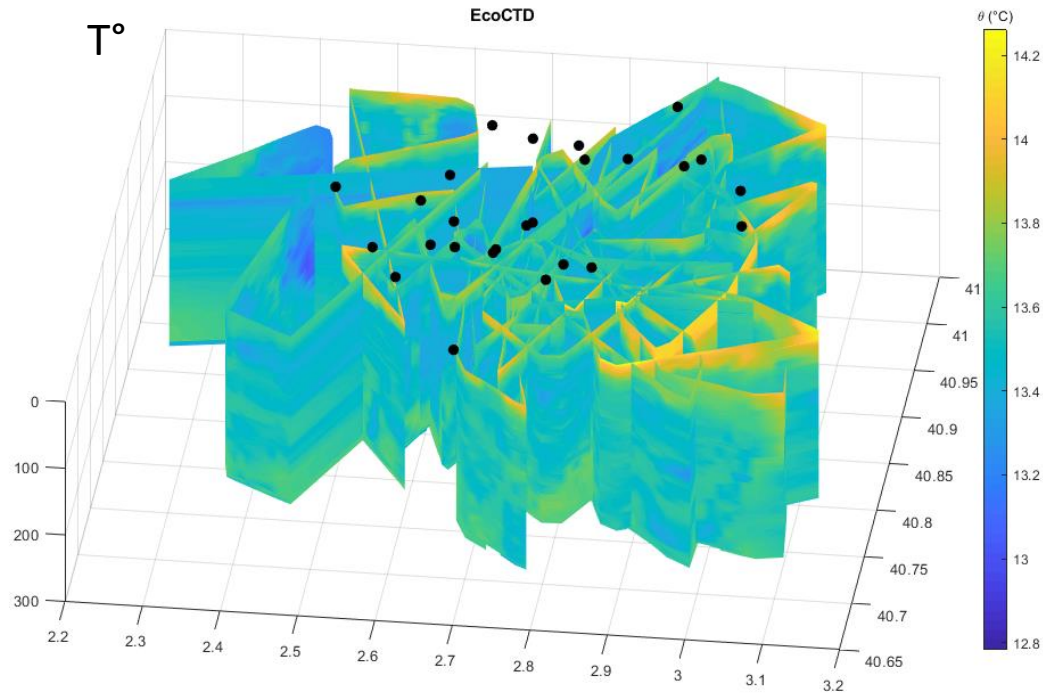
- Présence d'une structure cyclonique entre le 28 février et le 12 mars
- Apport d'eau chaude venant du sud par filament

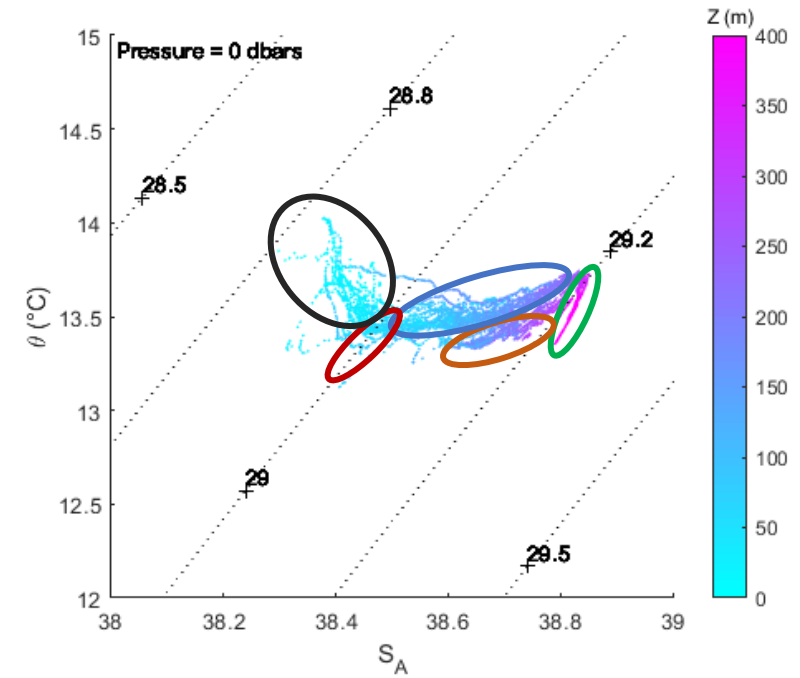
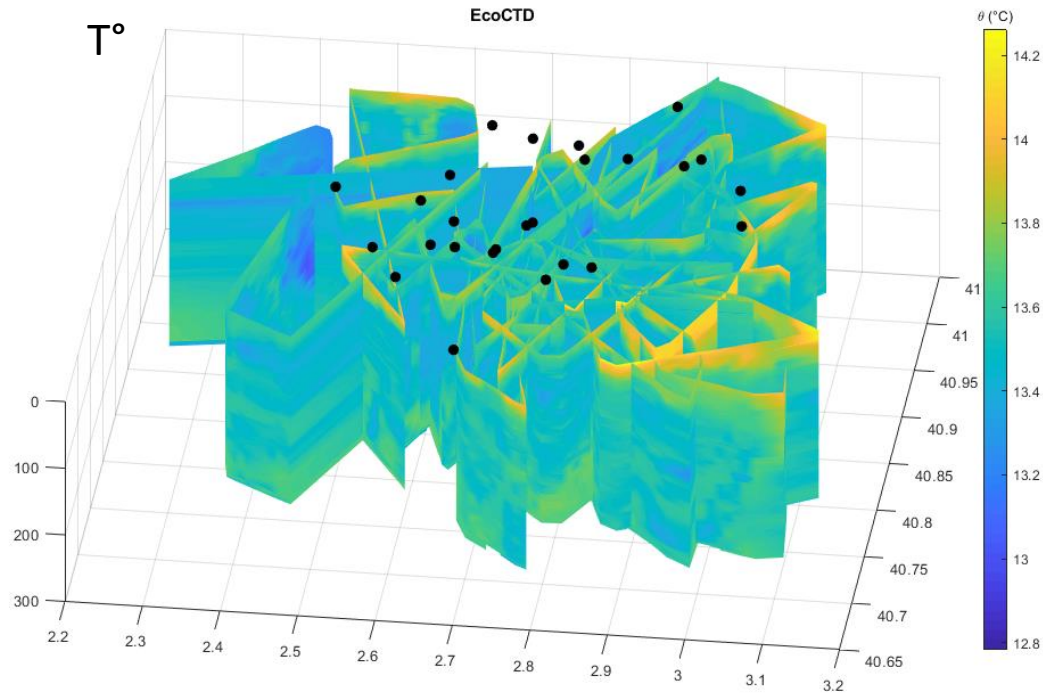
Identification d'une **structure tourbillonnaire**

RESULTATS/DISCUSSION

Structures physiques

CALYPSO





Région contrastée : rencontre de plusieurs masses d'eau

RESULTATS/DISCUSSION

Structures biologiques

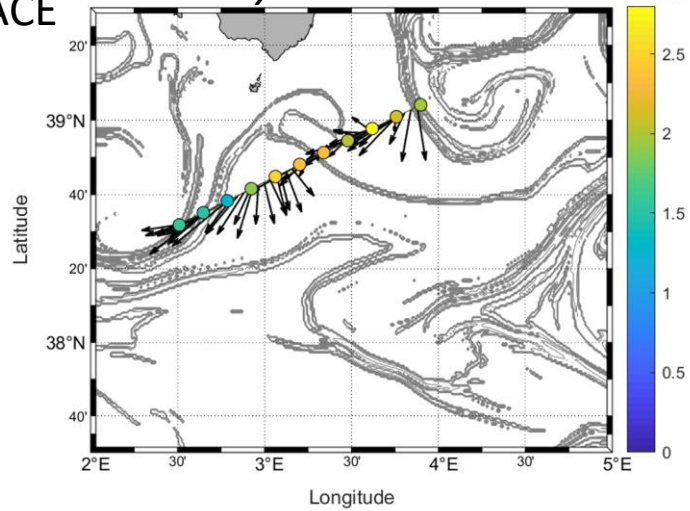
HS : High Scatter

PROTEVSMED-SWOT

synechococcus

[cells.cm⁻³]
× 10⁴

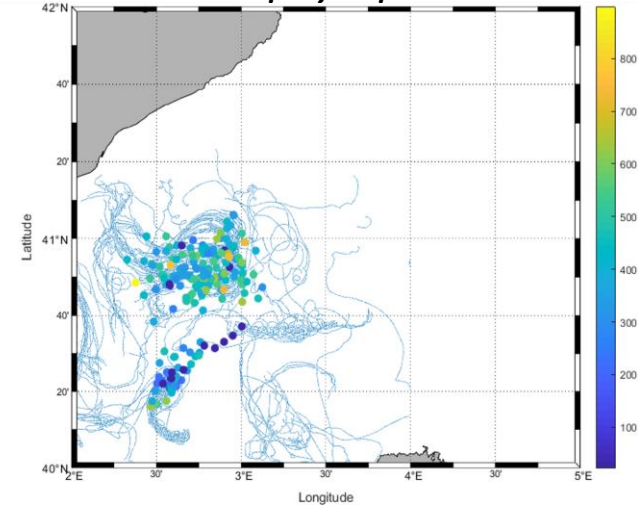
SURFACE



Répartition bimodale

CALYPSO

HS nanophytoplankton [cells.cm⁻³]



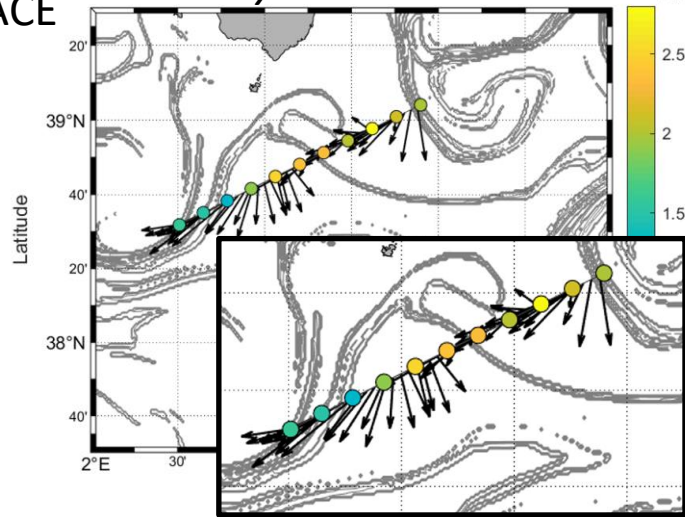
Répartition en mosaïque

PROTEVSMED-SWOT

synechococcus

[cells.cm⁻³]
× 10⁴

SURFACE

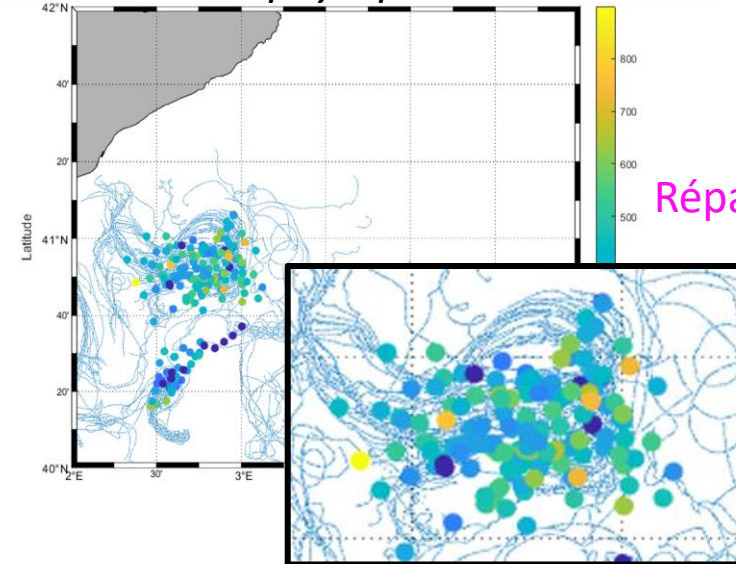


Répartition bimodale

CALYPSO

HS nanophytoplankton

[cells.cm⁻³]



Répartition en mosaïque

RESULTATS/DISCUSSION

Structures biologiques

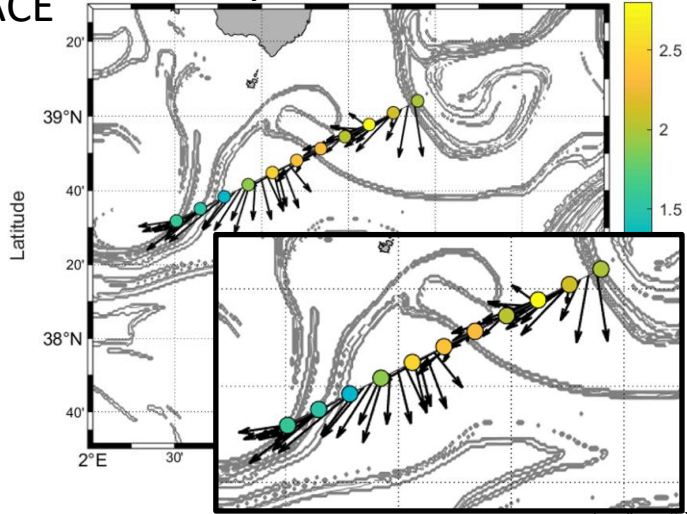
HS : High Scatter

PROTEVSMED-SWOT

synechococcus

[cells.cm⁻³]
× 10⁴

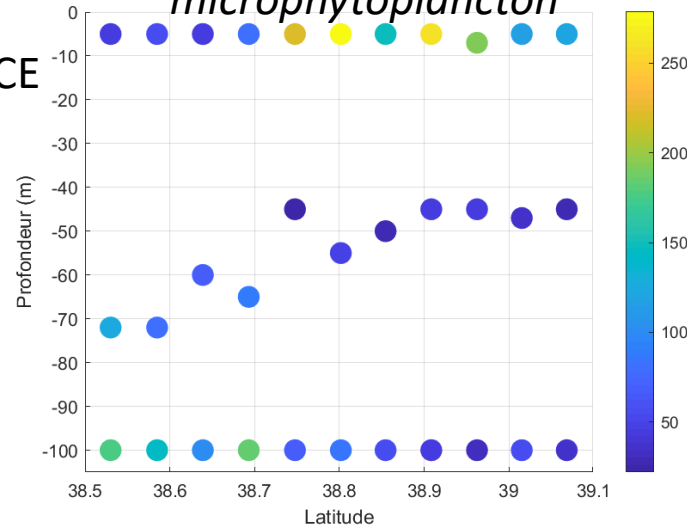
SURFACE



Répartition bimodale

SUB-SURFACE

microphytoplankton

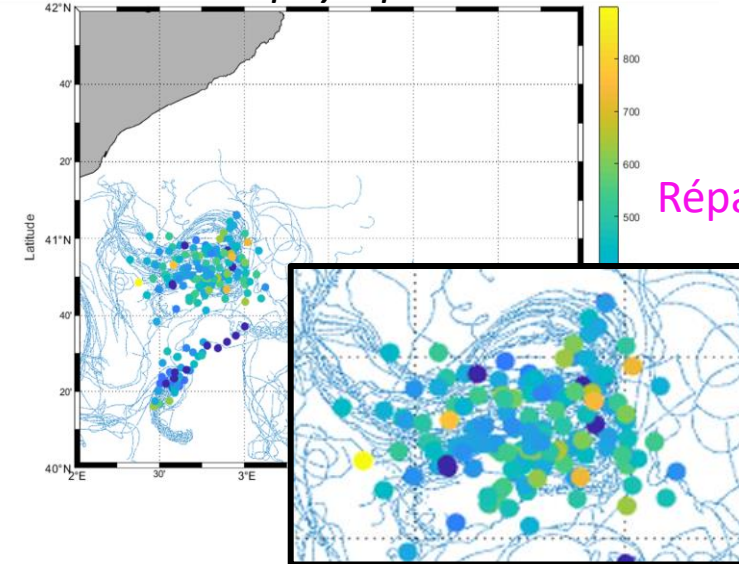


Répartition bimodale

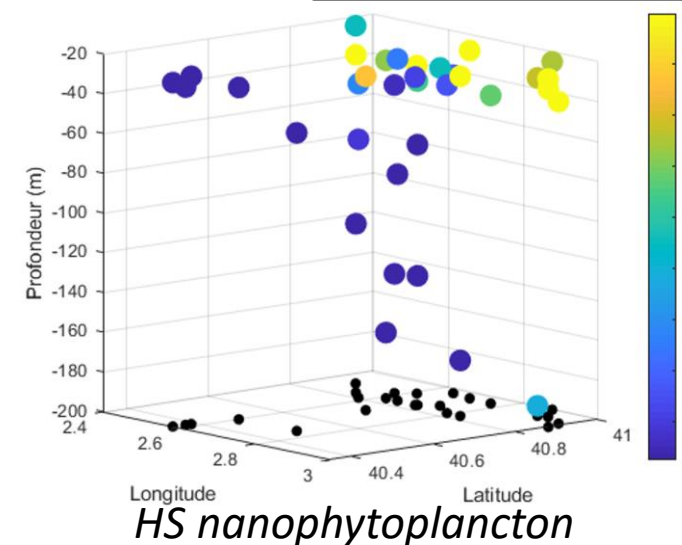
CALYPSO

HS nanophytoplankton

[cells.cm⁻³]



Répartition en mosaïque



Répartition en mosaïque

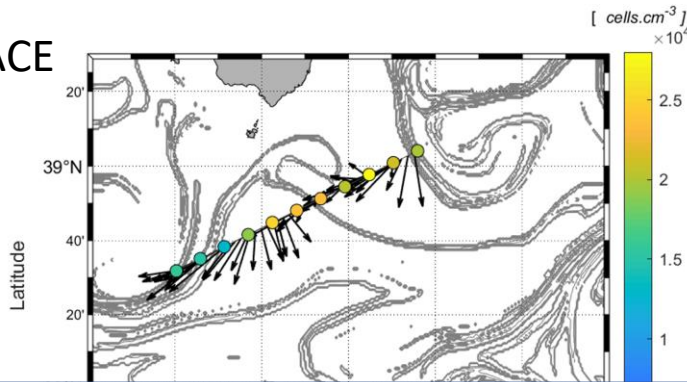
RESULTATS/DISCUSSION

Structures biologiques

HS : High Scatter

PROTEVSMED-SWOT

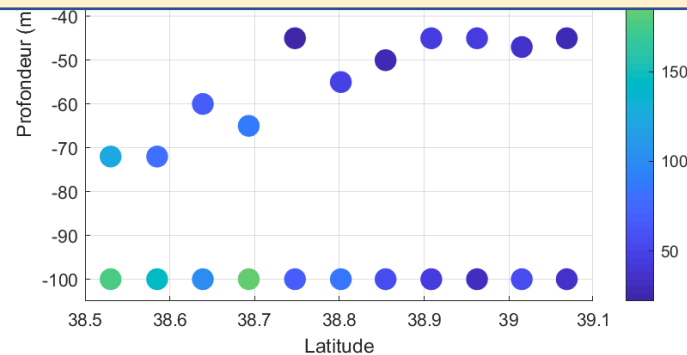
SURFACE



Répartition bimodale

EN PROFONDEUR

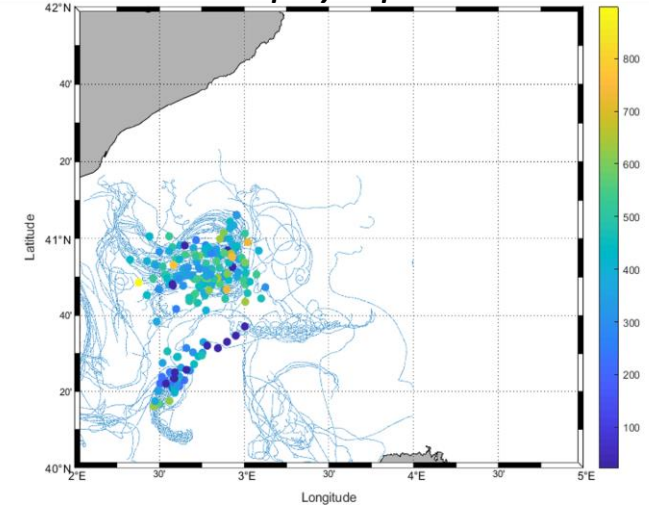
Front en séparant 2 masses d'eau au caractéristiques différentes sépare les groupes phytoplanctoniques



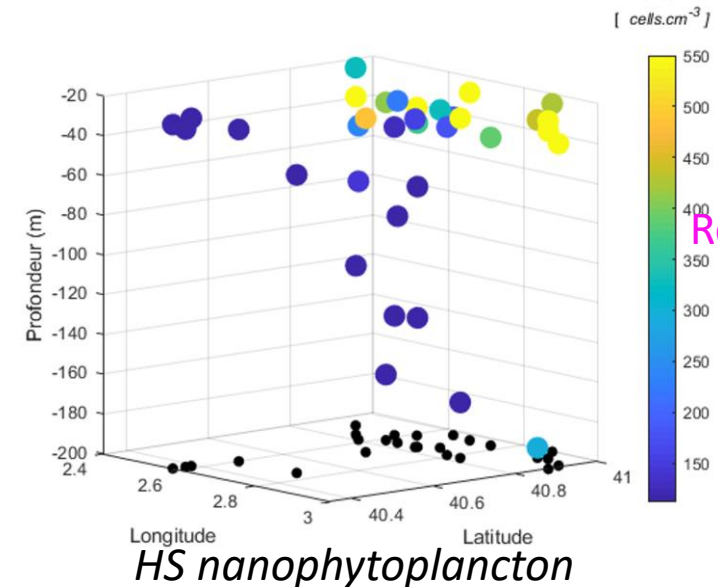
Répartition bimodale

CALYPSO

HS nanophytoplankton [cells.cm⁻³]



Répartition en mosaïque



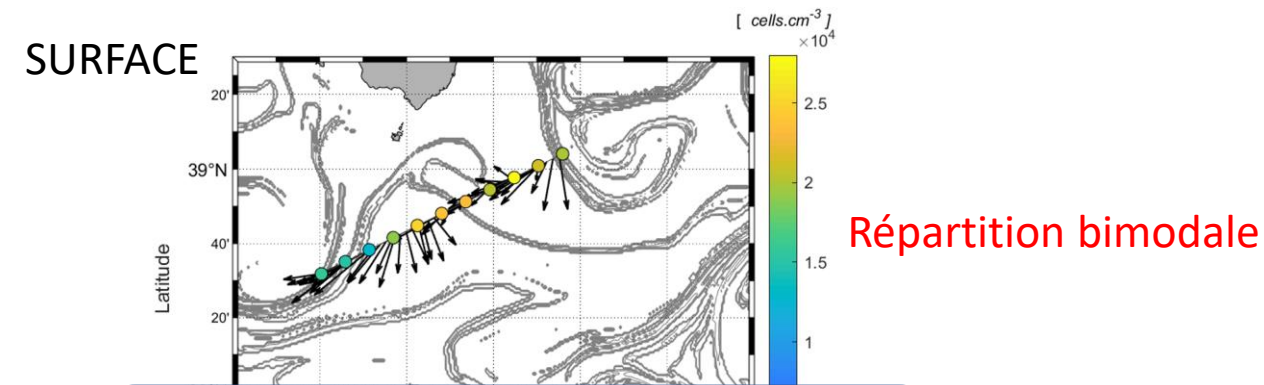
Répartition en mosaïque

RESULTATS/DISCUSSION

Structures biologiques

HS : High Scatter

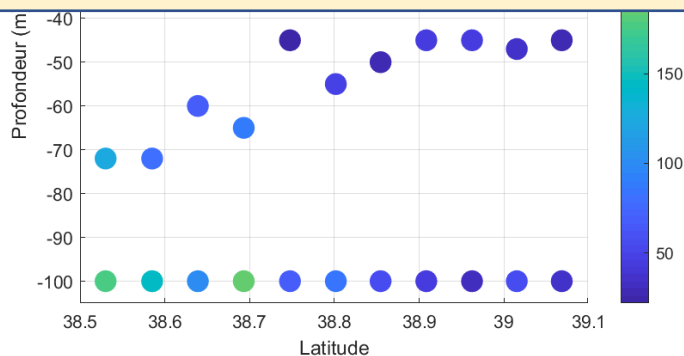
PROTEVSMED-SWOT



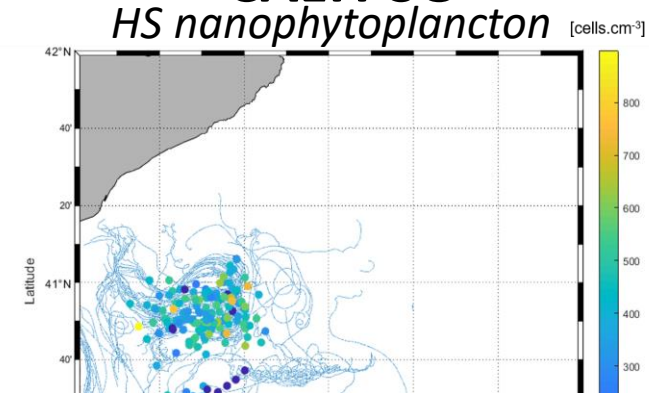
EN PROFONDEUR

Front en séparant 2 masses d'eau aux caractéristiques différentes sépare les groupes phytoplanctoniques

SURFACE
SURFACE

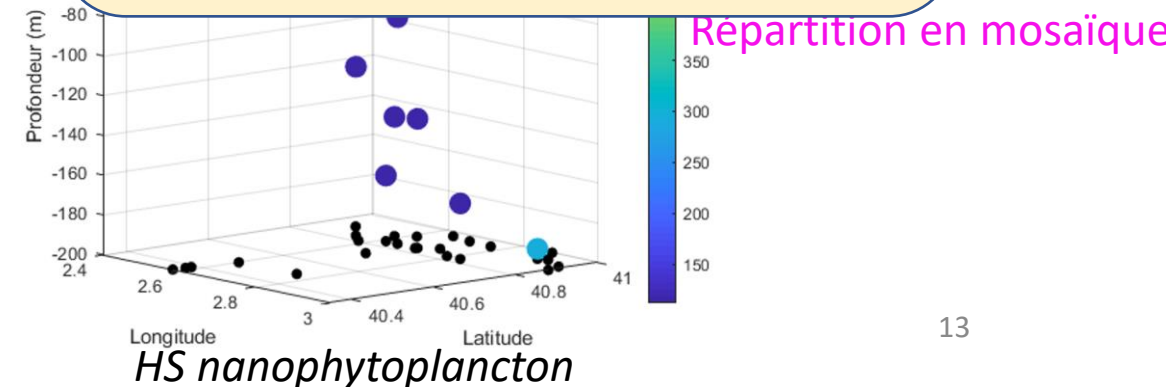


CALYPSO



EN PROFONDEUR

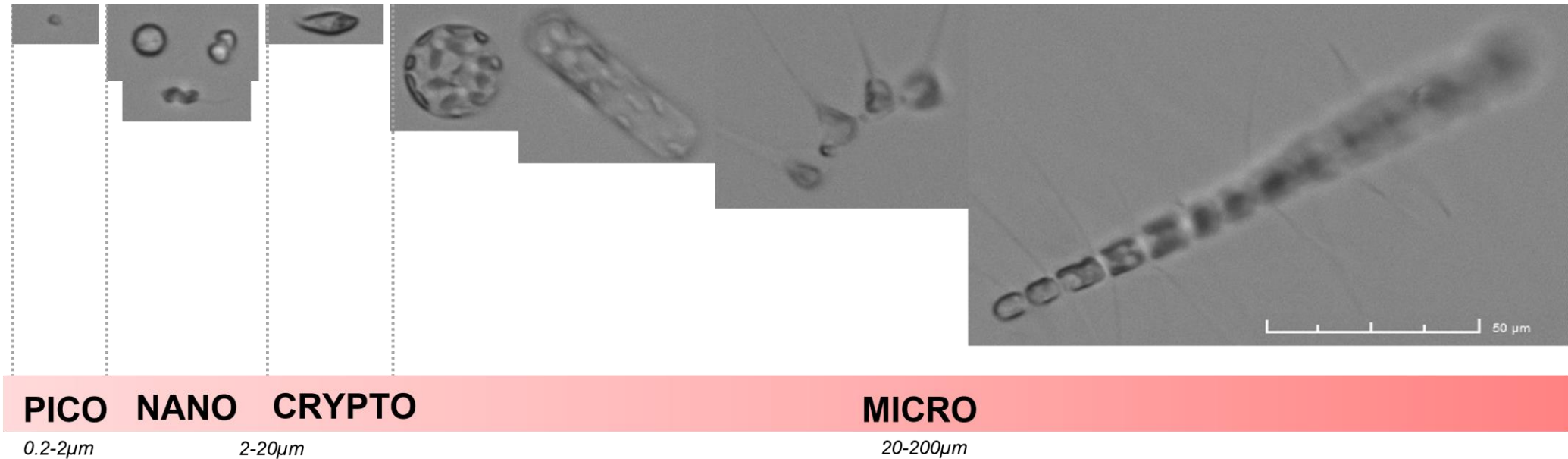
Tourbillon en entraînant différentes masses d'eau entraîne aussi les groupes phytoplanctoniques



RESULTATS/DISCUSSION

Formation de couches
phytoplanctoniques profondes

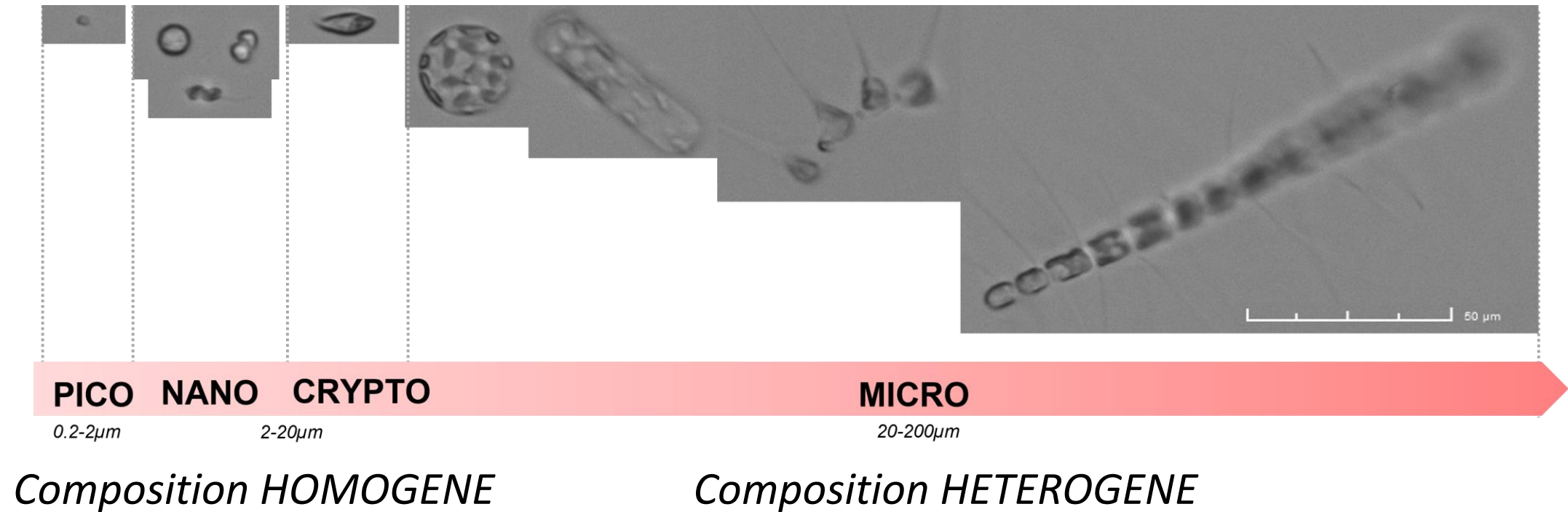
CALYPSO



RESULTATS/DISCUSSION

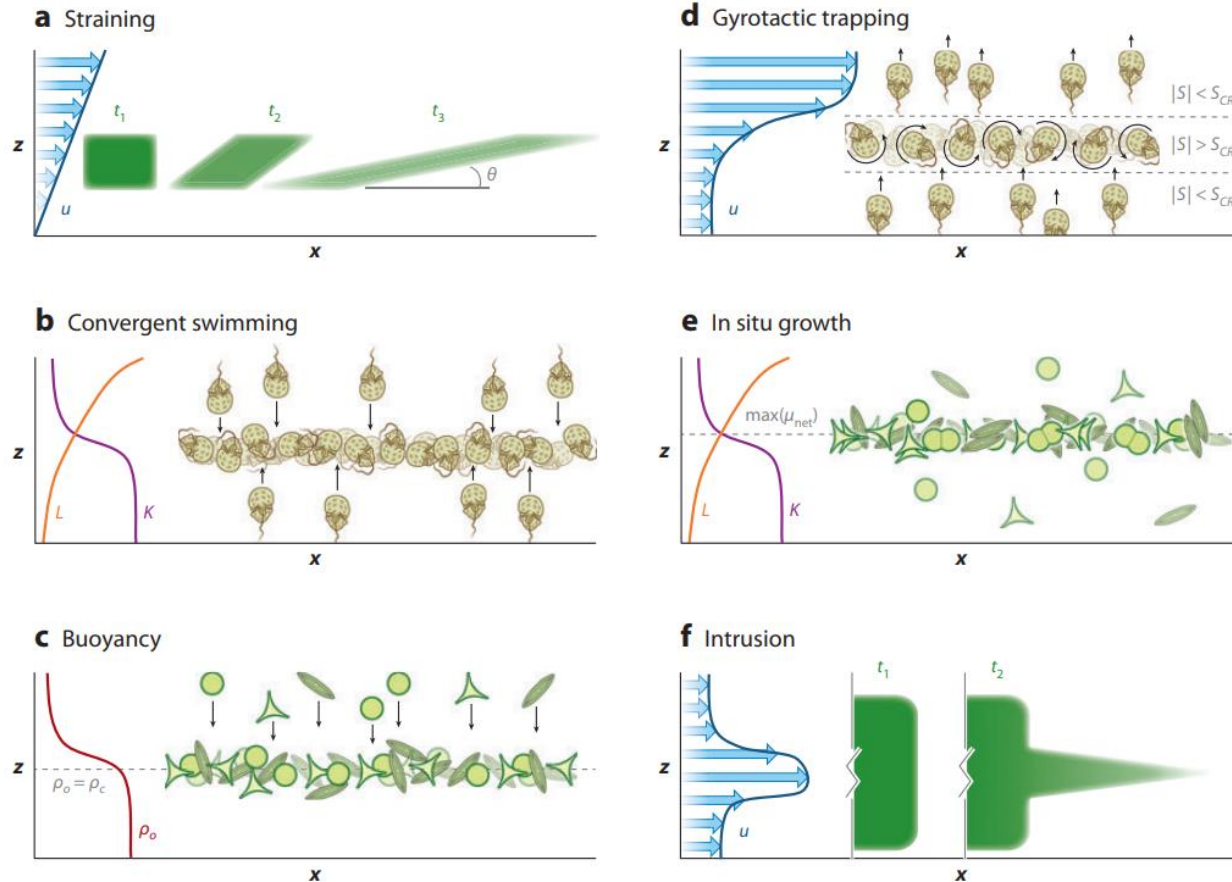
Formation de couches
phytoplanctoniques profondes

CALYPSO



Formation de couches phytoplanctoniques profondes

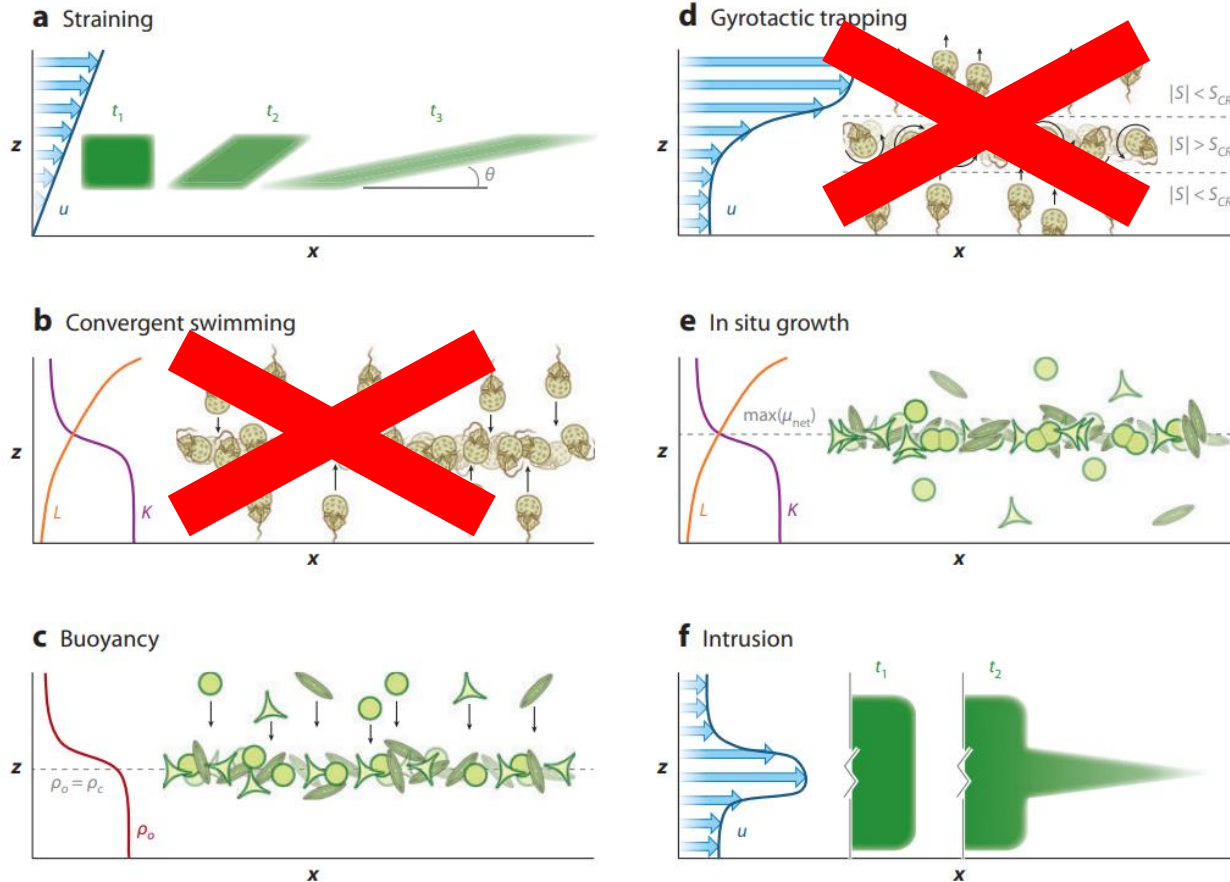
CALYPSO



Scénarios hypothétiques basés sur
l'environnement physique et le
comportement des cellules

Formation de couches phytoplanctoniques profondes

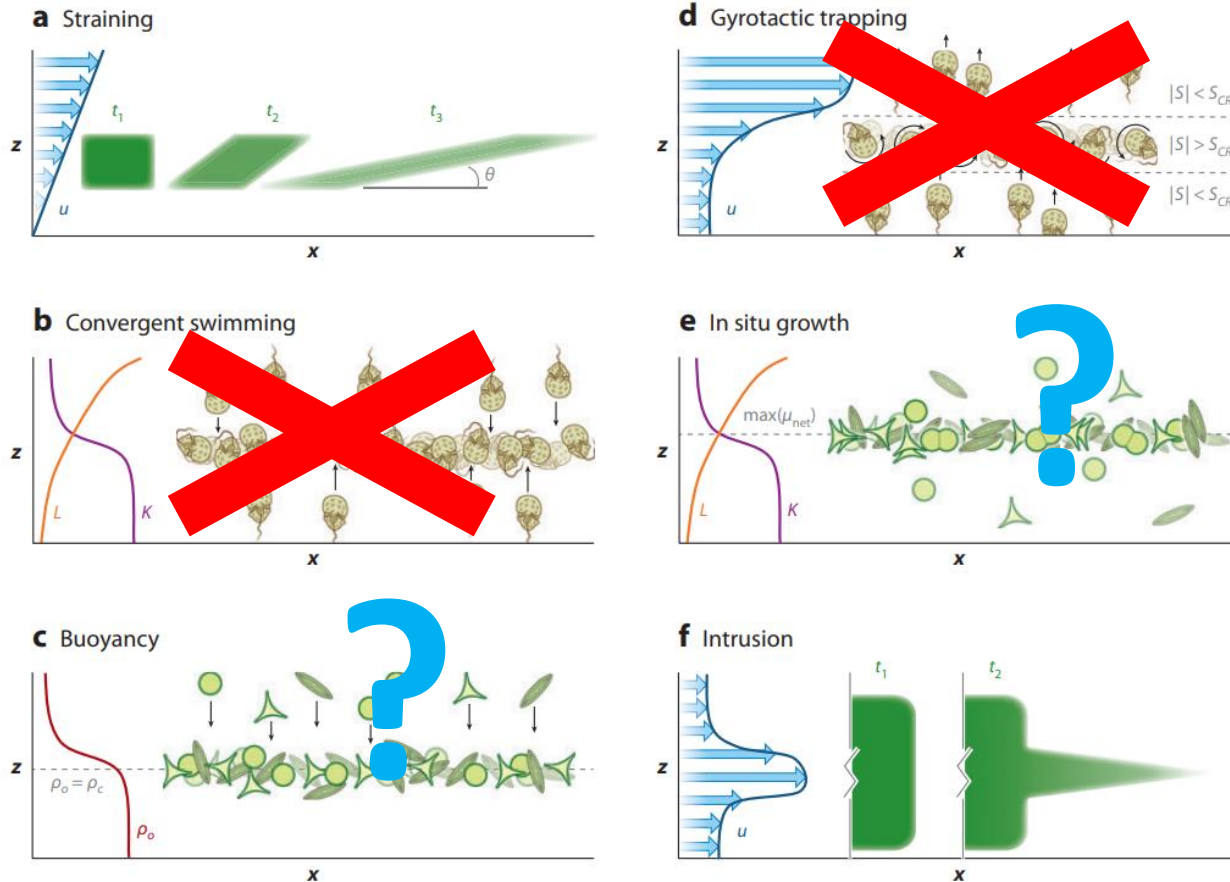
CALYPSO



- Pas de cellules possédant d'organes moteurs **x**

Formation de couches phytoplanctoniques profondes

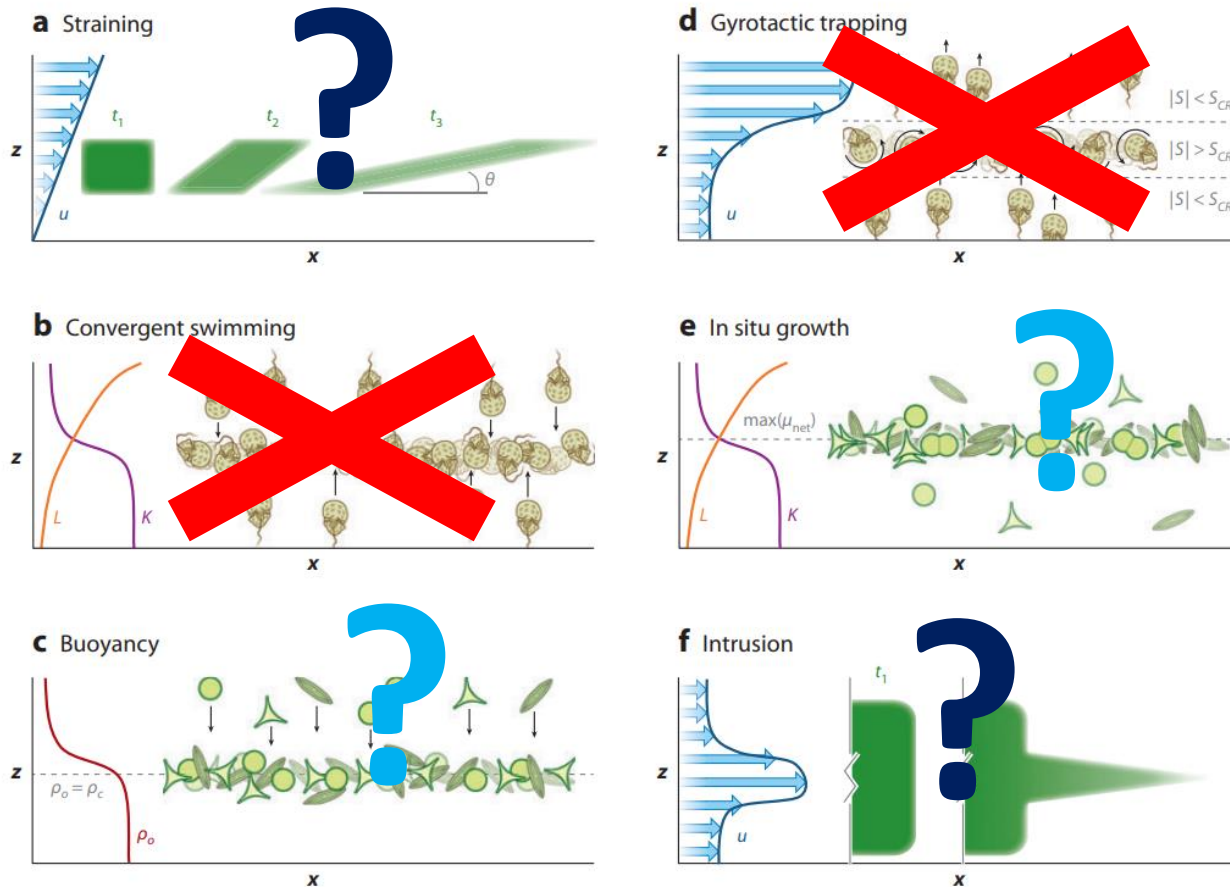
CALYPSO



- Pas de cellules possédant d'organes moteurs **x**
- Présence de diatomées : capable d'adapter leur flottabilité **?**

Formation de couches phytoplanctoniques profondes

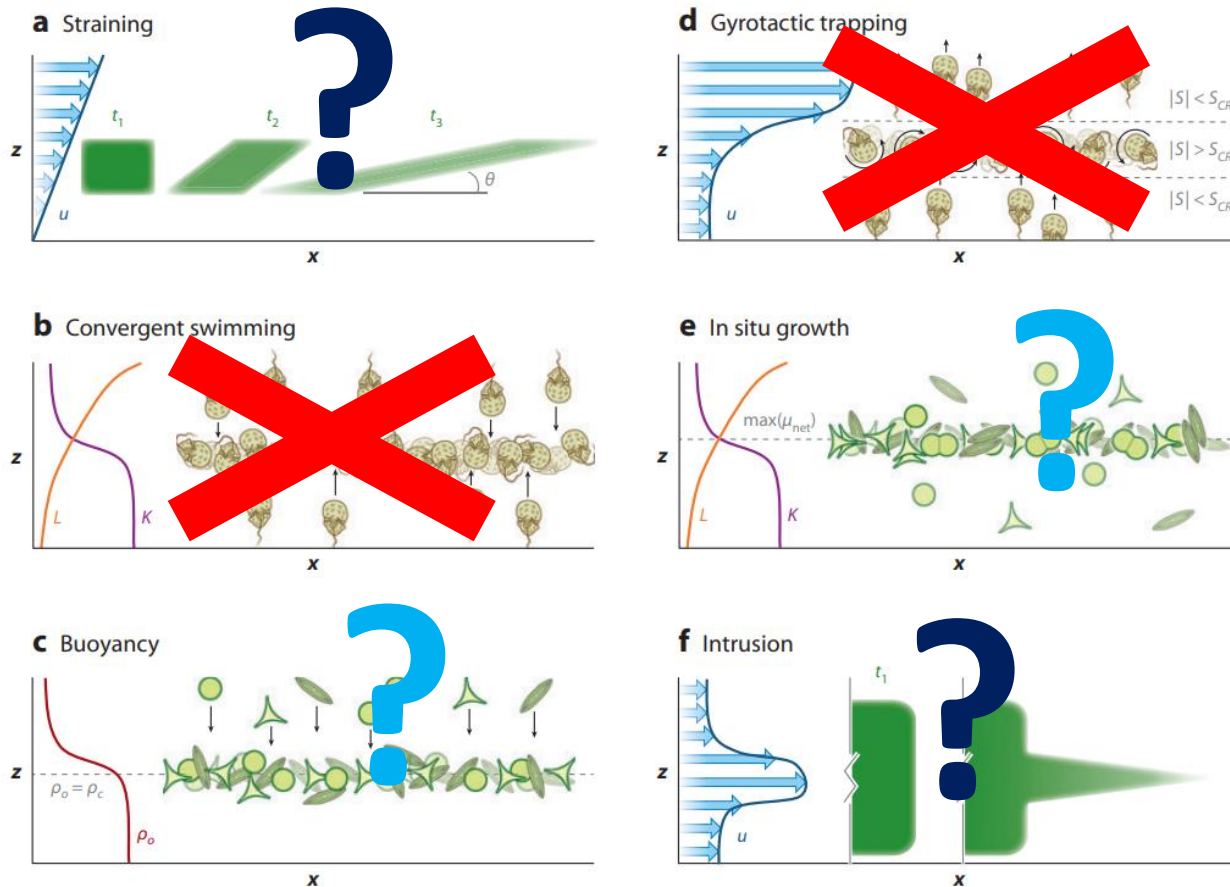
CALYPSO



- Pas de cellules possédant d'organes moteurs **x**
- Présence de diatomées : capable d'adapter leur flottabilité **?**
- Présence de cellules soumise au mouvement de l'eau **?**

Formation de couches phytoplanctoniques profondes

CALYPSO



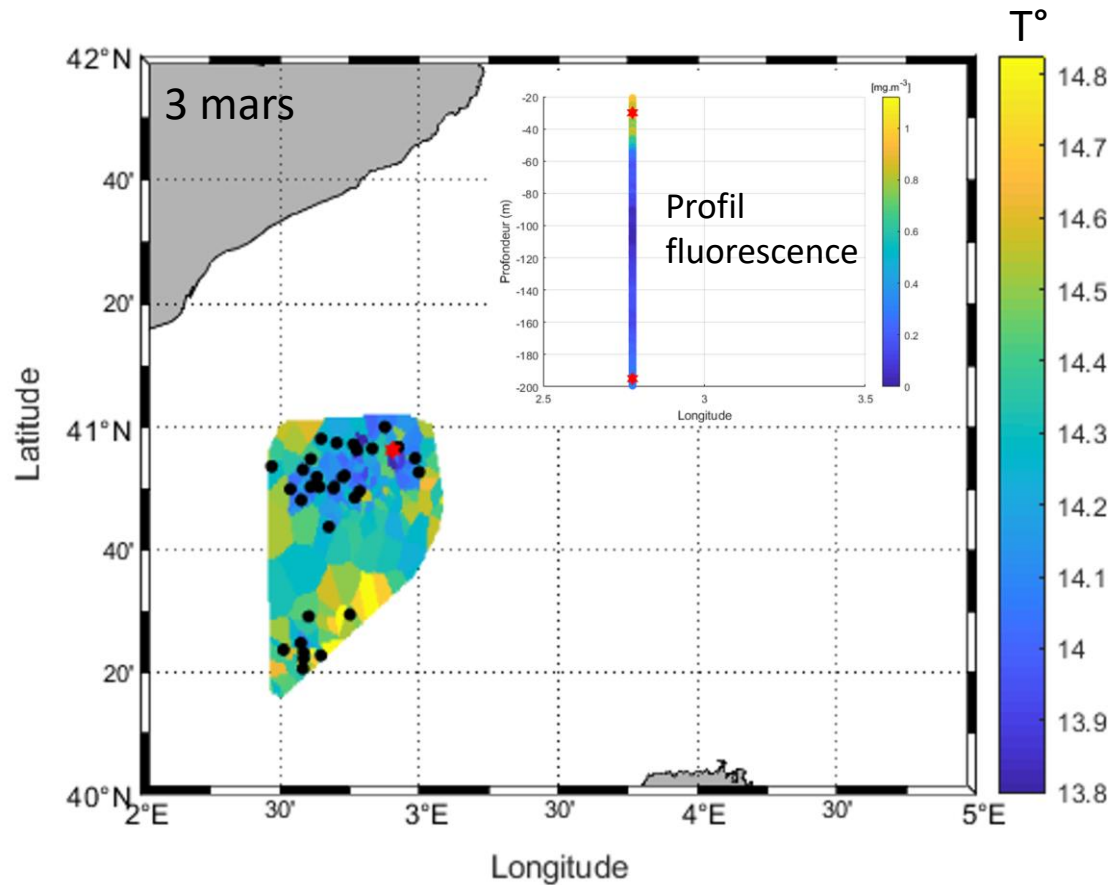
- Pas de cellules possédant d'organes moteurs **x**
- Présence de diatomées : capable d'adapter leur flottabilité **?**
- Présence de cellules soumise au mouvement de l'eau **?**

Analyses des conditions
physicochimiques pour aller plus
loin...

Formation de couches phytoplanctoniques profondes

CALYPSO

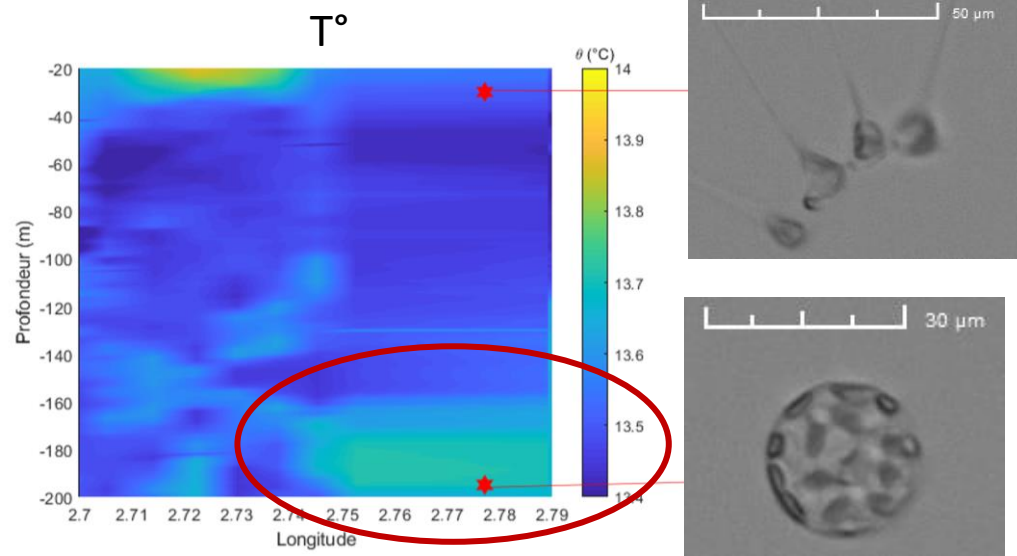
Exemple d'une station emblématique



Quel scénario observe t-on ici ?

Formation de couches phytoplanctoniques profondes

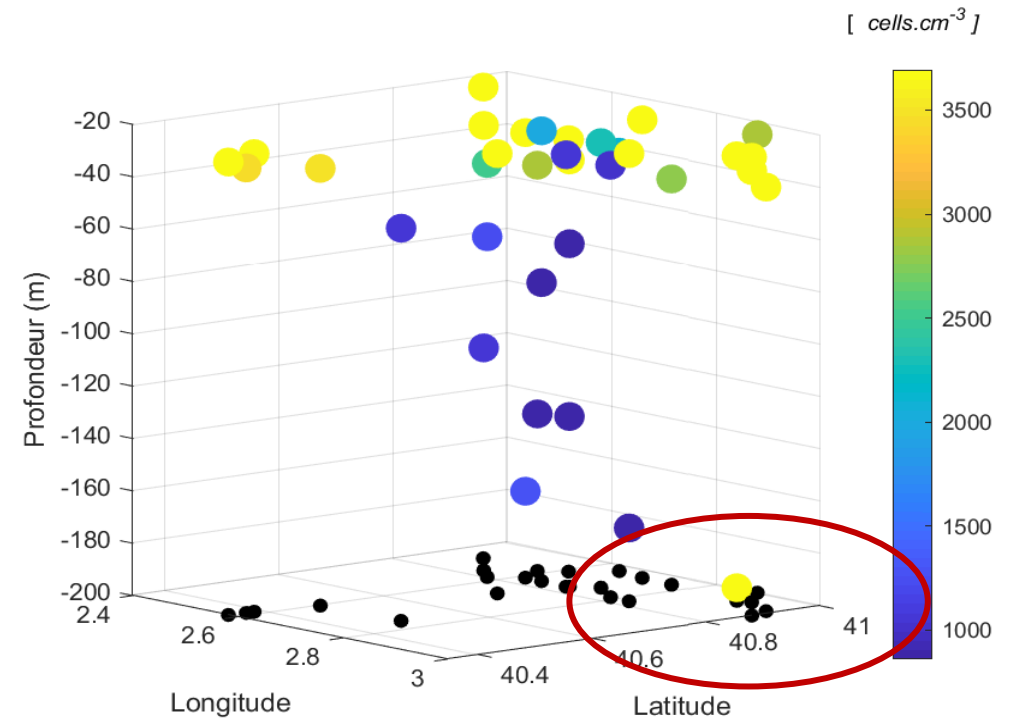
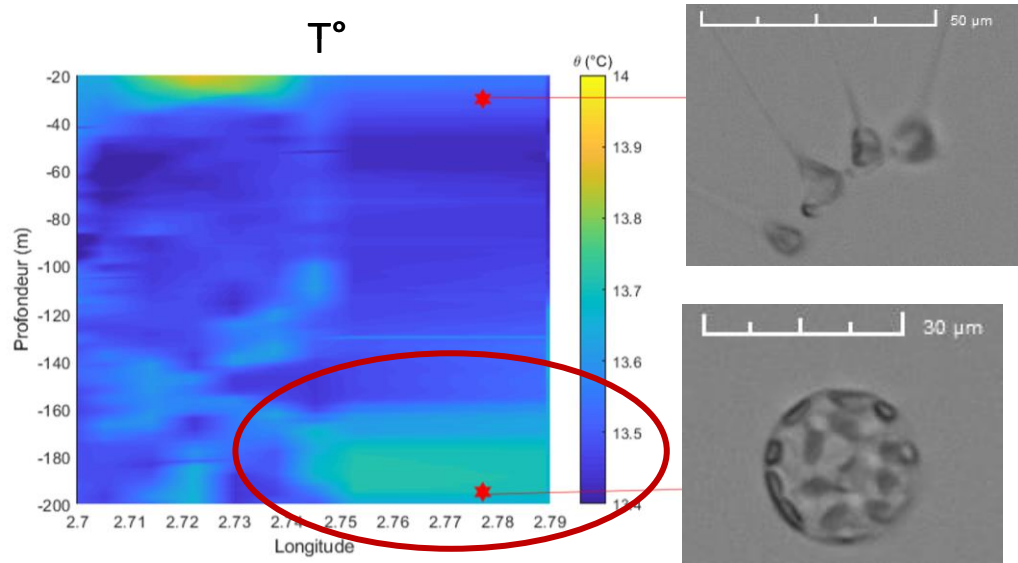
CALYPSO



RESULTATS/DISCUSSION

Formation de couches phytoplanctoniques profondes

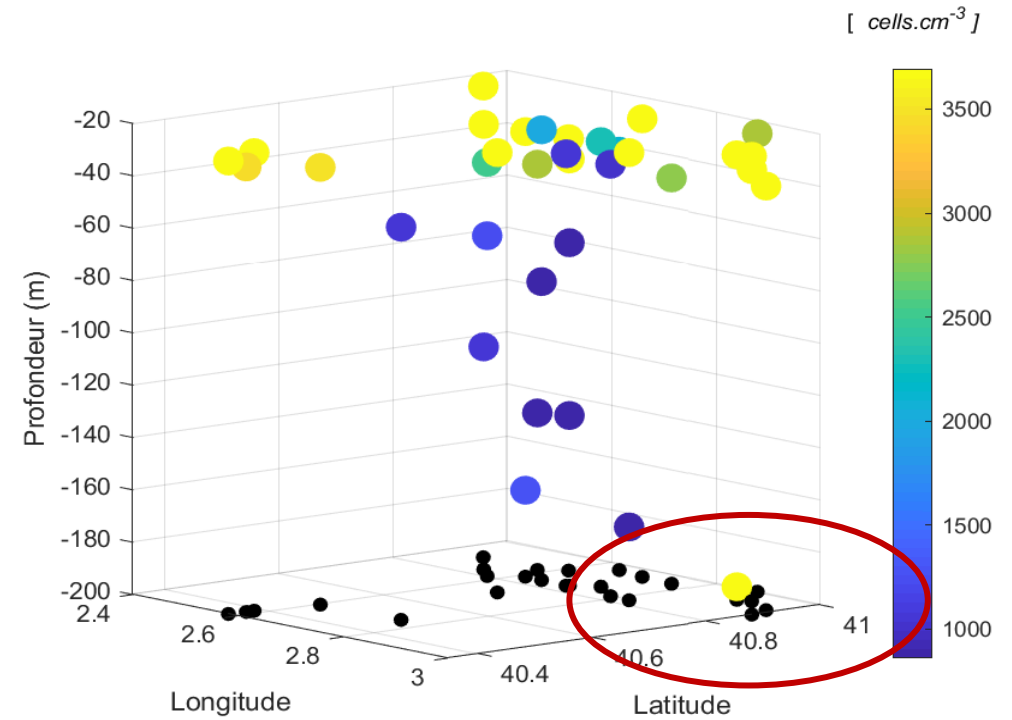
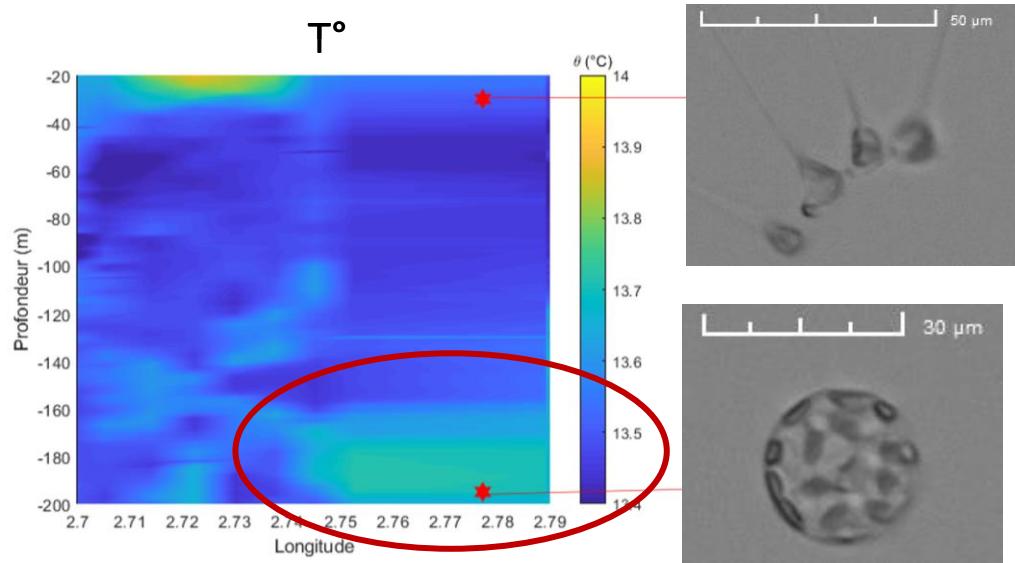
CALYPSO



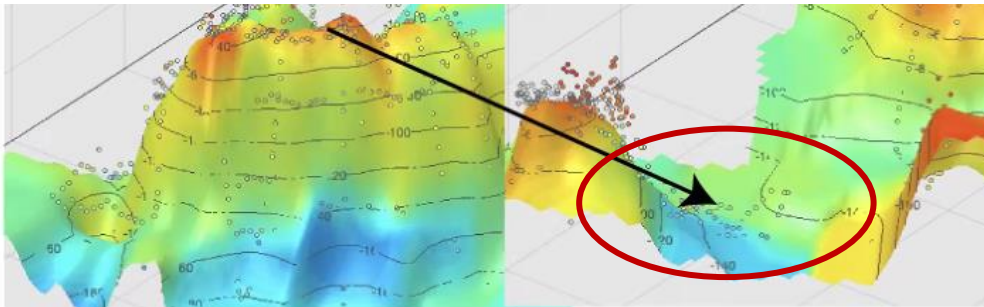
RESULTATS/DISCUSSION

Formation de couches phytoplanctoniques profondes

CALYPSO



Transport vertical associé

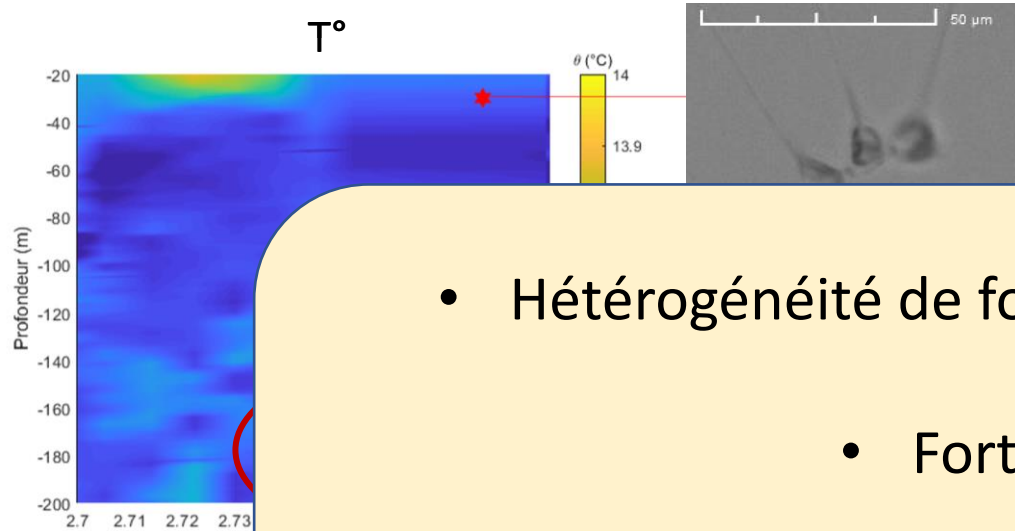


Subduction O2 (E. d'Asaro, Comm. pers.)

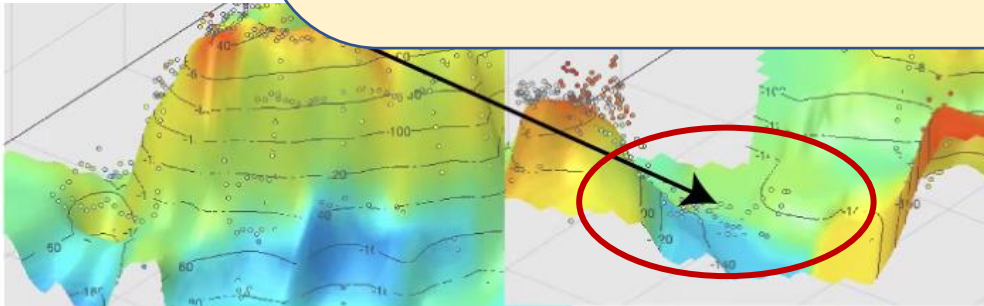
RESULTATS/DISCUSSION

Formation de couches phytoplanctoniques profondes

CALYPSO



- Hétérogénéité de forme de MICRO entre les 2 profondeurs
 - Fortes abondances à -200m
 - Masse d'eau différente à -200m
- [O₂] élevée à -200m = Subduction d'une masse d'eau

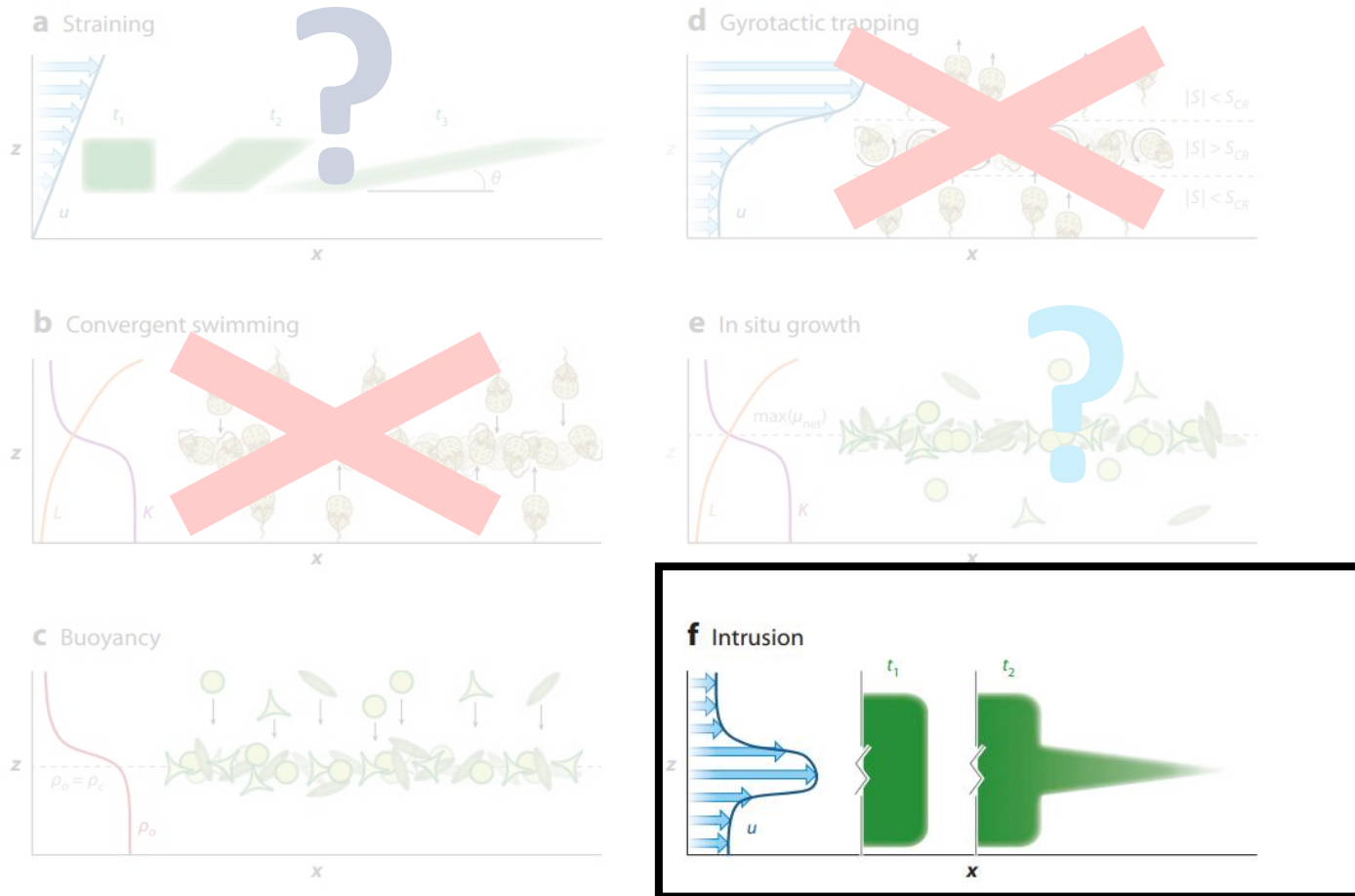


Subduction O2 (E. d'Asaro, Comm. pers.)

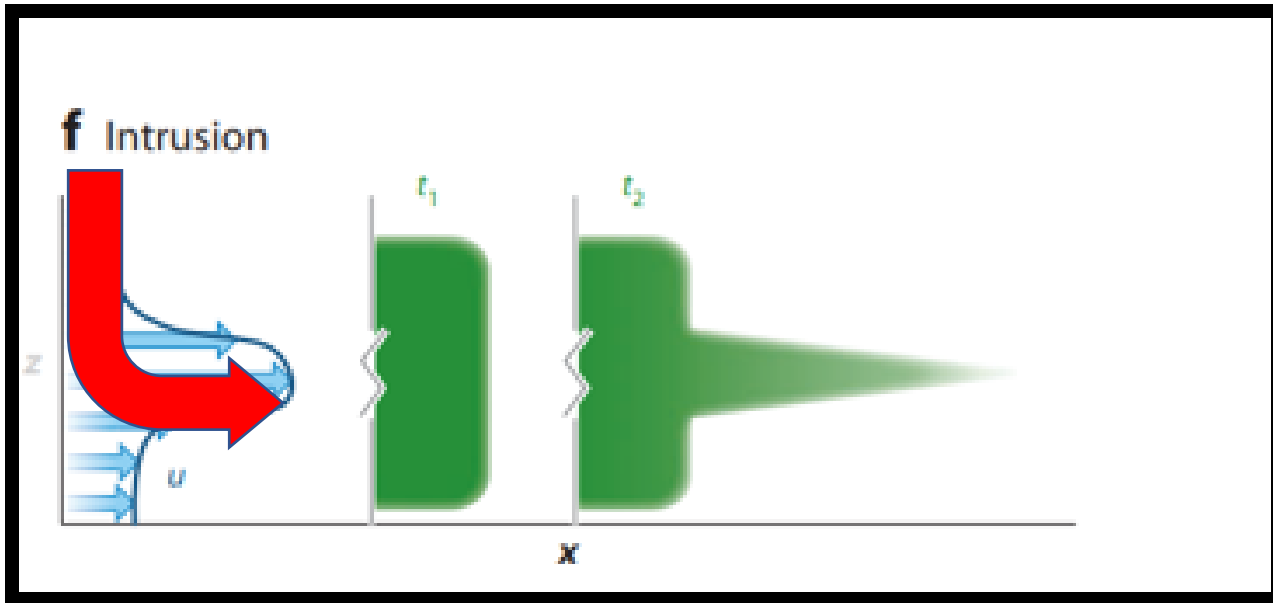
RESULTATS/DISCUSSION

Formation de couches phytoplanctoniques profondes

CALYPSO



Modification du schéma d'intrusion :



**Intégration de la composante
verticale de la circulation**

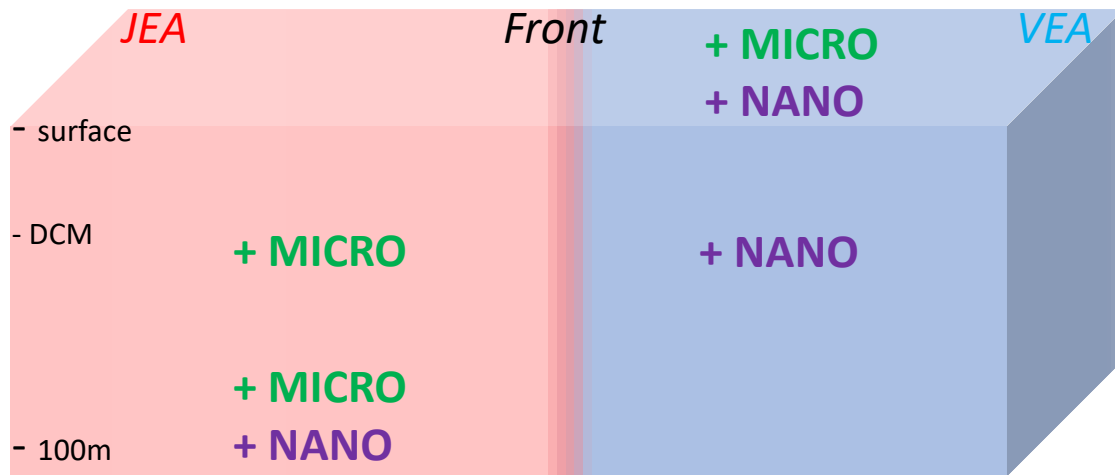
CONCLUSION

**Le type de structure physique influence la distribution 3D
des organismes phytoplanctoniques**

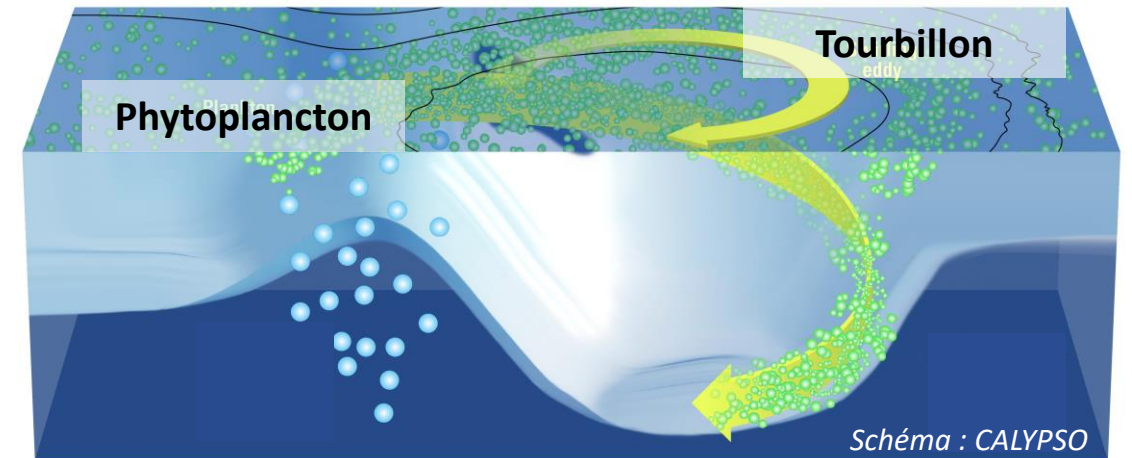
CONCLUSION

Le type de structure physique influence la distribution 3D des organismes phytoplanctoniques

Front sud-Baléares (PROTEVSMED-SWOT)



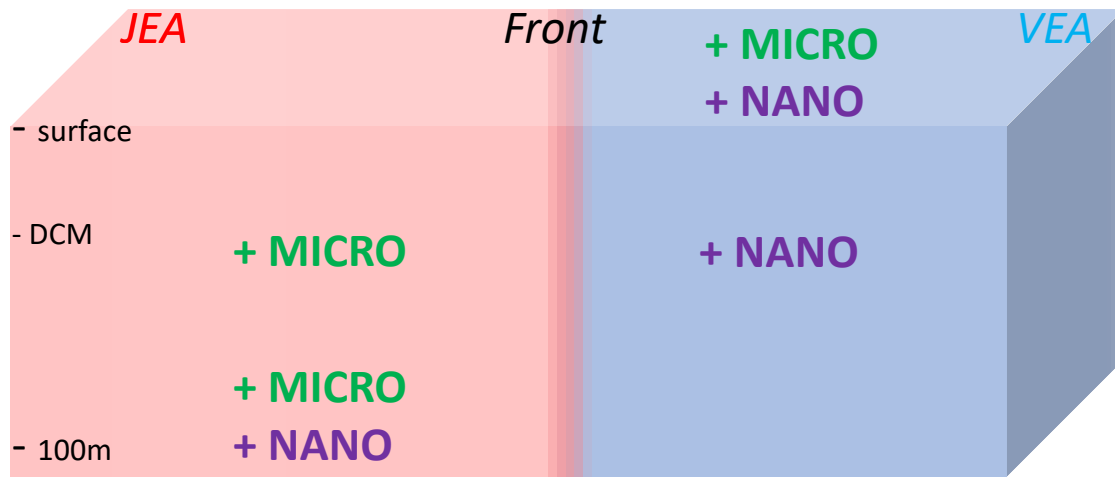
Tourbillon nord-Baléares (CALYPSO)



CONCLUSION

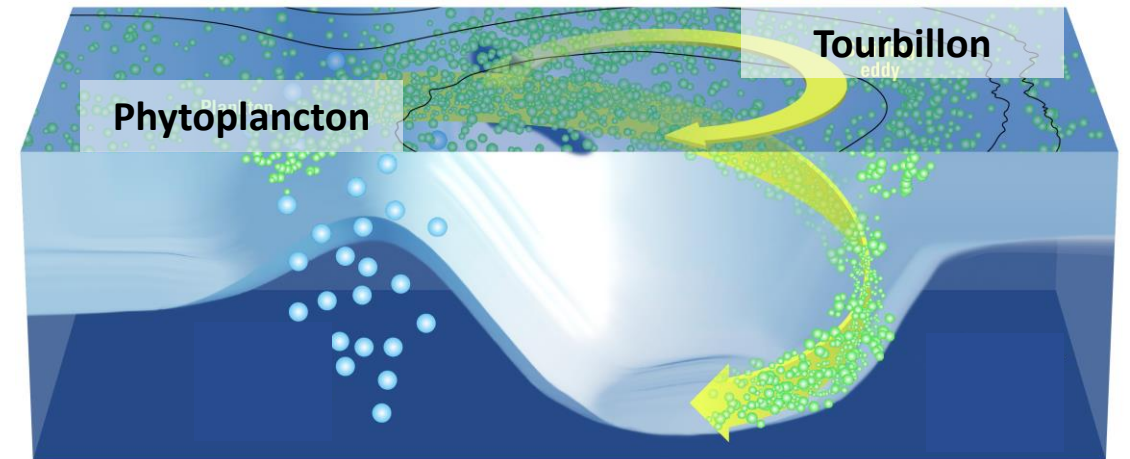
Le type de structure physique influence la distribution 3D des organismes phytoplanctoniques

Front sud-Baléares (PROTEVSMED-SWOT)



Séparation des communautés selon le type de masse d'eau :
formation de modèles écologiques bimodaux

Tourbillon nord-Baléares (CALYPSO)



Distribution en mosaïque des communautés selon le transport de masse d'eau : **formation de micro-niches écologiques**

Ensuite ... ?

Dans le cadre de CALYPSO :

Estimation des vitesses verticales

Données biogéochimiques/génomiques

Ensuite ... ?

Dans le cadre de CALYPSO :

Estimation des vitesses verticales

Données biogéochimiques/génomiques

Poursuivre l'étude 3D du couplage biophysiques :

projet BIOSWOT multidisciplinaire (physiques,
biogéochimiques, génomiques, écologiques)

Ensuite ... ?

Dans le cadre de CALYPSO :

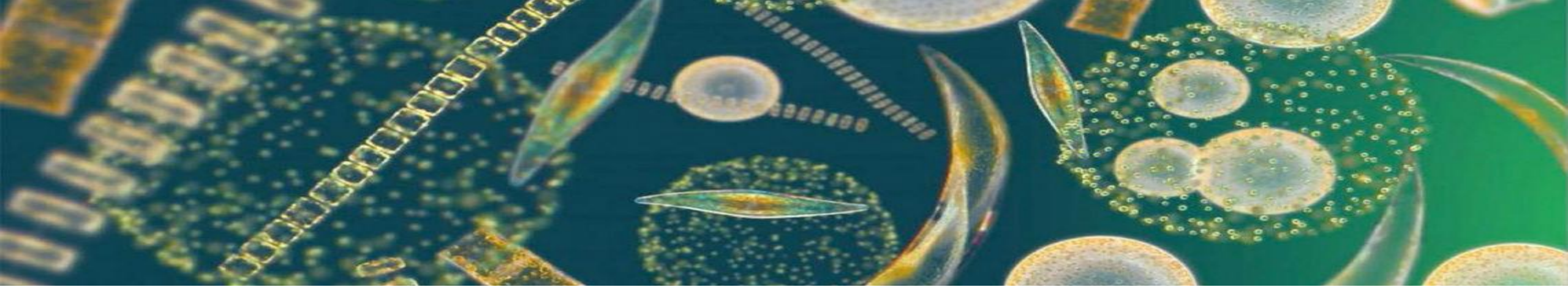
Estimation des vitesses verticales

Données biogéochimiques/génomiques

Poursuivre l'étude 3D du couplage biophysiques :
projet BIOSWOT multidisciplinaire (physiques,
biogéochimiques, génomiques, écologiques)

An abstract, swirling pattern in shades of blue and green, resembling a satellite image of a cloud or a cross-section of a fluid. The colors transition from light blue and green at the top to darker blue and black at the bottom, with intricate, swirling patterns throughout.

**Objectif : Comprendre
l'histoire commune des
masses d'eau et des
organismes**



Merci pour votre attention !

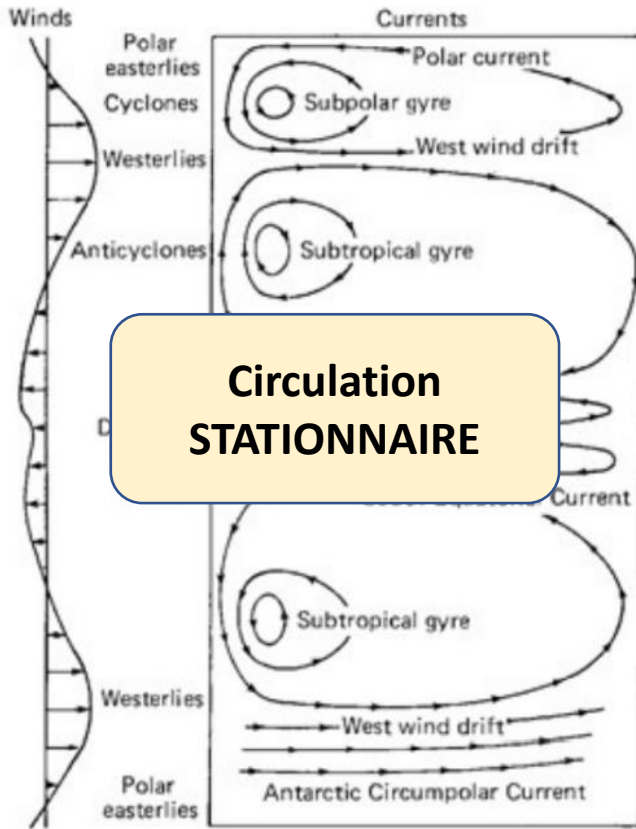
Merci à mes encadrants Gérald Grégori et Andrea Doglioli

Merci à tous ceux qui m'ont aidé durant ce stage

INTRODUCTION

❖ Point historique

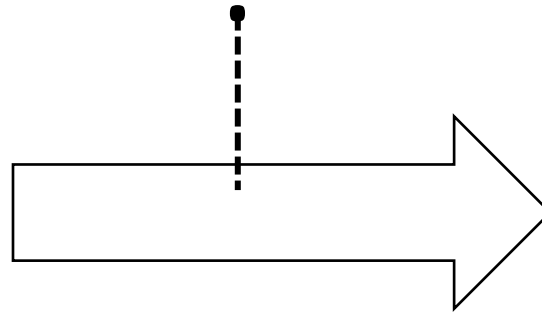
La circulation océanique



Combinaison des résultats des travaux d'Ekman, Sverdrup et Stommel
(Cours OPB206, M.Baklouti).

Années 40

Bouées dérivantes
Méthodes numériques
Imagerie satellitaire



Années 2000

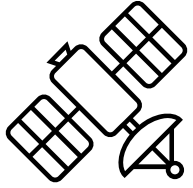
La circulation océanique influence :

- La disponibilité des ressources (nutriments+lumière)
- Le transport des organismes

PRÉSENTATION DES CAMPAGNES

❖ 2 Campagnes autour des Îles Baléares

- Stratégie Lagrangienne
adaptative



Satellites

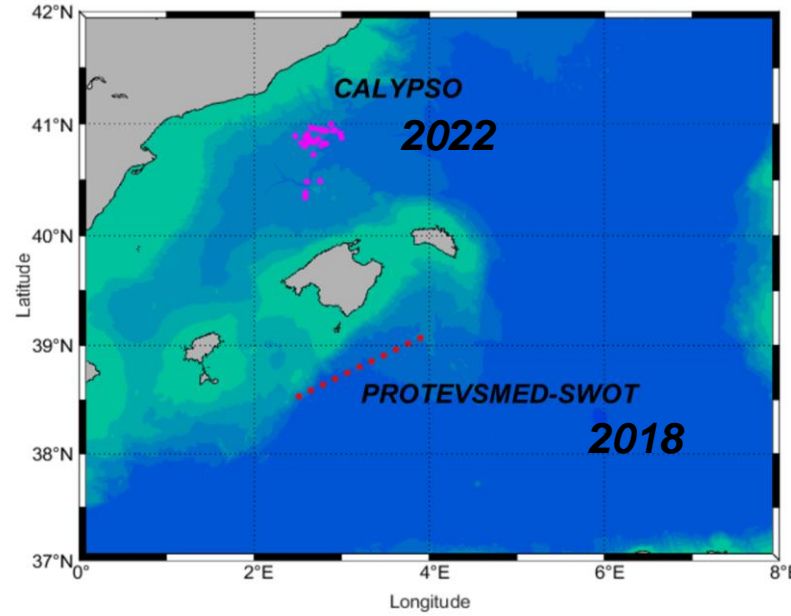


Modèles numériques



Mesures *in situ*

**Suivi dans le temps et l'espace des
structures d'intérêts**



RESULTATS/DISCUSSION

Scénarios de formation des couches phytoplanctoniques profondes

2. Dans une région tourbillonnaire

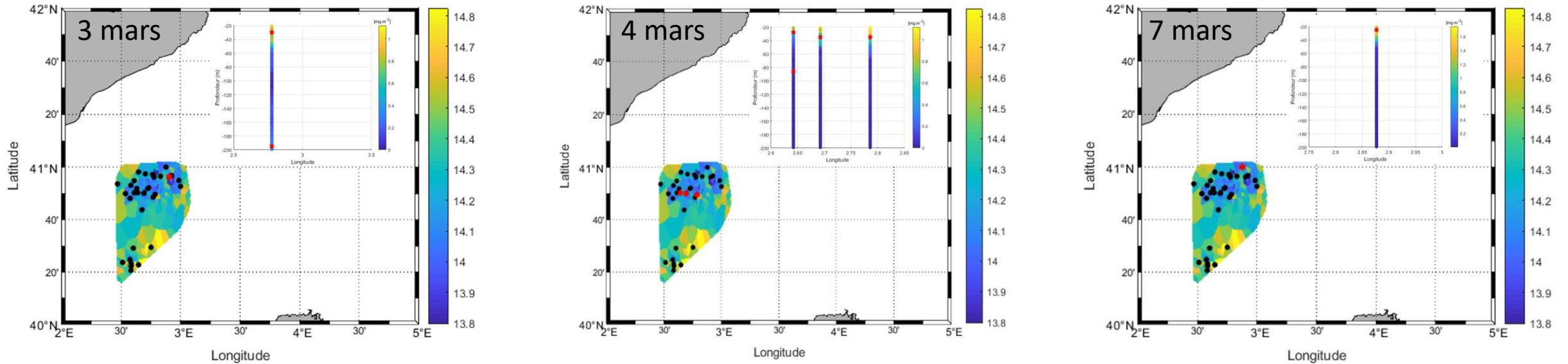


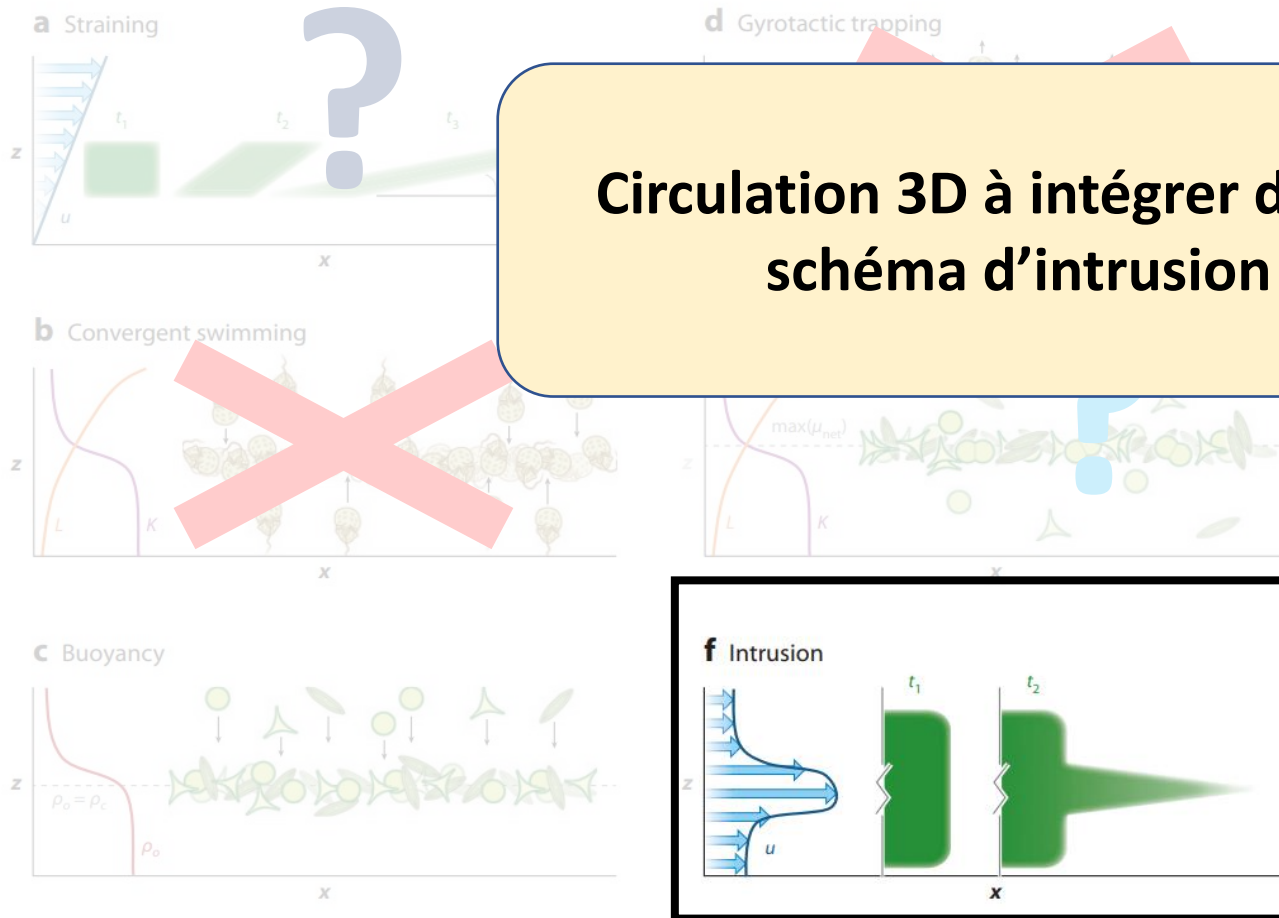
Figure : Positions des stations CTD du 3, 4 et 7 mars sur l'horizontale et la verticale superposées à la SST (TSG).

Etude des communautés phytoplanctoniques en profondeur sur 3 zones du tourbillon à l'aide des photographies

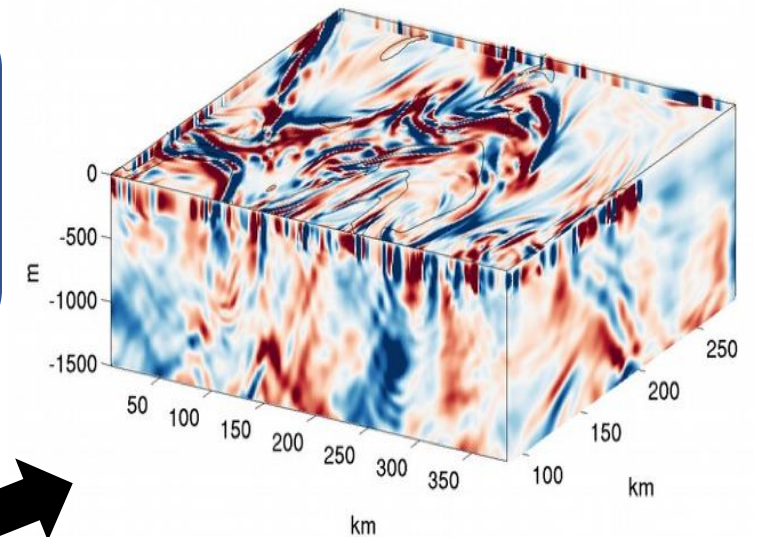
Formation de couches phytoplanctoniques profondes

CALYPSO

Circulation 3D à intégrer dans le
schéma d'intrusion

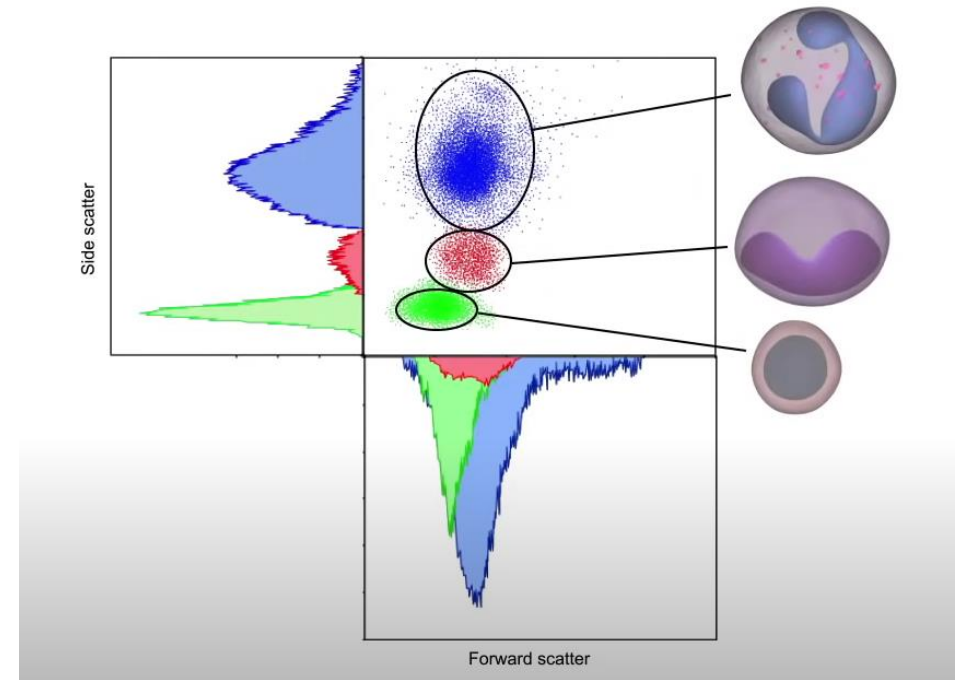
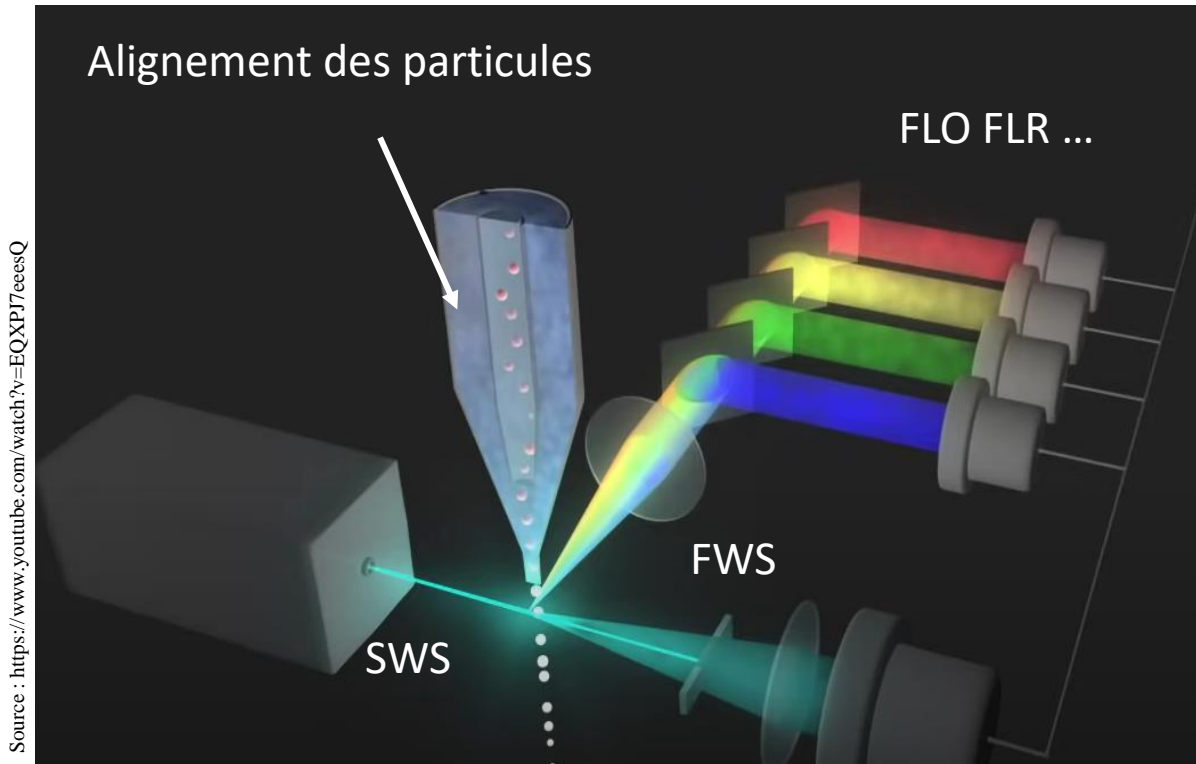


Champ vitesses verticales



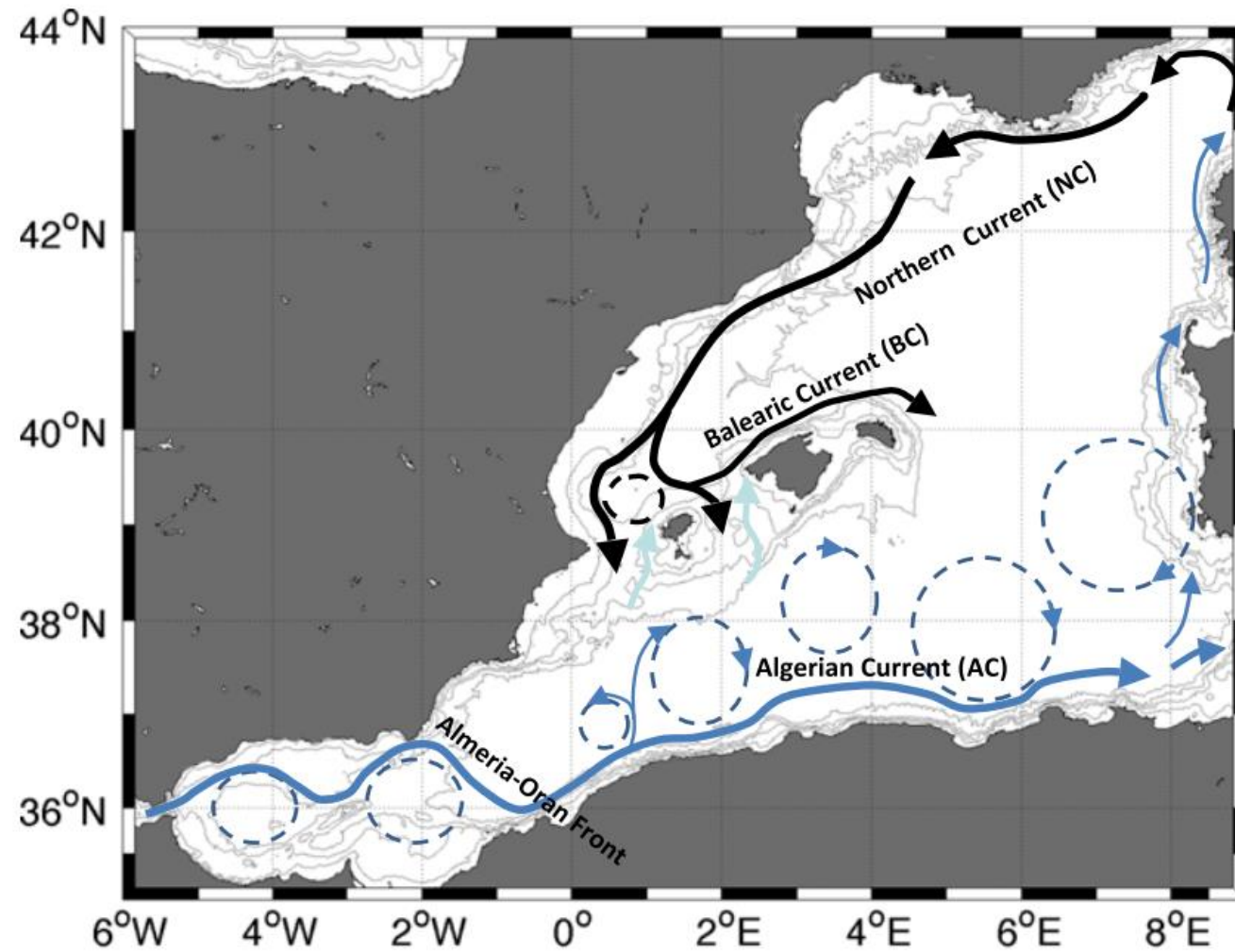
F. d'ovidio

Principe de la cytométrie



Système automatisé capable d'effectuer une analyse à haute fréquence de l'eau de mer pour identifier différents types de phytoplancton en fonction de leur taille et de leurs propriétés optiques

Circulation autour des Baléares



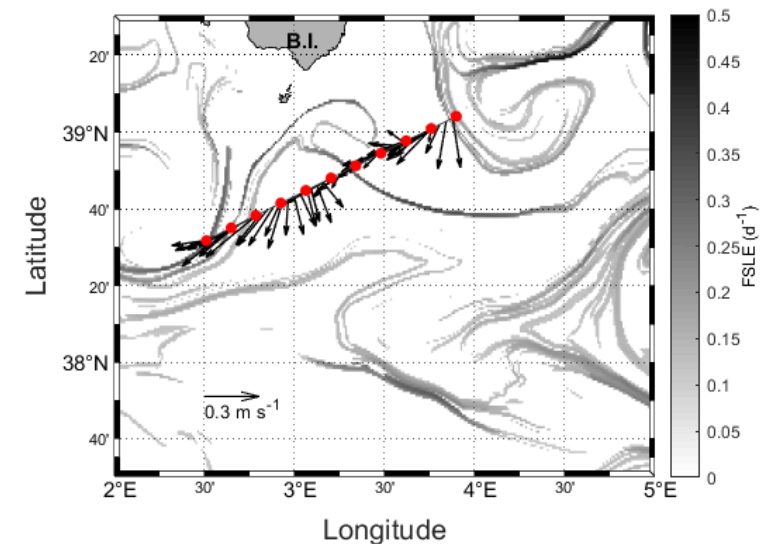
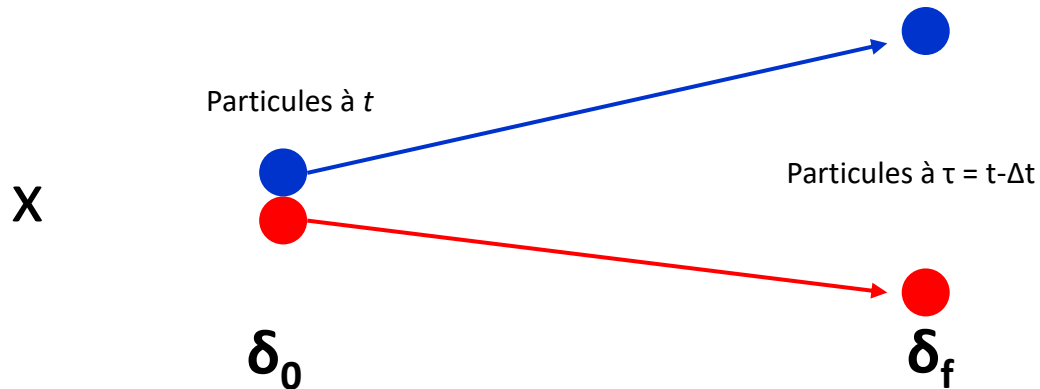
R. Balbín et al, 2013

FSLE

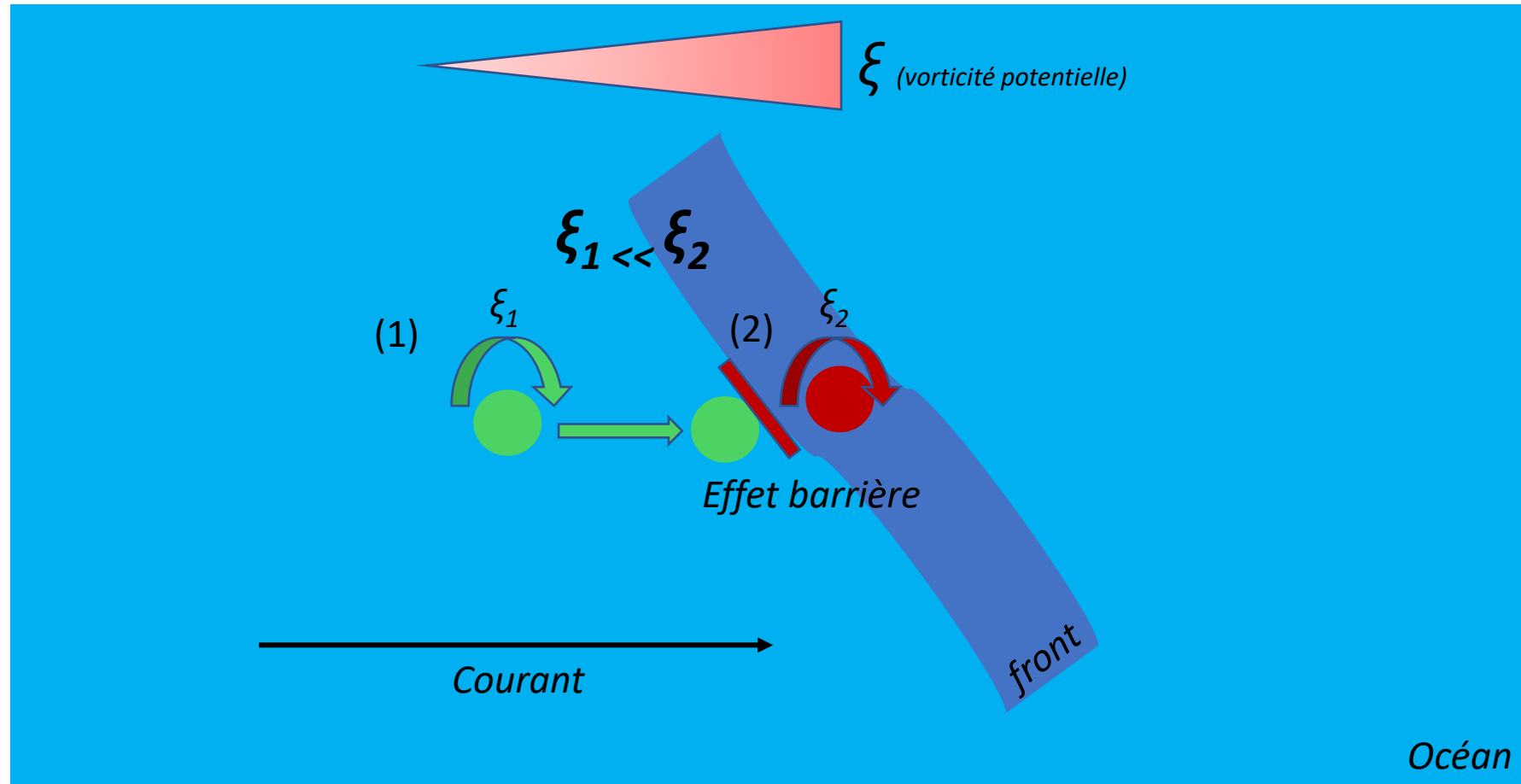
- Outils mathématiques mesurant le taux de séparation de la trajectoire de particules (ex : petites masses d'eau)
- Identification de zone frontale

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

Temps τ au bout duquel deux particules initialement, à un temps t , proches de x d'une distance δ_0 se retrouvent éloignées de x d'une distance δ_f



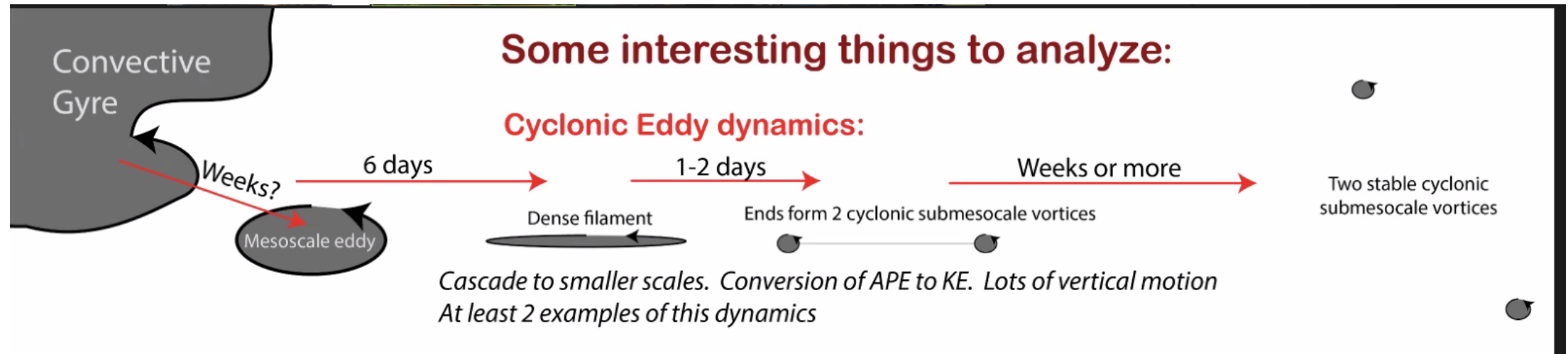
Front = barrière dynamique contre le transport ?



Tourbillon nord-Baléares

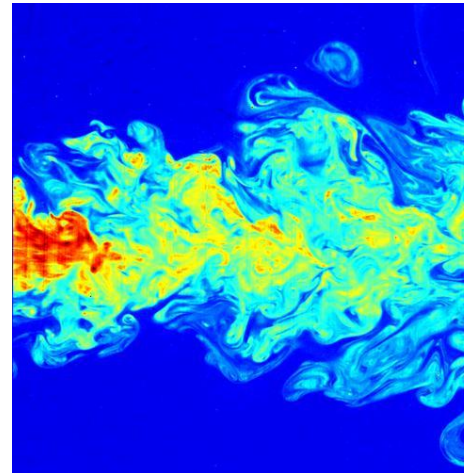
Cascade énergétique

E. d'Asaro



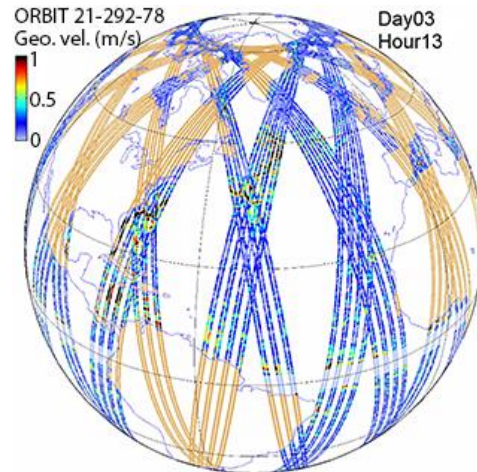
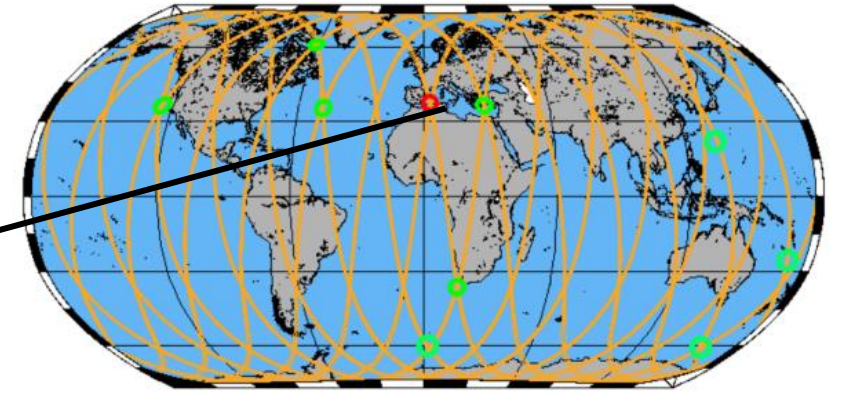
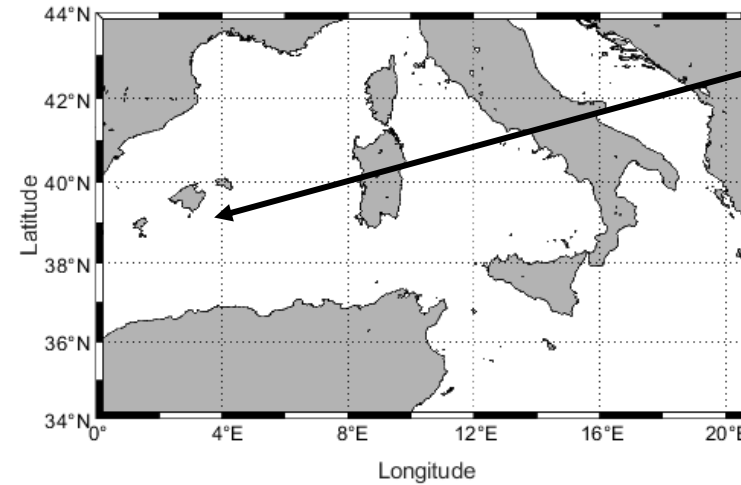
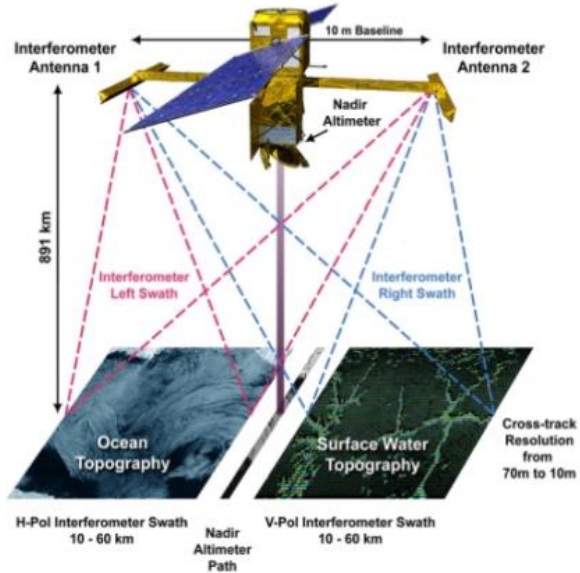
Transfert de l'énergie des grandes structures (gyres) aux petits vortex jusqu'à la dissipation sous forme de chaleur

C. Fukushima



SWOT

PROTEUSWOT (2018)
BIOSWOT (2023)

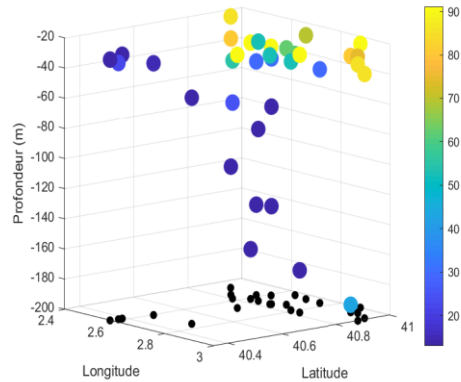


Observations hautes résolution de la surface de l'océan
→ Estimation des vitesses verticales

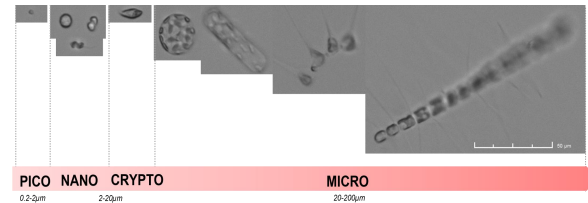
$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

BIOSWOT

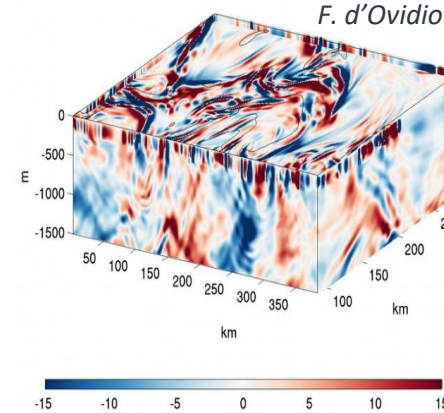
3D structures of phytoplankton abundances



Phytoplankton diversity

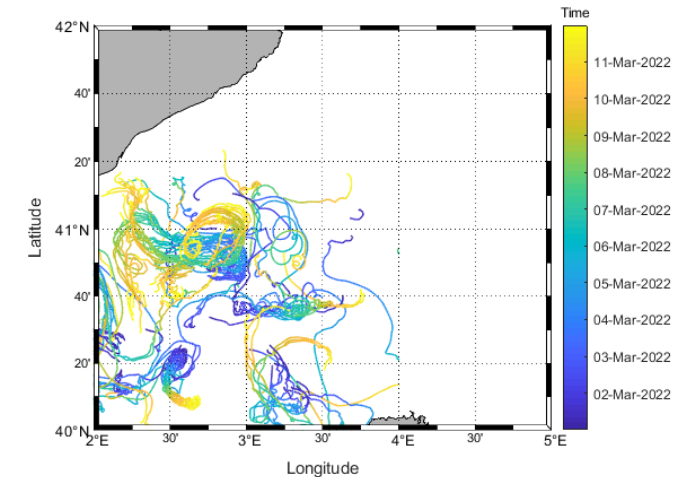


Vertical velocities



F. d'Ovidio

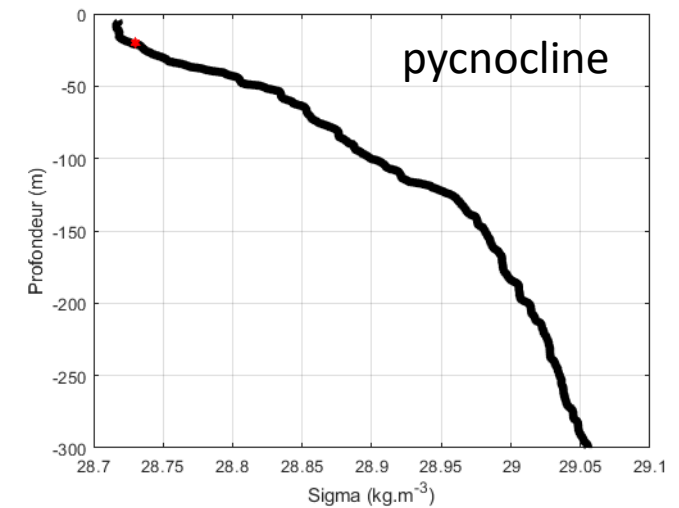
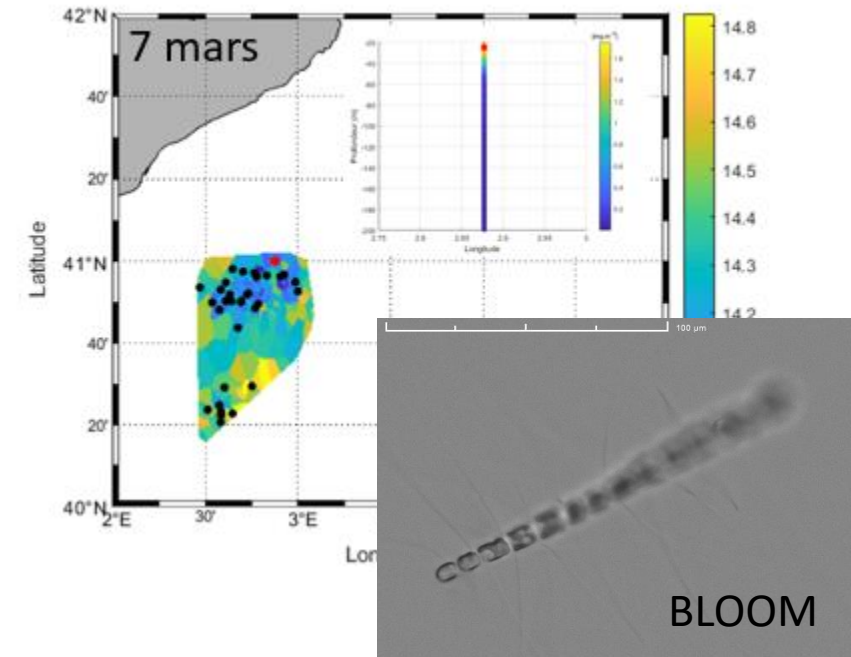
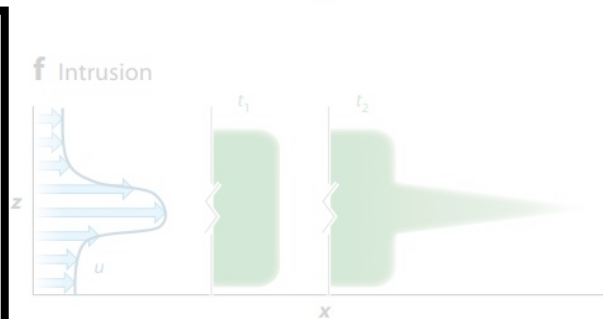
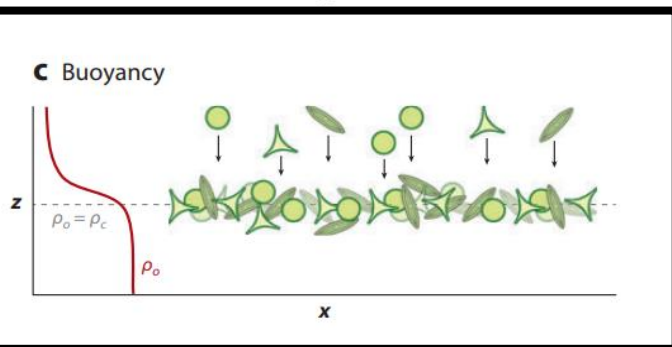
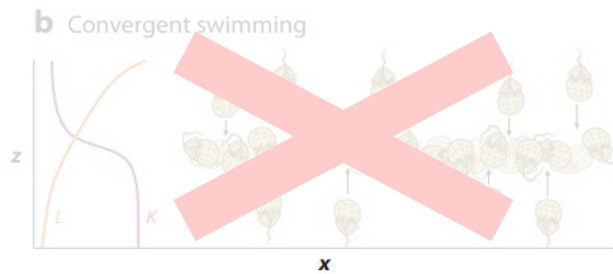
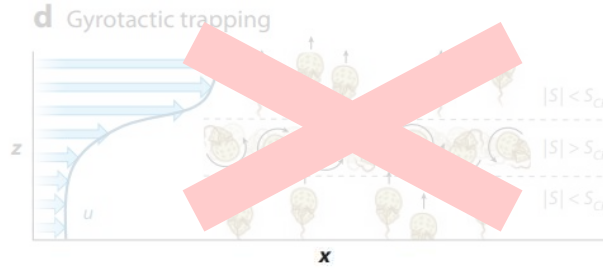
Lagrangian trajectories



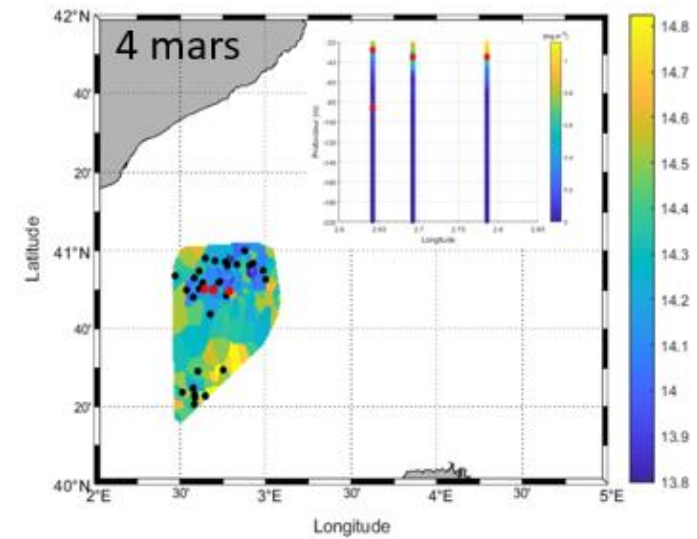
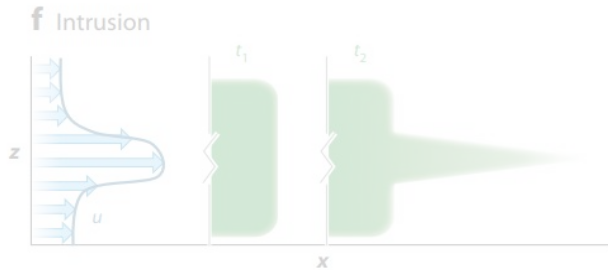
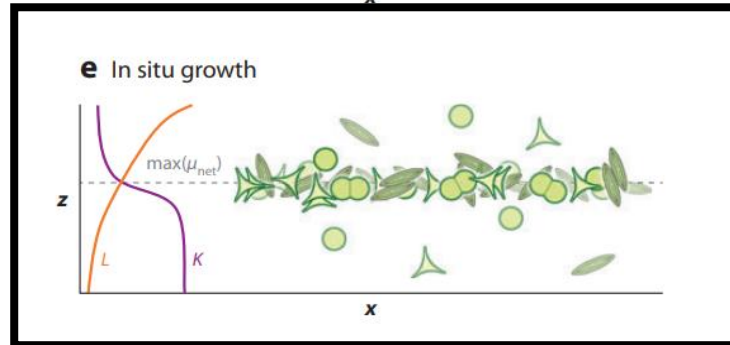
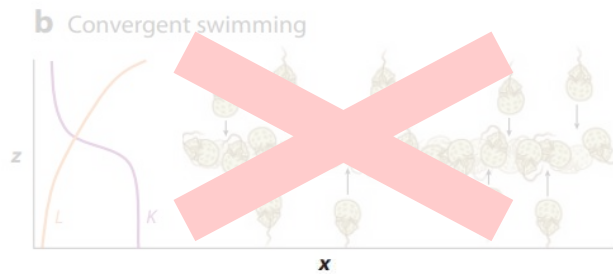
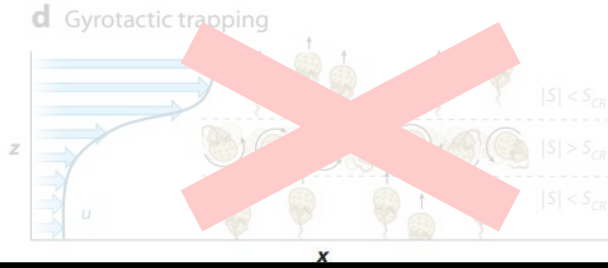
Objectives :

- ✓ Estimation des vitesses verticales pour construire les flux verticaux : déterminer comment les fronts de sub-mésoéchelle et le transport 3D déterminent la distribution du phytoplancton
- ✓ Déterminer la diversité phytoplanctonique sur une vue 3D dans les structures de sub-mésoéchelles
- ✓ Utiliser la modélisation numérique pour comprendre les modèles 3D du phytoplancton à ces fines échelles

Scénarios de formation des couches profondes

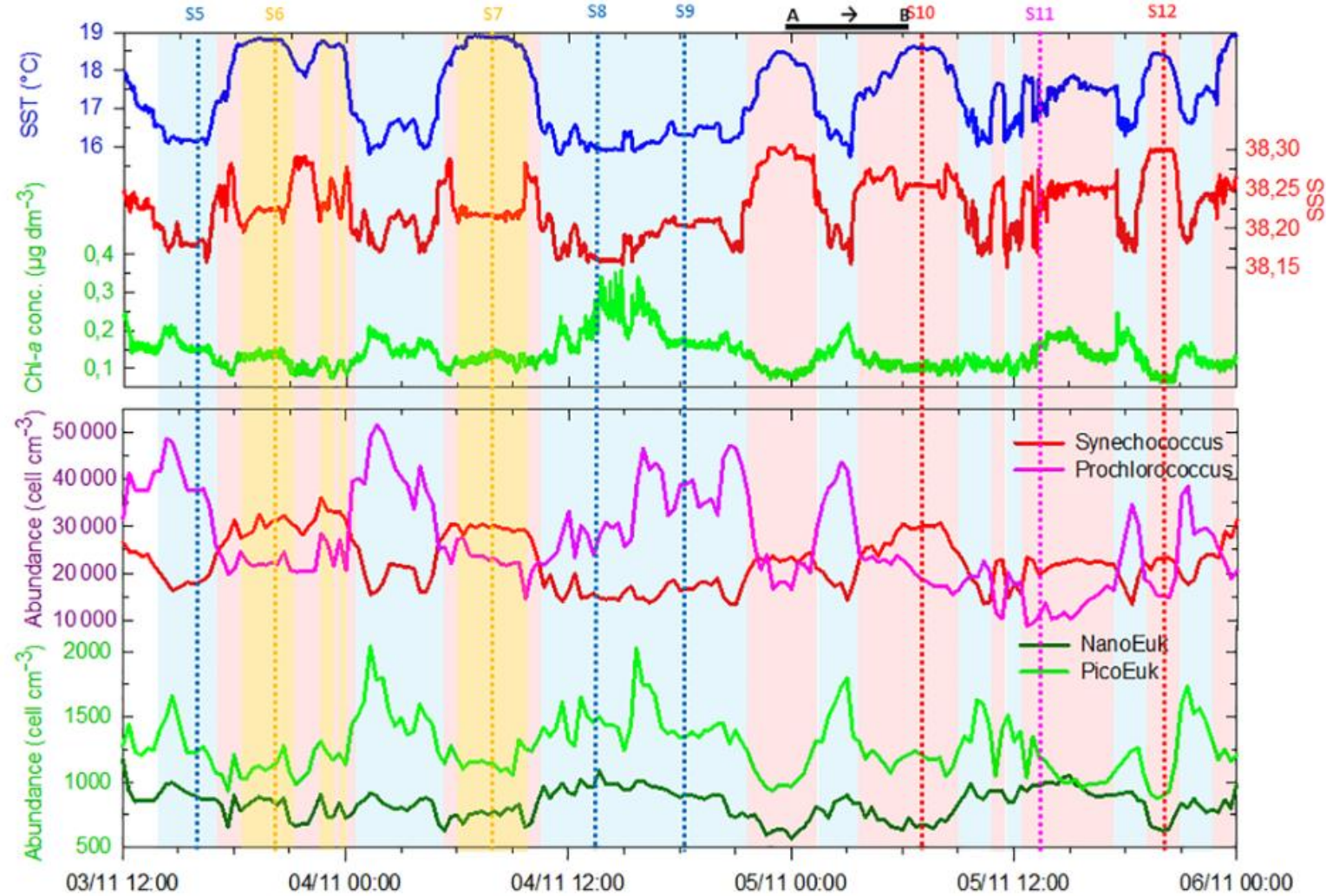


Scénarios de formation des couches profondes



Centre du tourbillon cyclonique :
up-welling → Conditions plus
favorables pour la croissance
phytoplanctonique

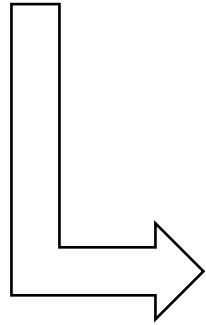
Transitions écologiques



Changement entre les groupes phytoP correspondent aux changements de SST et SSS

Espèces ou groupes fonctionnels ?

“Les processus de niche contrôlent la dynamique de la biomasse des groupes fonctionnels du phytoplancton. En revanche, **au sein de leurs groupes fonctionnels, les espèces phytoplanctoniques sont le plus souvent équivalentes sur le plan écologique**. Par conséquent, l'agrégation des espèces en groupes fonctionnels est une approche judicieuse pour modéliser la façon dont les communautés phytoplanctoniques réagissent aux au forçages environnementaux” *AJ Irwin, 2016*



Paradoxe apparent de la prévisibilité des groupes fonctionnels et de la non-prévisibilité des espèces : **Variation stochastique domine la dynamique au niveau des espèces au sein des groupes fonctionnels**