

Soutenance pour obtenir l'Habilitation à Diriger des Recherches

*Discipline : Océanographie*

par

Andrea M. Doglioli

*MCF à l'OSU Institut Pythéas de l'Université d'Aix-Marseille  
Chercheur au MIO - Mediterranean Institute of Oceanography*

## **La circulation océanique et son impact sur la biogéochimie marine : de la (sous-)mésos- à la micro-échelle**

### *Composition du jury :*

M J.-C. Poggiale	<i>Aix-Marseille Université, MIO</i>	tuteur
M X. Carton	<i>Université de Bretagne Occidentale, LOPS</i>	rapporteur
Mme I. Dadou	<i>Université de Toulouse III, LEGOS</i>	rapporteur
M J. Verron	<i>CNRS, LEGI</i>	rapporteur
Mme P. Bouruet-Aubertot	<i>Sorbonne Université, LOCEAN</i>	examineur
Mme A. Petrenko	<i>Aix-Marseille Université, MIO</i>	examineur
M M. Saillard	<i>Université de Toulon, MIO</i>	examineur
M R. Sempéré	<i>CNRS, MIO</i>	invité
Mme V. Michotey	<i>Université d'Aix-Marseille, MIO</i>	invité

# Parcours : affiliations

nov'00-oct'04

nov'04-août'06

depuis sep'06

## Thèse

UNIVERSITÀ  
DI GENOVA



Consiglio Nazionale  
delle Ricerche

Visiting  
student  
at



## Post-doc



Laboratoire  
de Physique  
des Océans

*contrat  
financé par le*



## Maître de Conférences



LOB



# Parcours : activités pédagogiques *enseignement*

nov'00-oct'04

nov'04-août'06

depuis sep'06

## Thèse

## Post-doc

## Maître de Conférences



Séminaires dans  
Cours de Science  
de l'Environnement  
Marin

Cours dans le  
Master International  
de spécialisation en  
aquaculture

### LICENCE SCIENCE DE LA VIE ET DE LA TERRE

L1 Initiation à l'informatique

L2 Introduction à l'océanographie (resp UE)

L3 Dynamique des Océans (resp UE)

Projet en Modélisation

### MASTER D'OCEANOGRAPHIE

M1 Océanographie Générale Méditerranée

Modélisation de la circulation Océanique (resp UE)

M2 Circulation et Dispersion en Eaux Côtières (resp UE)

**Tjrs service complet, sauf  
2015-2017 Délégation CNRS à 50%**

2008, 2009, 2011 interventions à l'Univ. de Gênes

2010 cours de formation pour Agence Protection

Environnement Venise

2017 Organisateur International Workshop/Summer FineMed



Polys  
dispo  
sur  
pages  
web  
perso

# Parcours : activités pédagogiques *encadrement*

nov'00-oct'04

nov'04-août'06

depuis sep'06

**Thèse**

**Post-doc**

**Maître de Conférences**



Depuis 2006 :

**10 Stages M2 ou similaire (Laurea, École Ingénieurs)**

En collaboration avec

A.Petrenko, P.Vassallo, F.Diaz

Depuis 2007 :

**6 Thèses de Doctorat** (dont 2 en cours)

2007-2010 P. De Gaetano (Univ.Gênes)

2007-2011 Z. Hu (UniMed)

2010-2013 M.Kersalé (UniMed)

2013-2017 A.Costa (AMU)

Depuis 2015 H.Raapoto (Univ.Polynesie & AMU)

Depuis 2015 R.Rousselet (AMU)

Citations:  
[biblio]  
[auteur/coauteur]  
doctorant

En collaboration avec

A.Petrenko (HDR), I.Dekeyser (HDR), E.Martinez, R.Festa (HDR) et M.Burlando

# Parcours : activités collégiales

nov'00-oct'04

nov'04-août'06

depuis sep'06

**Thèse**

**Post-doc**

**Maître de Conférences**



2005-07

Membre du CS de AISA  
(Association Italienne Science de  
l'Environnement)

2008-09 membre  
CS LOPB

Depuis 2012 Resp. AT\_COUPLAGE et  
membre du ComEx et CS du MIO

2012-2017 Resp. séminaires MIO

- Expertises LEFE, EC2CO, TOSCA, CNFC et CNFH
- Membre de 2 commissions MCF
- Membre de 1 jury et 4 comités de thèse
- Erasmus, Ambassadeur Fac. Science, Censure

## **Introduction**

Méso-, sousméso- et micro-échelle  
dans l'océan

*Une aperçu historique*

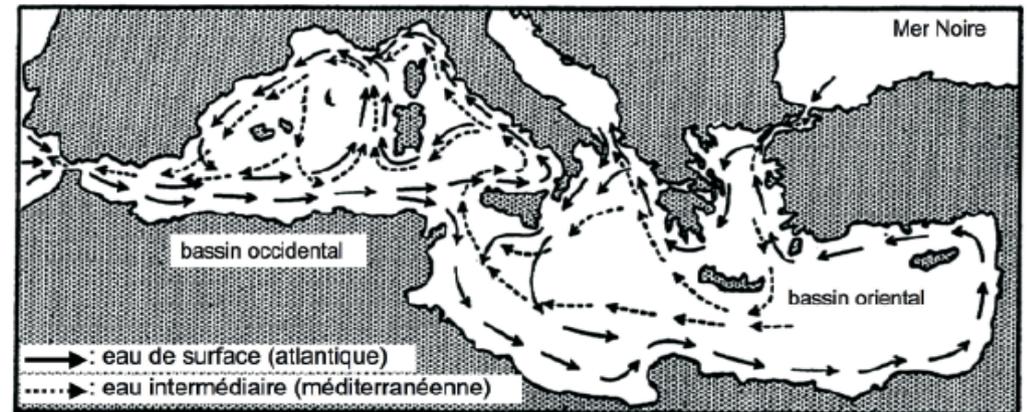
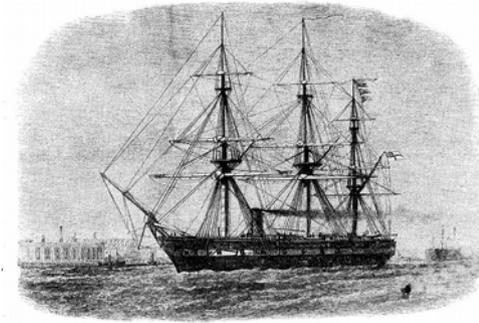
1768-1775

Franklin-Folger map



1872-1876

expédition du *Challenger*, première grande campagne océanographique mondiale.



Le premier schéma dérivé de l'océanographie "moderne", par le Danois Nielsen en 1912

## Difficultés théoriques pour résoudre les équations de Navier-Stokes

1940-1947

Circulation de Sverdrup

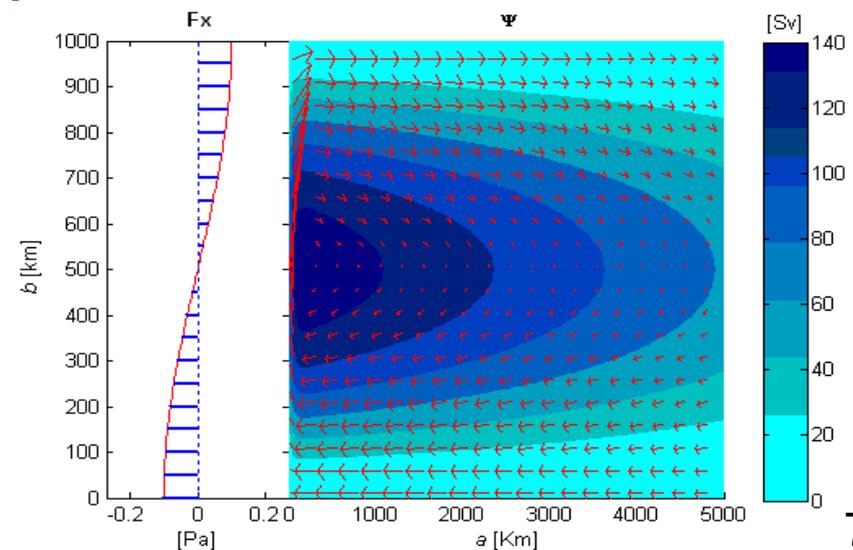
$$\psi(x, y) = \frac{F_o \pi}{\beta b} \sin\left(\frac{\pi y}{b}\right) (x - a)$$

sans courant de bord ouest!

1948

Circulation de Stommel

avec un Gulf Stream stationnaire



## Années '50

La “découverte” de la variabilité océanique par bouées dérivantes

The Swallow floats : flotteurs isopycnaux avec positionnement acoustique

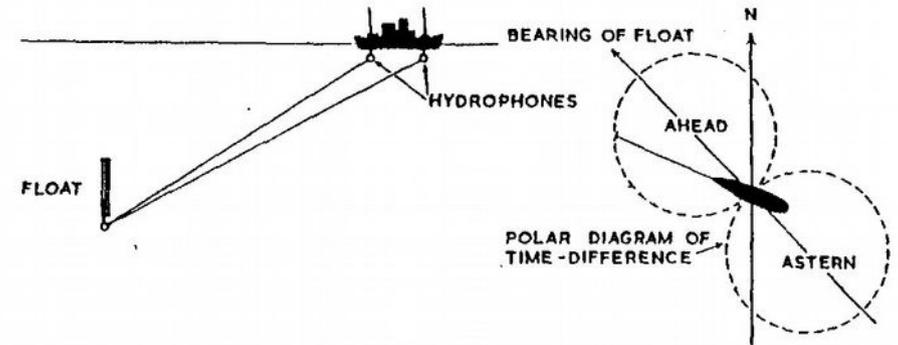


Fig. 3. Method of locating float.

<http://www.po.gso.uri.edu/rafos/general/history/index.html>

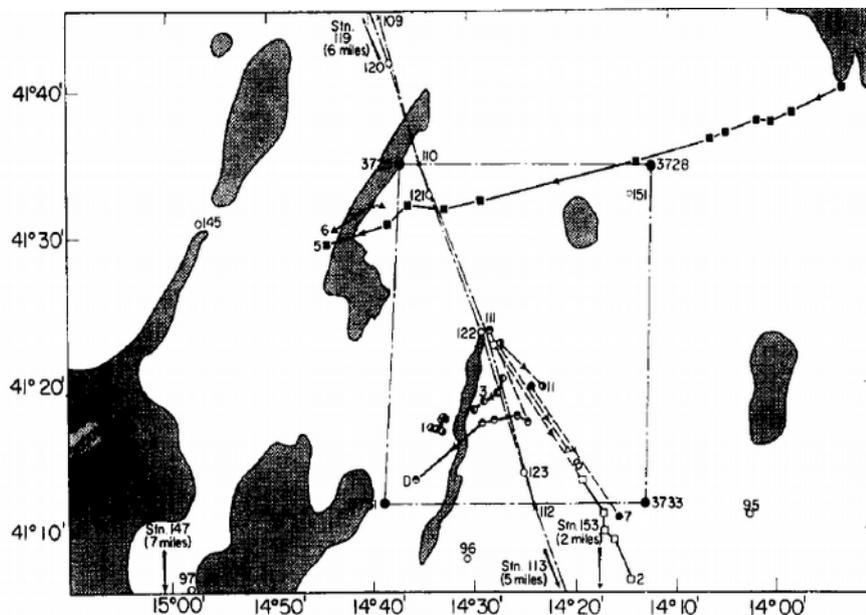


Fig. 2. Tracks of the floats, and positions of hydrographic stations. The dashed sections of the float tracks are shown on a larger scale in Fig. 3.

Swallow et Hamon (1959)

*“The **currents** were found to be **variable in time** with periods of a few weeks, **and in space** over a distance of a few tens of miles. In a vertical section, velocities did not decrease uniformly with depth, and **no 'level of no motion' was found.**”*

## Années '80

Les observations des premiers tourbillons de mésoéchelle (Allen, Bob,...)  
par bouées dérivantes et images satellite

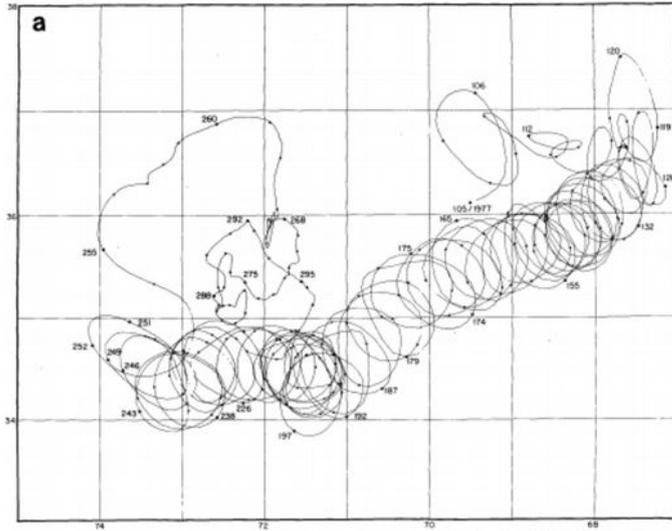


FIG. 3a. Trajectory of buoy 711 which was launched on 14 April 1977 (day 104) in ring Bob and recovered on 26 October 1977 (day 299) in the Sargasso Sea.

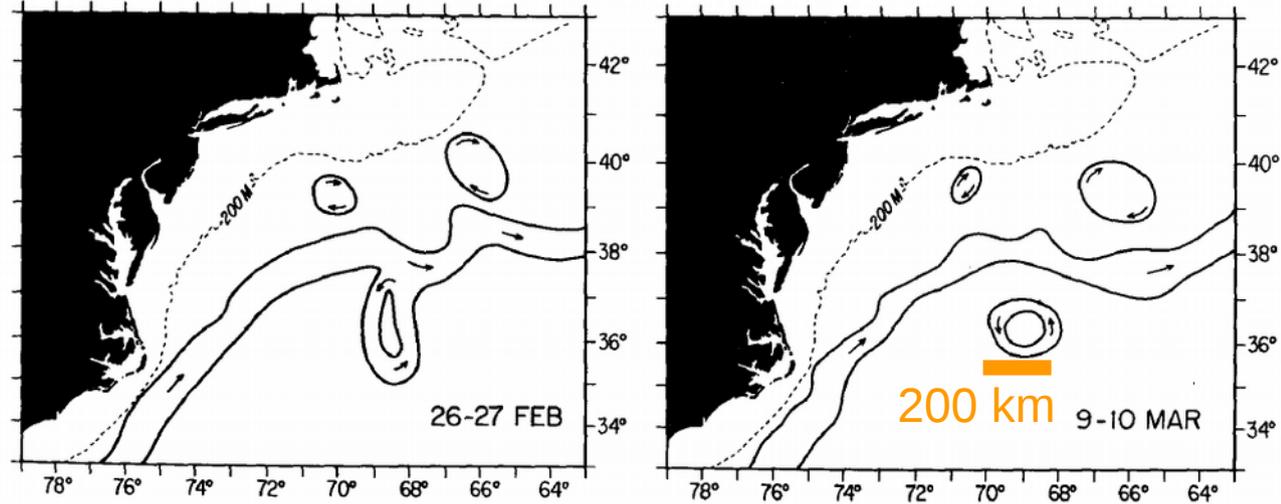


FIG. 1a. Schematic diagram showing formation of Gulf Stream ring Bob, February–March 1977, based on infrared images from the NOAA 5 satellite. Two anticyclonic rings were observed north of the Gulf Stream.

## RAFOS floats



Richardson et al., 1979,80, 83

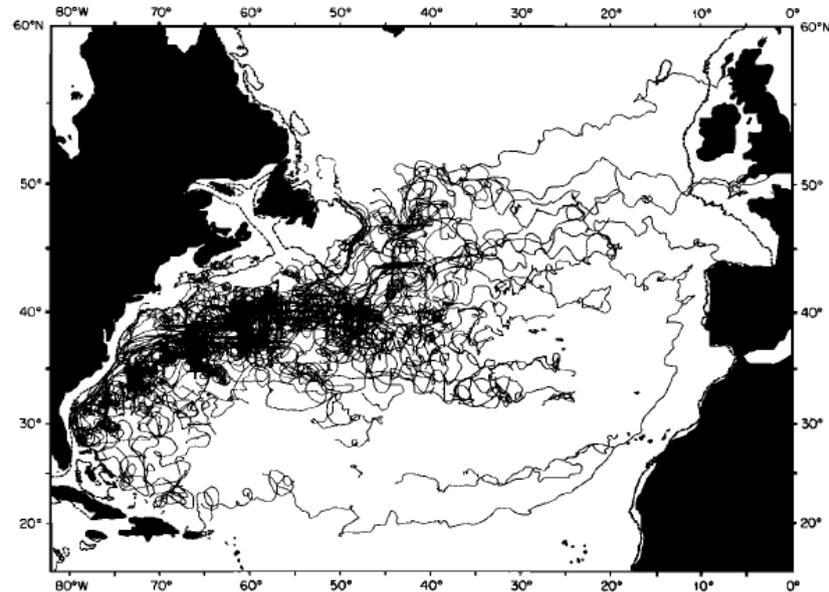


Fig. 2. Summary plot of 110 free drifting buoy trajectories (1971–1981). Buoy data were generously contributed by many individuals (Table 1).

# La modélisation numérique

Semter (1995): “Ces observations ont mis les océanographes face à l'immensité de leur tâche”

et à la nécessité d'une “aide de la part des modèles numériques”

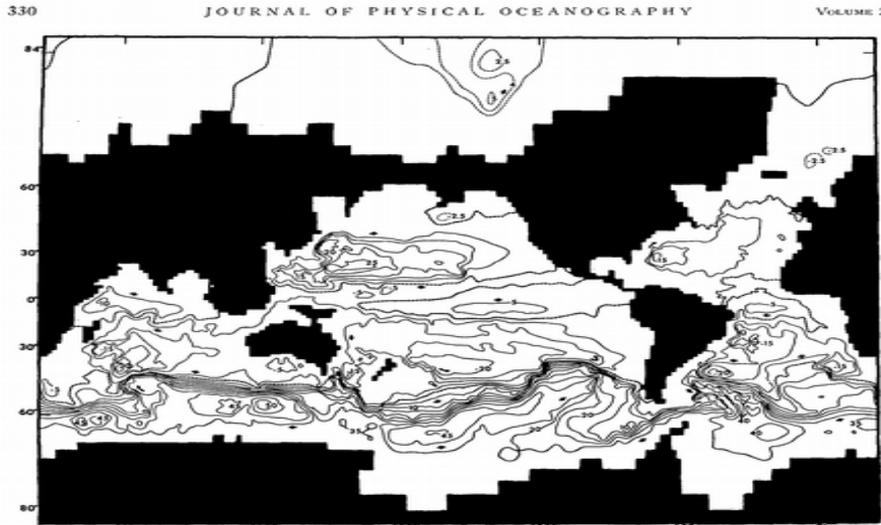


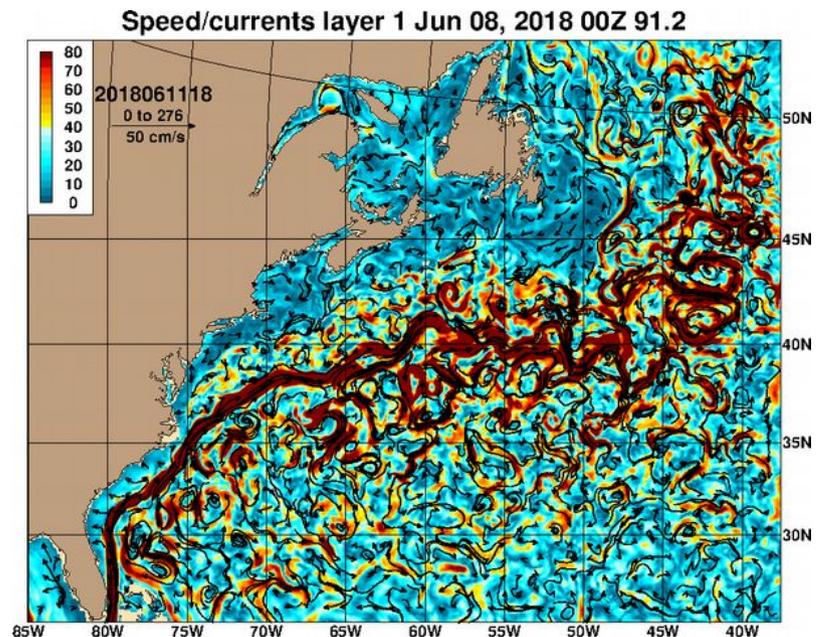
FIG. 8. Pattern of the mass transport streamfunction for the depth configuration shown in Fig. 5.  $\Delta\sigma$  is equal to  $4 \times 10^3 \text{ cm}^2 \text{ sec}^{-1}$ .

Brian & Cox 1972

Premier modèle global

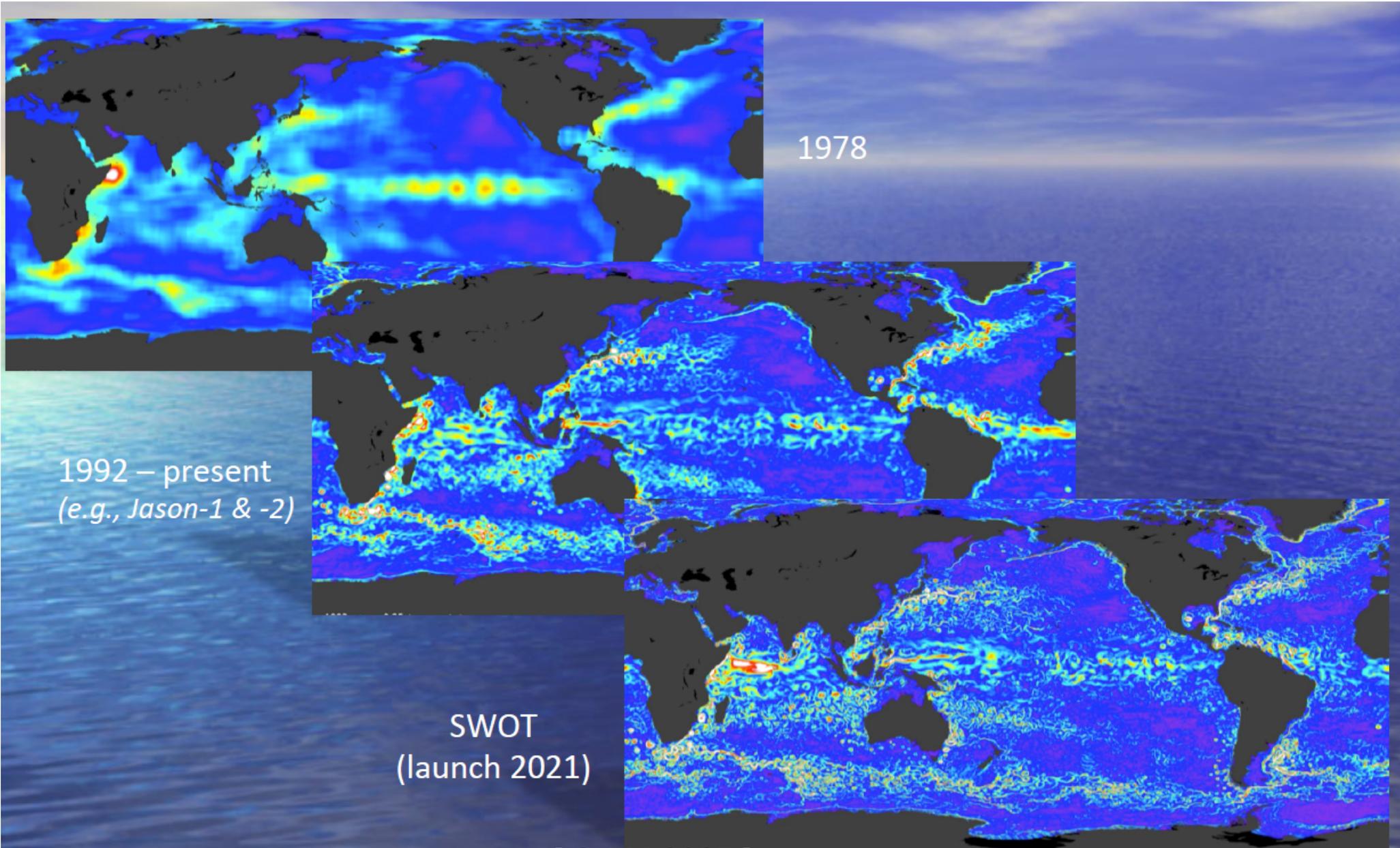
Rapide évolution avec modèles  
“Eddy permitting”  
ensuite  
“Eddy resolving”

et aussi  
modélisation HR régionale



# La courantologie de surface par satellite

Vision synoptique des courants géostrophiques de surface: en évolution!



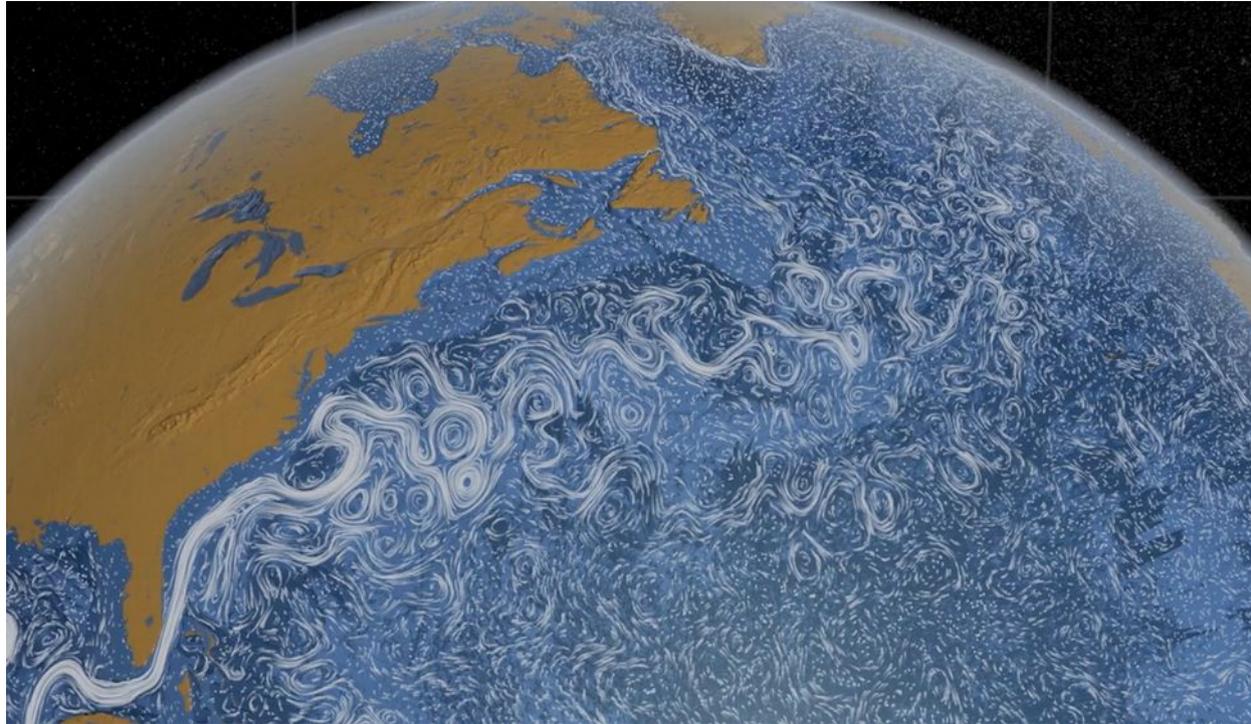
1978

1992 – present  
(e.g., Jason-1 & -2)

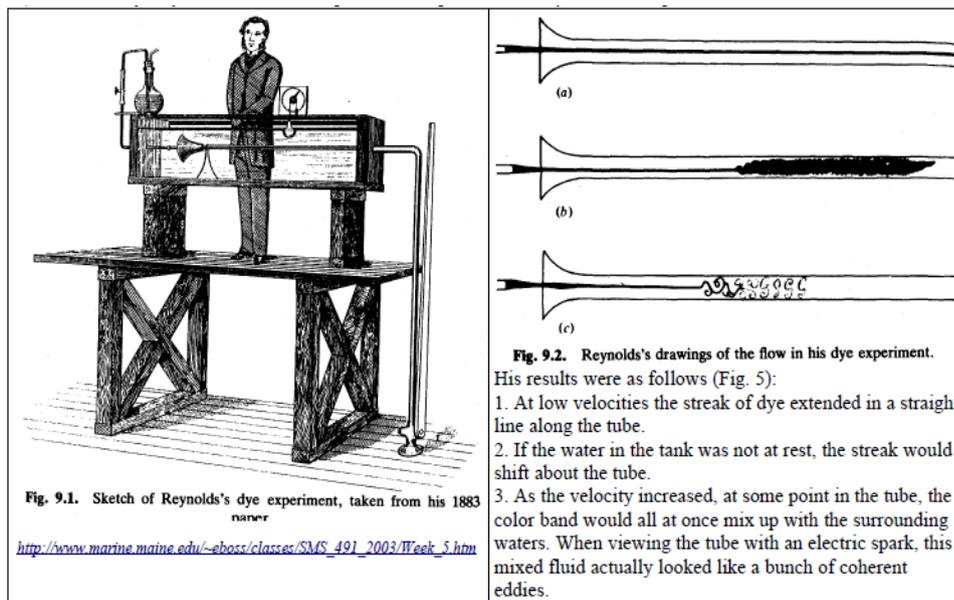
SWOT  
(launch 2021)

[ SKIM 2025 ]

# En mettant ensemble toutes ces infos...



Perpetual Ocean <https://svs.gsfc.nasa.gov/3827>



Un véritable  
comportement  
turbulent !

## De la méso- à la sousméso-échelle...

Les images satellite montrent une organisation de nombreuses structures de plus fine échelle au milieu des tourbillons de mésoéchelle:

**c'est de la sousmésoéchelle!**

*Processus de formation*

→ étirement du à la mésoéchelle

→ frontogénèse

→ cisaillement

→ localement  $Ro = \frac{\zeta}{f} \approx O(1)$

→ circulation agéostrophique 3D

avec composante verticale

non négligeable

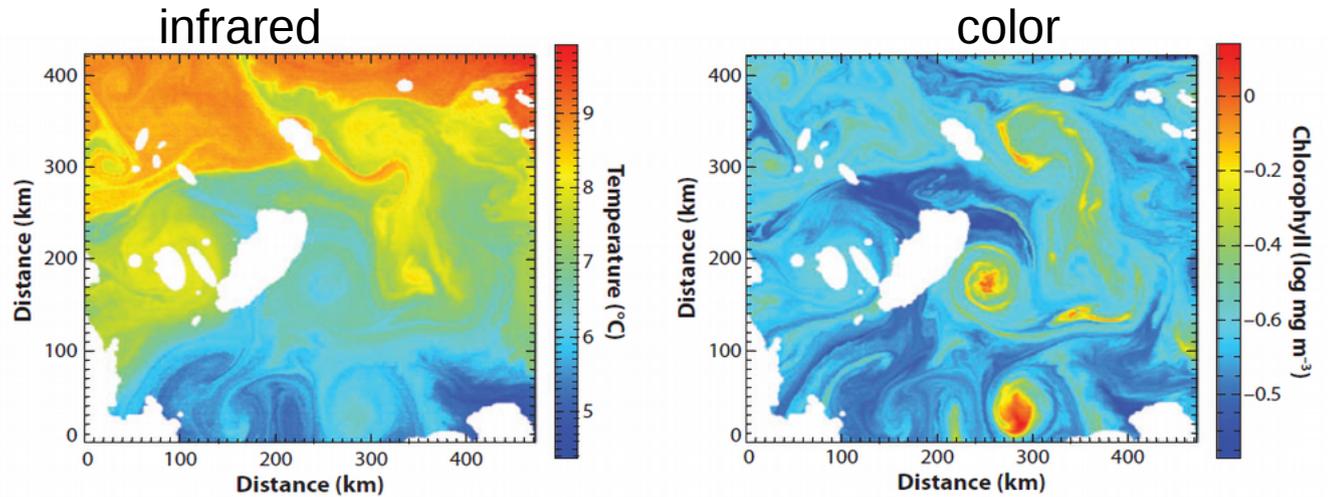
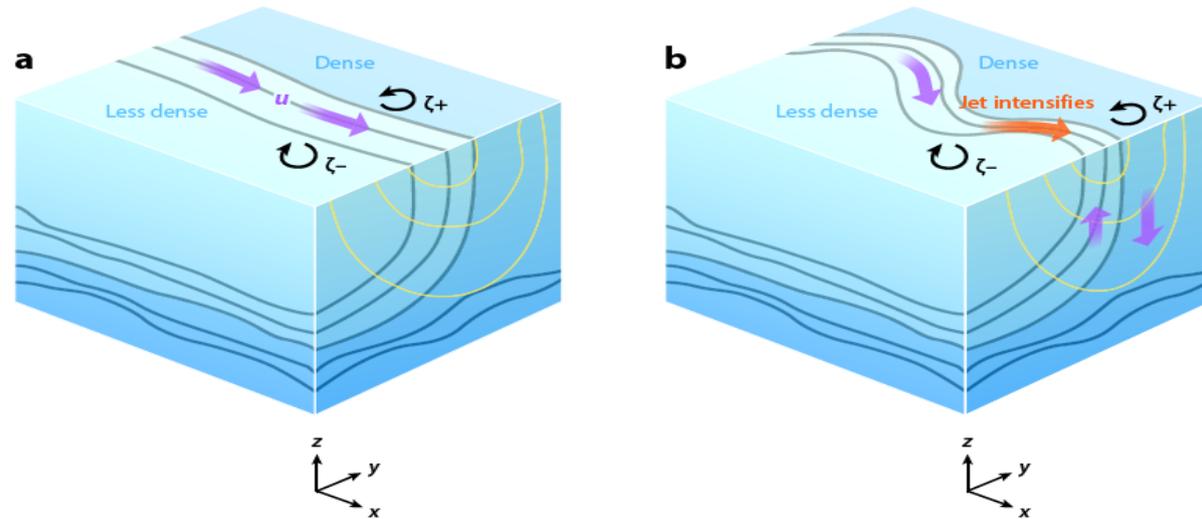


Figure 1

Sea surface temperature (*left*) and ocean color images (*right*) from satellite data (courtesy of Jordi Isern-Fontanet).

[Klein et Lapeyre, 2009]

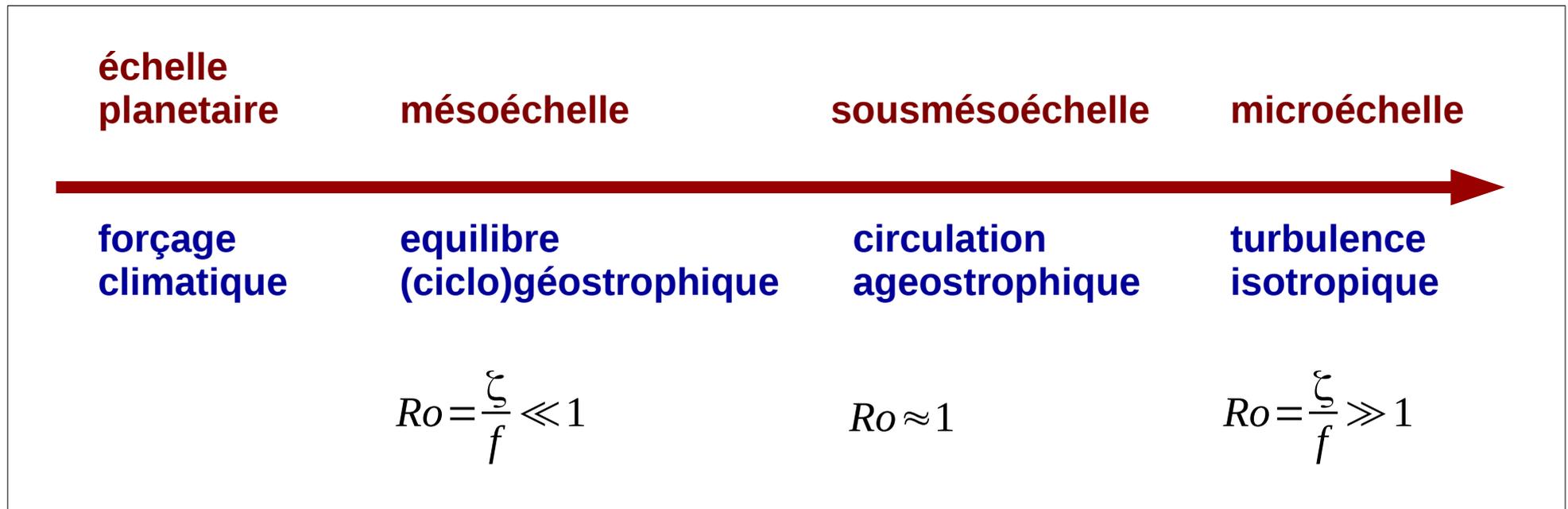


[Mahadevan 2016]

## ... de la sousmésos- jusqu'à la micro-échelle

Ferrari & Wunsch [2009]: difficulté d'observation et manque d'information dans gamme sousmésos-

Mahadevan [2016]: encore peu clair l'impact de la sousmésos- dans le fonctionnement de l'océan



[traduit et adapté depuis MCWilliams 2016]

# la turbulence, une longue histoire



**1508 -1513 Leonardo da Vinci**

*Le premier avec l'idée de séparer en 2 composantes un écoulement turbulent?*

Moyenne sur une période T

+

écart aléatoire par rapport à la moyenne

**1883-94 Osborne Reynolds**

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

Problème de la fermeture: comment calculer les termes  $\overline{u'_i u'_j}$  ?



**1877 Joseph Boussinesq : fermeture newtonienne**

$$\overline{u'_i u'_j} \simeq -K \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$$



Coefficient de viscosité due à la turbulence

**En océanographie :**

$K_h$  sur l'horizontale

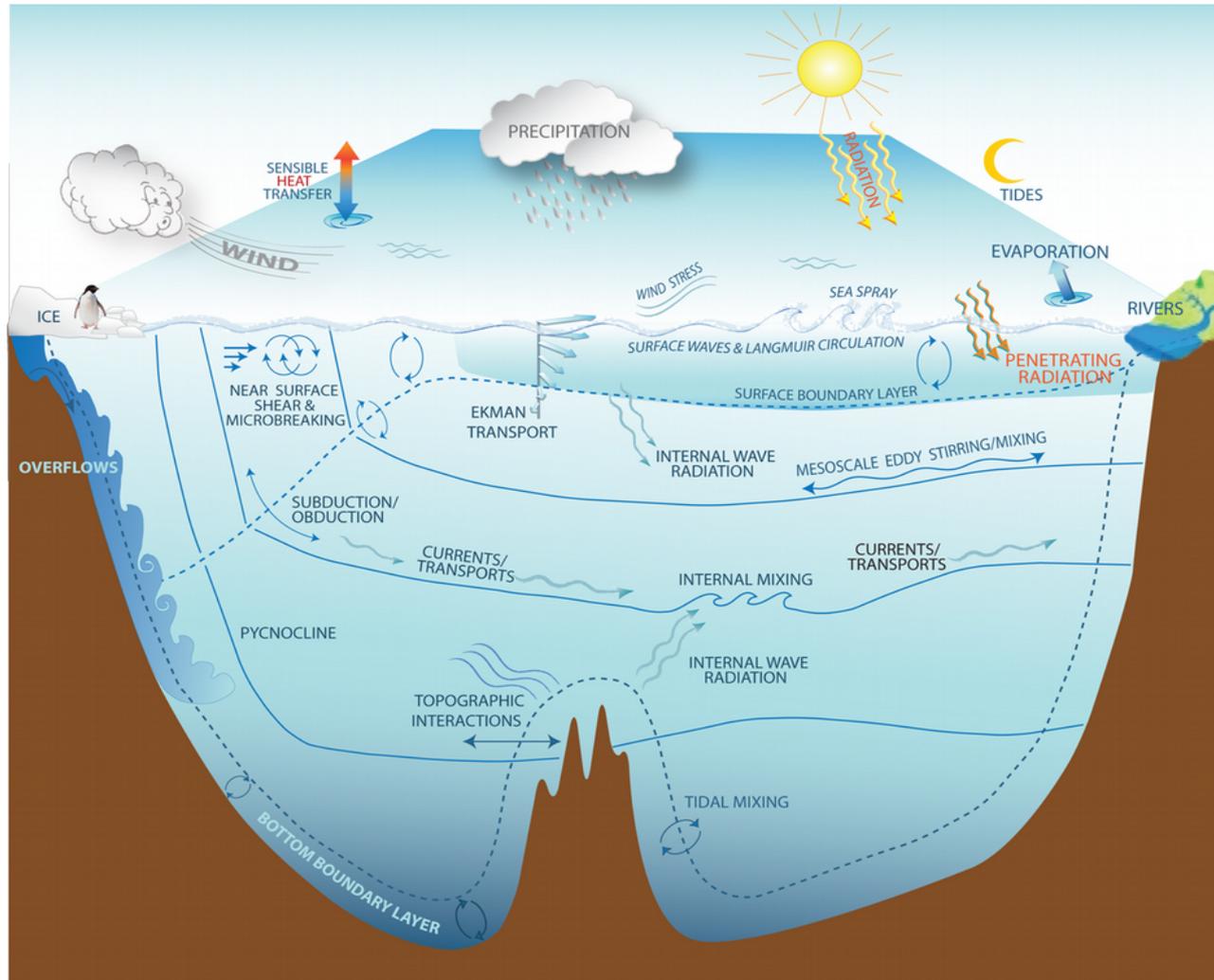
$K_z$  sur la verticale



# la turbulence, une question difficile

Grande variabilité, nombreux processus!

Très vaste littérature:  
estimation *in situ* des coefficients très complexe et forçement locale



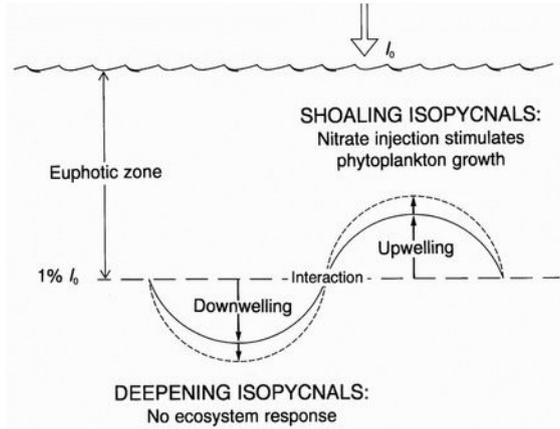
A schematic of the small scale mixing processes in the ocean

<https://www.gfdl.noaa.gov/ocean-mixing/>

# Couplage physique – biogéochimie – biologie

## À mésoéchelle

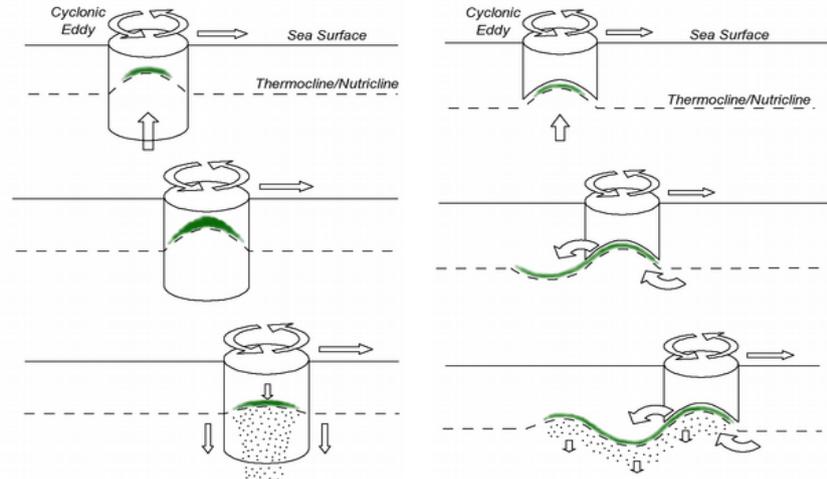
déformation de la nutricline  
par les tourbillons



[MCGuillicuddy et al. 1998]

“Close” Eddy

“Leaky bottom” eddy

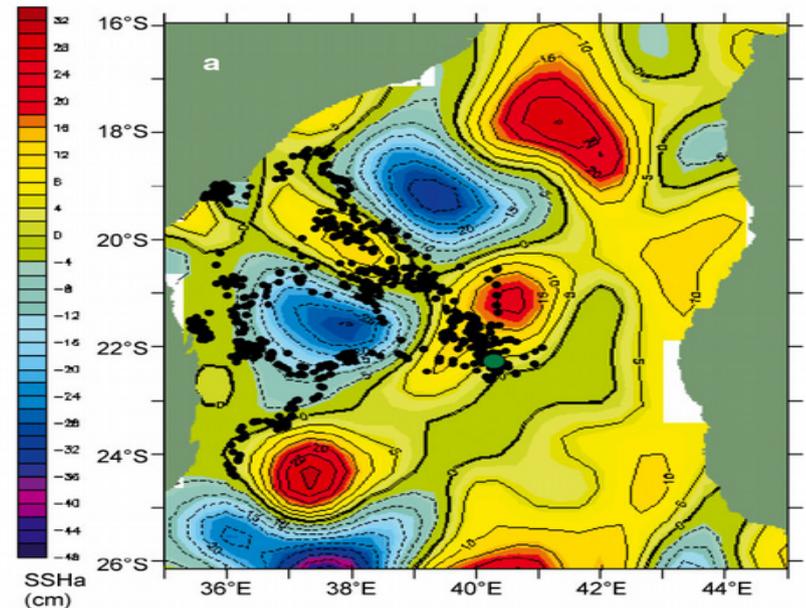


[Nencioli et al., 2008]

Et le signal se propage  
ensuite  
dans tout  
le réseau trophique!



**Foraging strategy of  
a top predator in  
tropical waters:  
great frigatebirds in  
the Mozambique  
Channel**



[Weimerskirch et al 2004]

# Couplage physique – biogéochimie – biologie

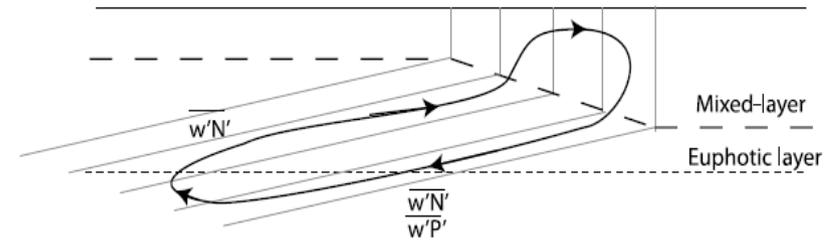
## À sousmésos- et micro-échelle:

- advection vers le haut de nutriments et vers le bas de matériel organique

- contrôle de sur la diffusivité impactant la production primaire

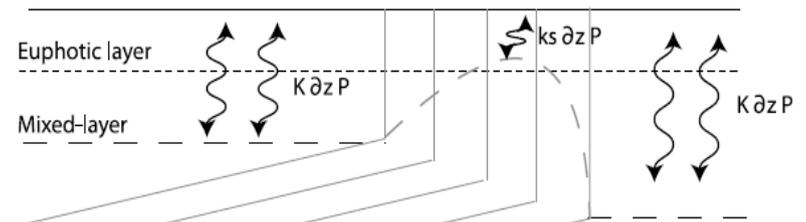
- création de “niches fluidodynamiques”

a) Transport at a submesoscale front

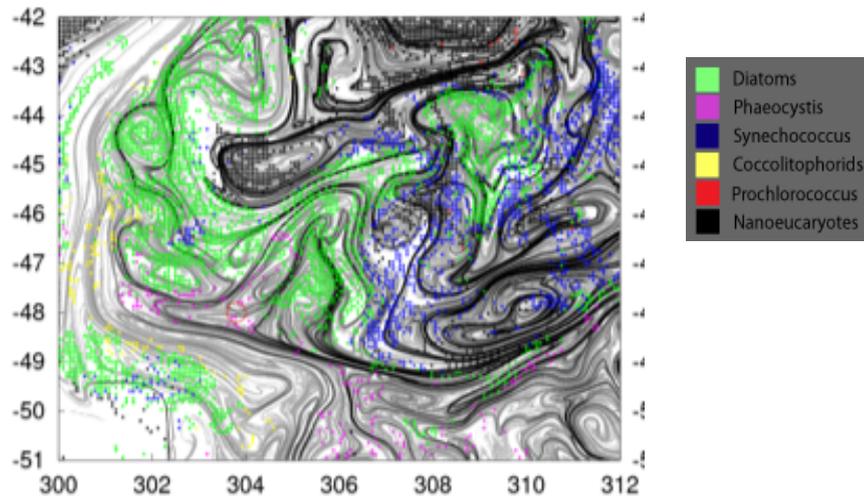


[Lévy, 2012]

b) Vertical mixing at a submesoscale front

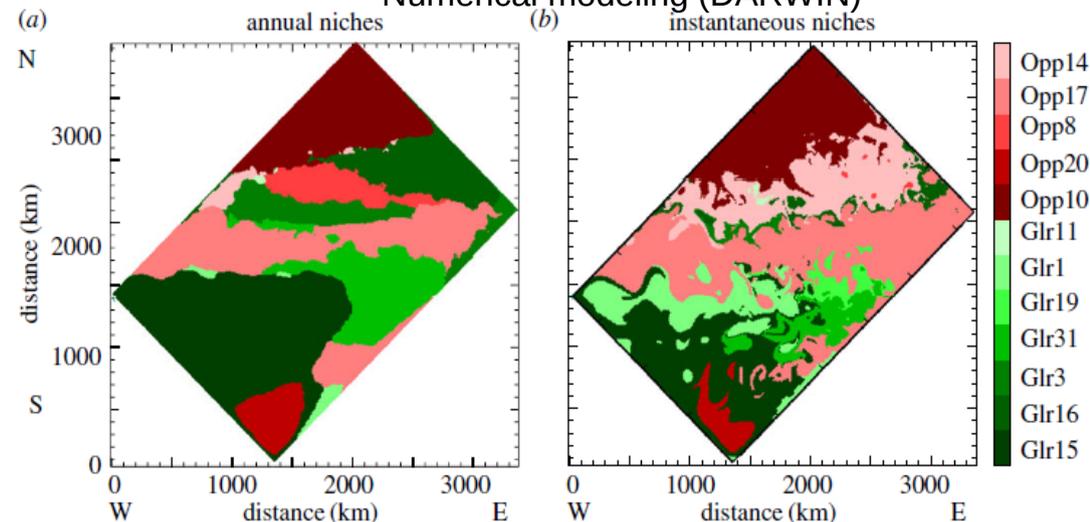


Satellite data (FSLE & Physat)



[d'Ovidio et al., 2010]

Numerical modeling (DARWIN)



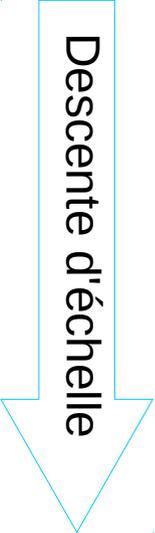
[Lévy et al. 2015]

# Thématiques de recherche

## *Océanographie Physique*

- 1) La dynamique des tourbillons de mésoéchelle et leur impact sur le transport
- 2) Les processus de la circulation à méso et sousmésoéchelle
- 3) Le mélange turbulent sur l'horizontale et sur la verticale

Descente d'échelle



## *Couplage Physique-Biogéochimie-Biologie*

- 1) le transport du plancton et la connectivité larvaire
- 2) l'impact de la (sous)mésoéchelle sur les blooms et la structure de la communauté phytoplanctonique
- 3) l'advection, la dispersion et la décantation de particules

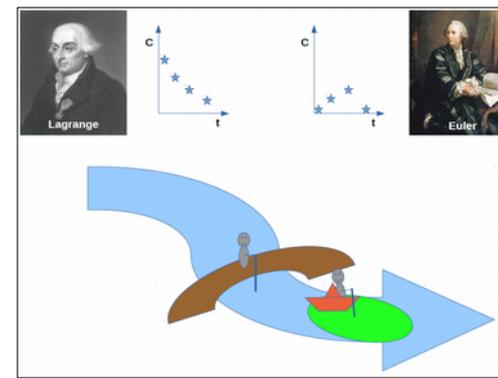
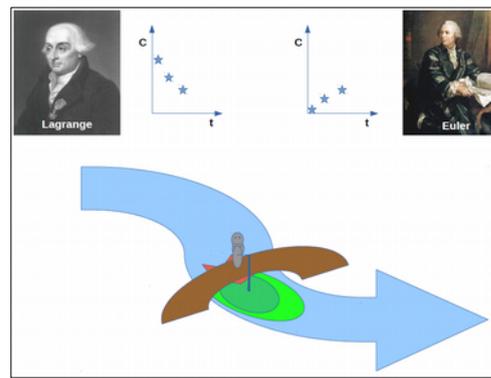
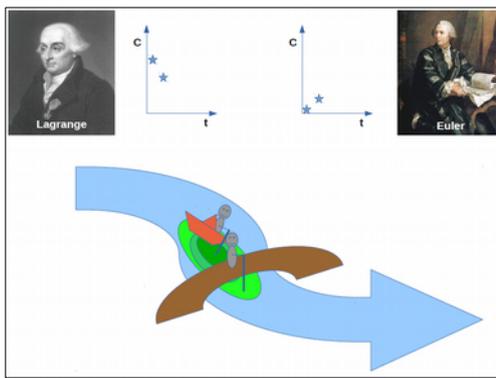
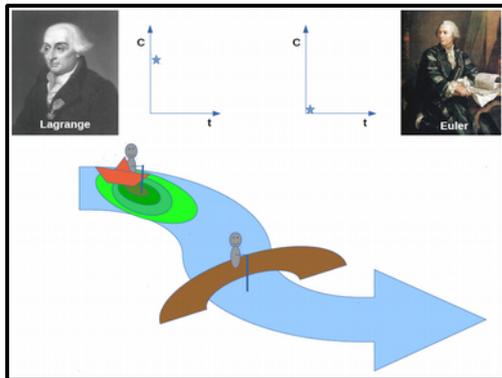
# Approches

## Lagrangienne **OU** Eulerienne?

Référentiel se déplaçant  
avec le fluide

$$\frac{Df}{Dt} = \frac{\partial f}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\text{grad}} f$$

Référentiel  
fixe



Lagrangienne **ET** Eulerienne!

# Méthodes

## Modélisation numérique



Implémentation modèles régionaux (POM,ROMS,SYMPHONIE,...)

Algorithme d'analyses automatiques des sorties (WATERS)

Diagnostiques Lagrangiens (LAMP3D-FOAM, ARIANE, ROFF, IBM)

Comparaisons de schémas de fermeture (mélange horizontale et verticale)

## Campagnes en mer



(9 embarquant + 2 chef mission + sorties enseignement)

ADCP, CTD, TSG, bouées, SCAMP, MVP, Cyto(!)

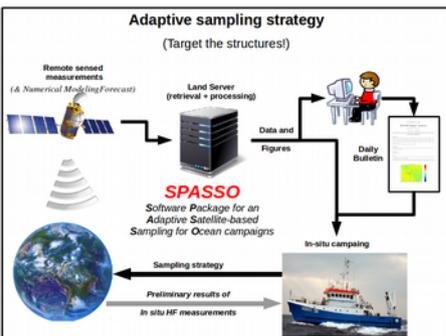
Stratégies adaptatives et Lagrangiennes (FSLE, SPASSO)

## Téledétection satellite

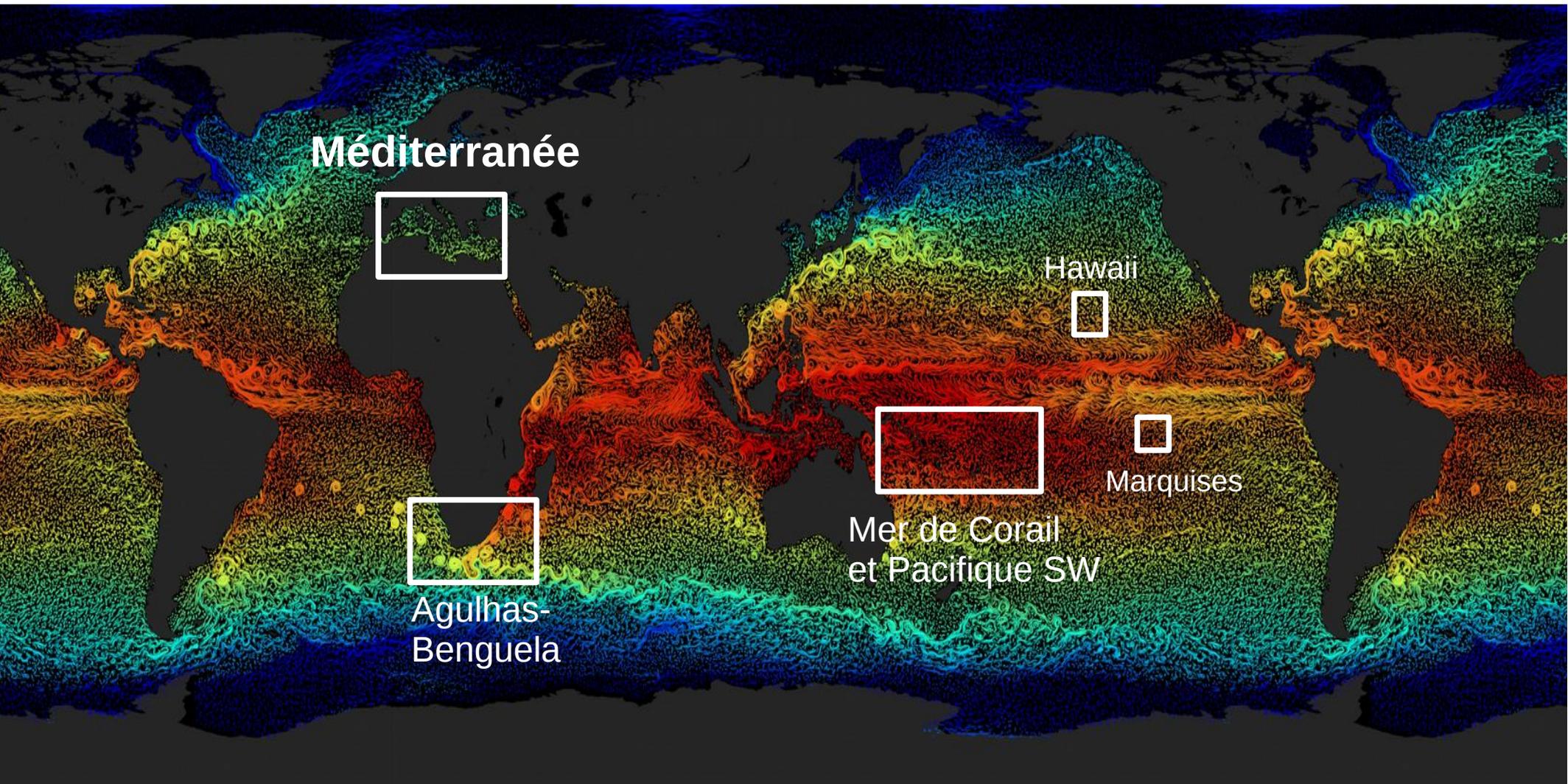
altimétrie, SST, couleur de l'eau

Analyse NRT et DT

CaVal produit de haut niveau



# Chantiers géographiques



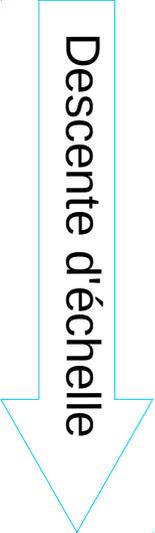
Courant et SST par satellite  
<https://svs.gsfc.nasa.gov/3827>

# Thématiques de recherche

## *Océanographie Physique*

- 1) La dynamique des tourbillons de mésoéchelle et leur impact sur le transport
- 2) Les processus de la circulation à méso et sousmésoéchelle
- 3) Le mélange turbulent sur l'horizontale et sur la verticale

Descente d'échelle

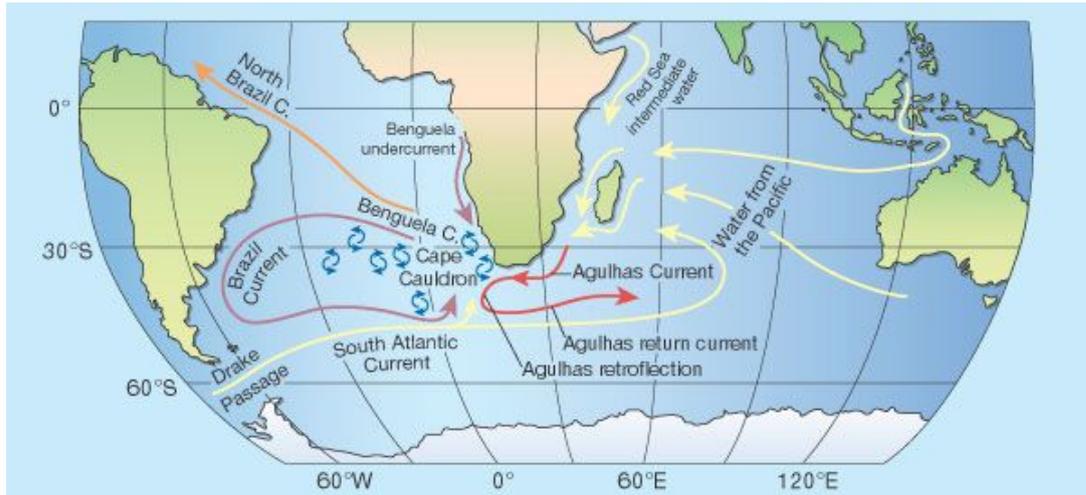


## *Couplage Physique-Biogéochimie-Biologie*

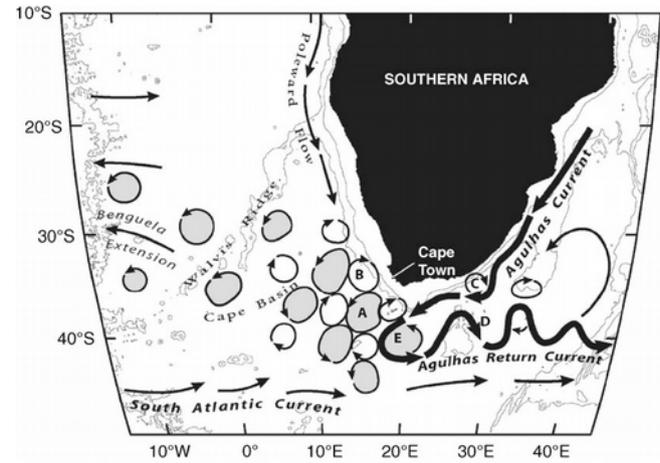
- 1) le transport du plancton et la connectivité larvaire
- 2) l'impact de la (sous)mésoéchelle sur les blooms et la structure de la communauté phytoplanctonique
- 3) l'advection, la dispersion et la décantation de particules

1) Dynamique des tourbillons de mésoéchelle et leur impact sur le transport

# Les Anneaux des Aiguilles

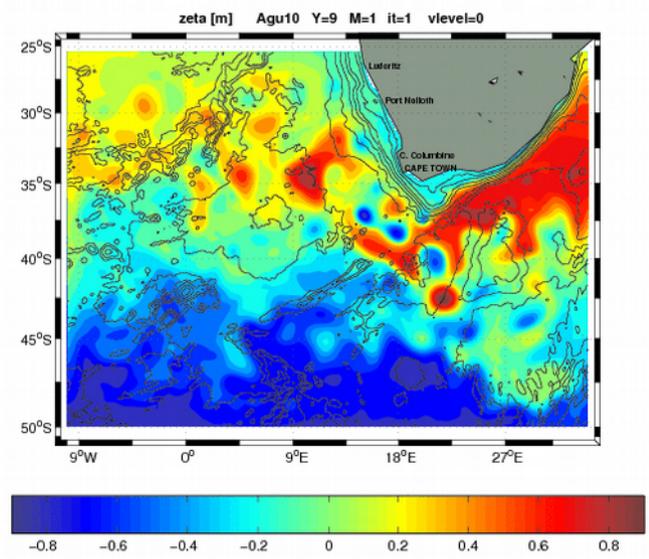


[Gordon 2003]

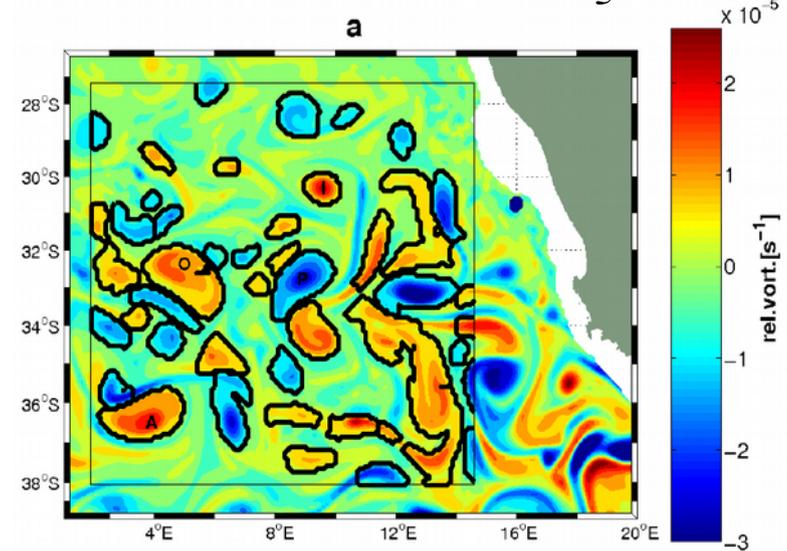


[Richardson 2007]

Config ROMS climatologique 1/10°

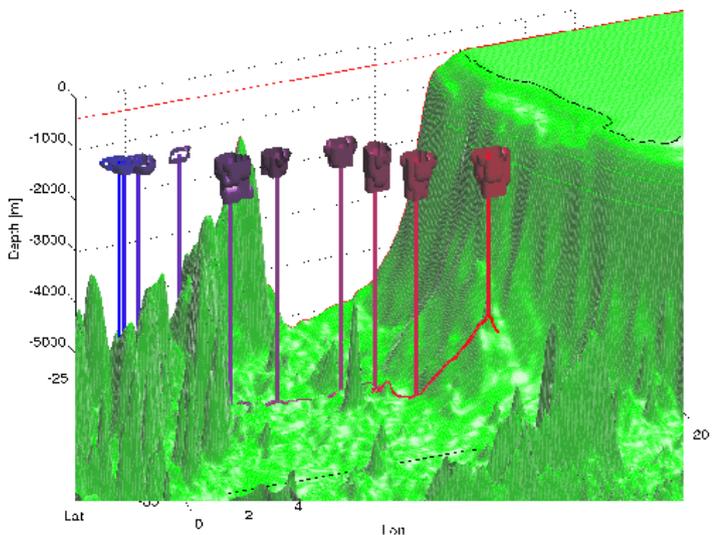
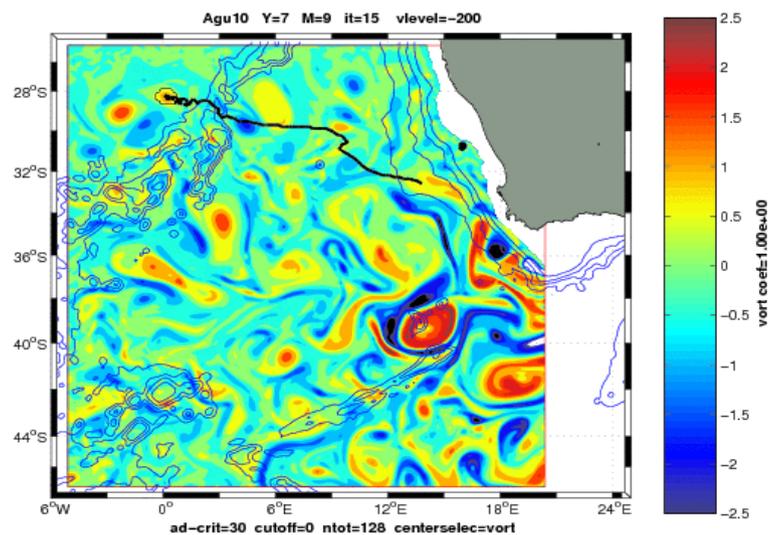


Identification des tourbillons par analyse en ondelettes de  $\zeta$

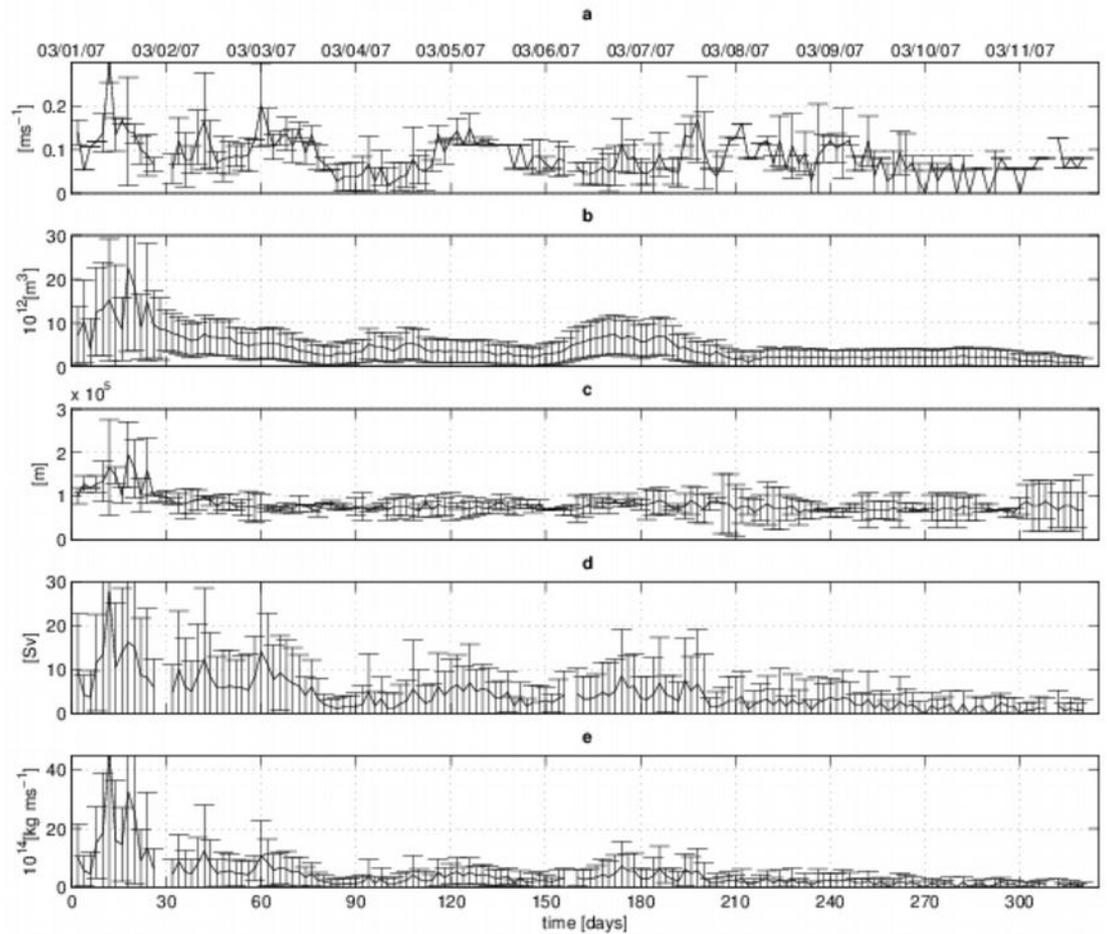


1) Dynamique des tourbillons de mésoéchelle et leur impact sur le transport

# Les Anneaux des Aiguilles



Suivi temporel et estimation du volume et du transport pour chaque tourbillon



[Doglioli et al., JGR, 2007]

# Les Anneaux des Aiguilles

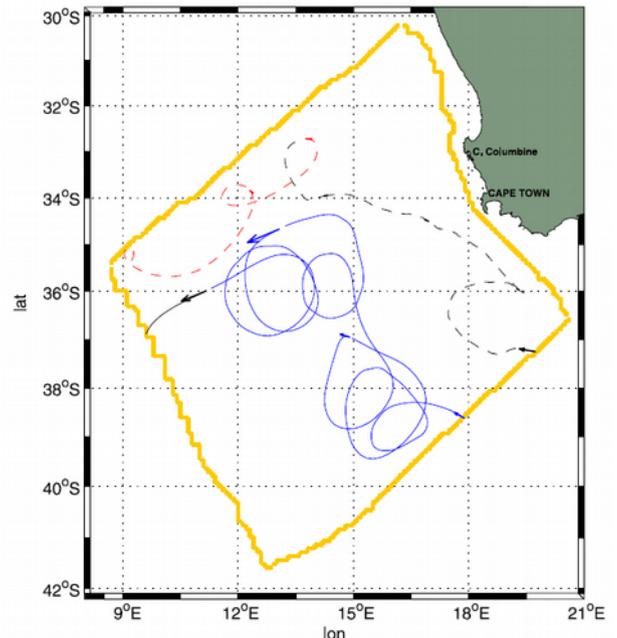
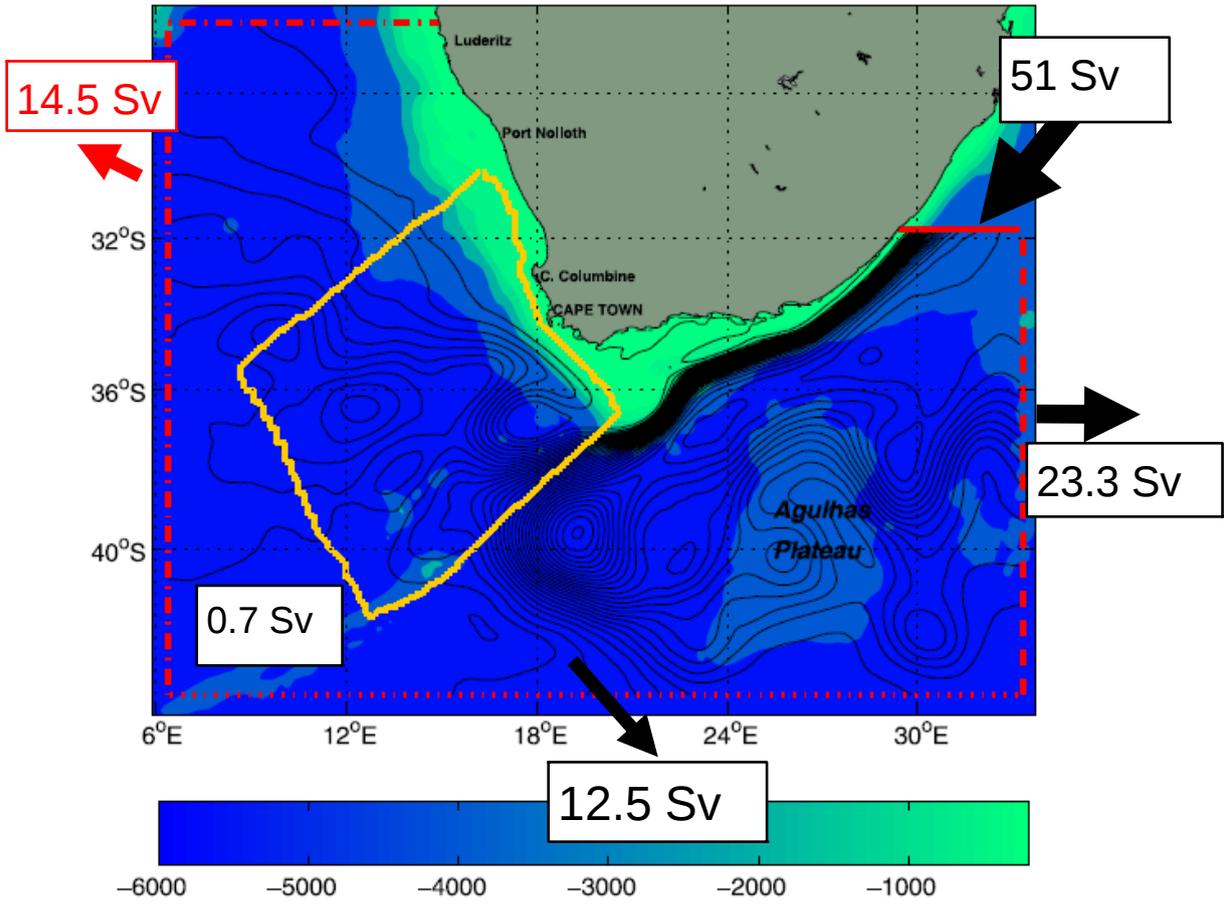


Figure 2. Trajectories of two particles (solid and dotted lines). The color code is based on the chunk regime: nonlooper (black), cyclonic (red) and anticyclonic (blue). A velocity vector is reported at the beginning of each chunk.

Analyse Lagrangienne du transport  
 ARIANE [Blanke et Raynaud, 97] +  
 analyse en Spin [Veneziani et al., 2005]

$$\Omega = \frac{\langle u' dv' - v' du' \rangle}{2 \Delta t EKE},$$

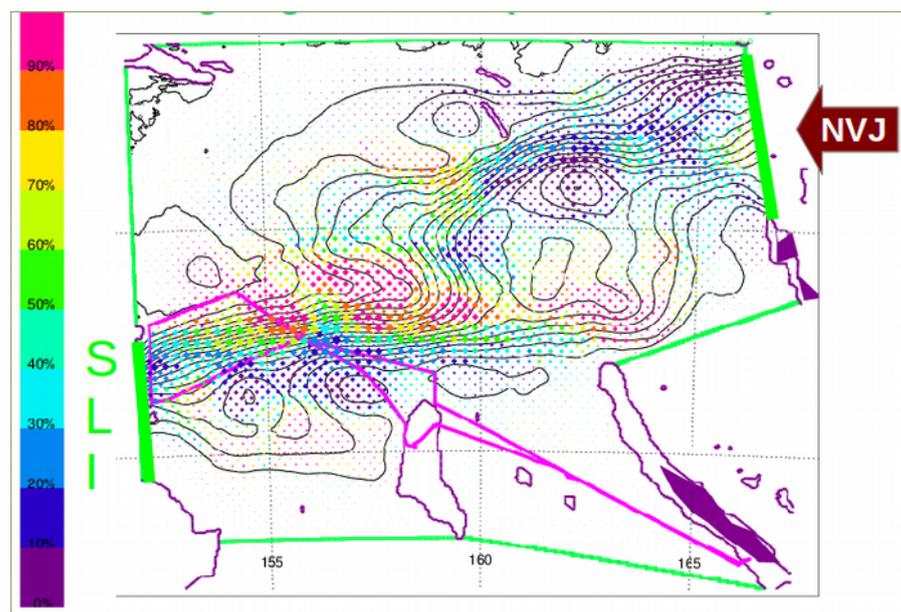
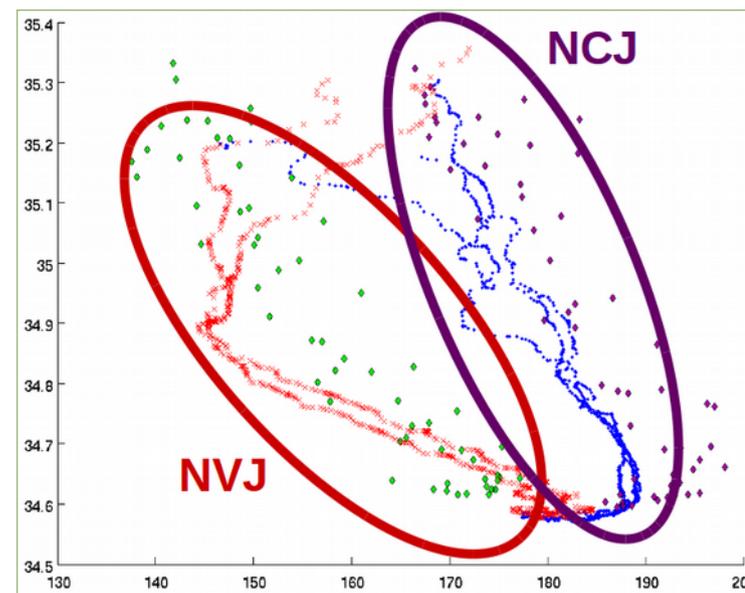
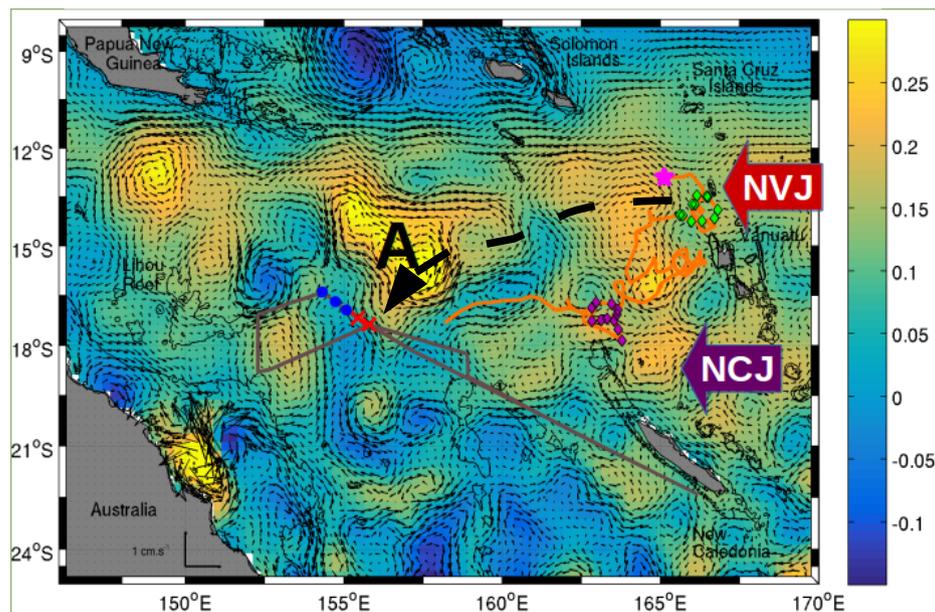
- Tourbillons: ~30% de la connexion
- Anticyclones ~1.9 Sv
- Cyclones ~2.5 Sv

[Doglioli et al., GRL, 2006]

# 1) Dynamique des tourbillons de mésoéchelle et leur impact sur le transport

## Mer de Corail

Campagne BIFURCATION [Maes 2012]:



**Des eaux du NVJ en zone NCJ ... pourquoi ?!**

Suivi avec l'altimétrie: l'anticyclone fait la connexion!

Analyse ARIANE des sorties NLOM et MERCATOR confirme:

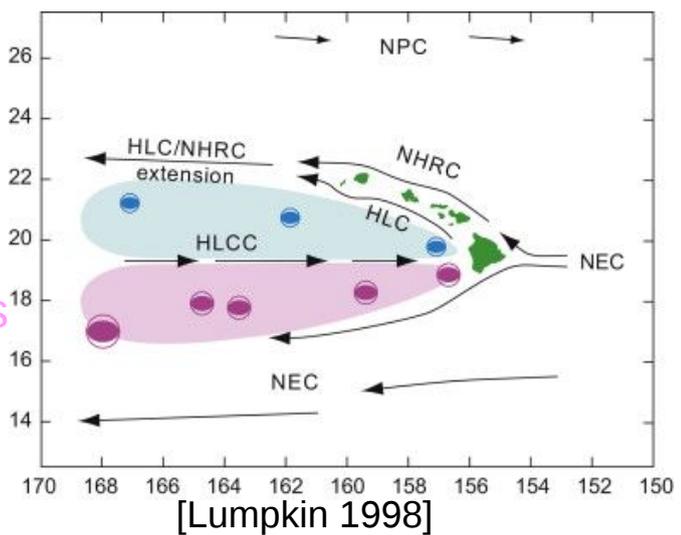
- la connexion existe et
- 70% à 90% est due aux anticyclones

[Rousselet et al, JGR 2016]

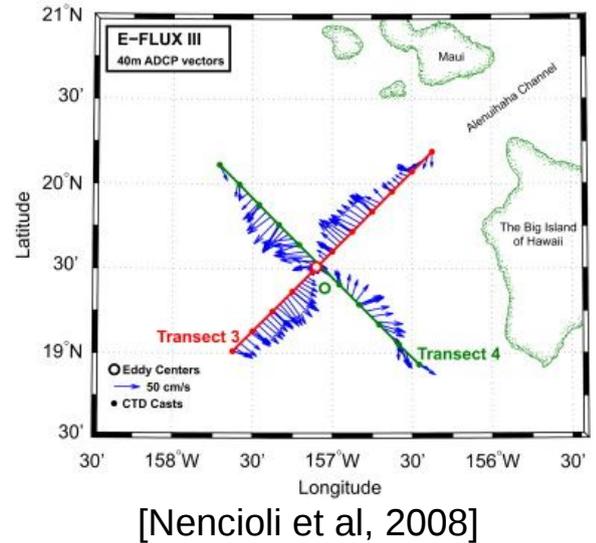
2) Les processus de la circulation à méso et sous-mésoéchelle

# Archipel d'Hawaii

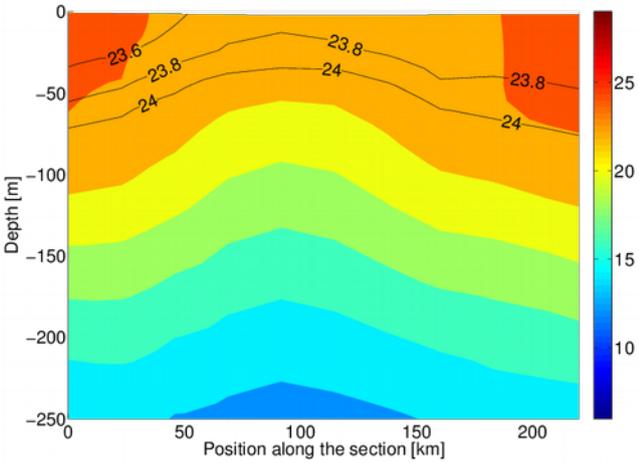
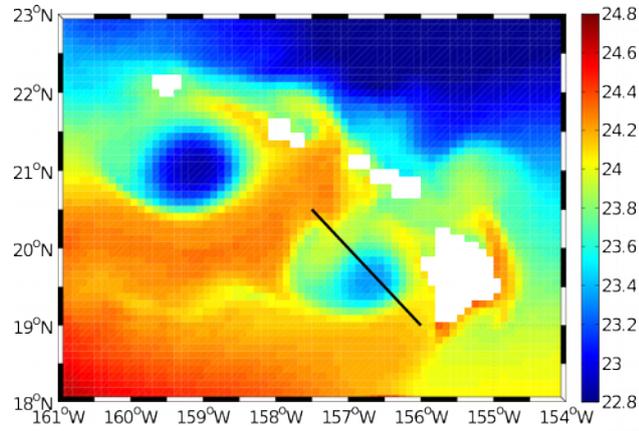
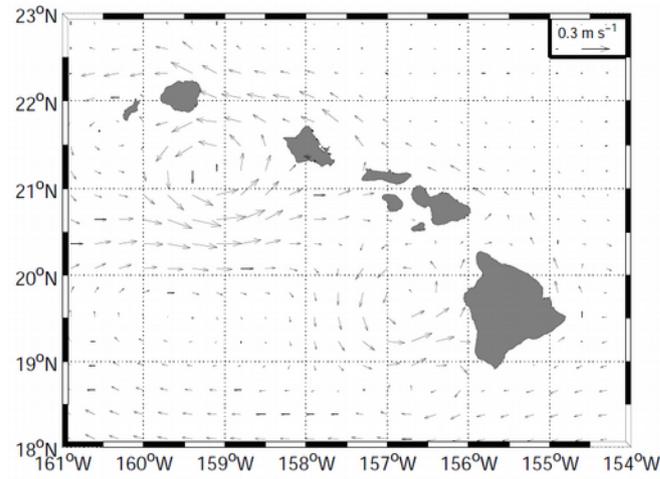
Cyclones  
Anticyclones



Campagnes E-FLUX:  
Étude du cyclone Opal



Étude de la génération de cyclones par simulations numériques ROMS:  
effet cumulatif (vent + NEC + topographie)



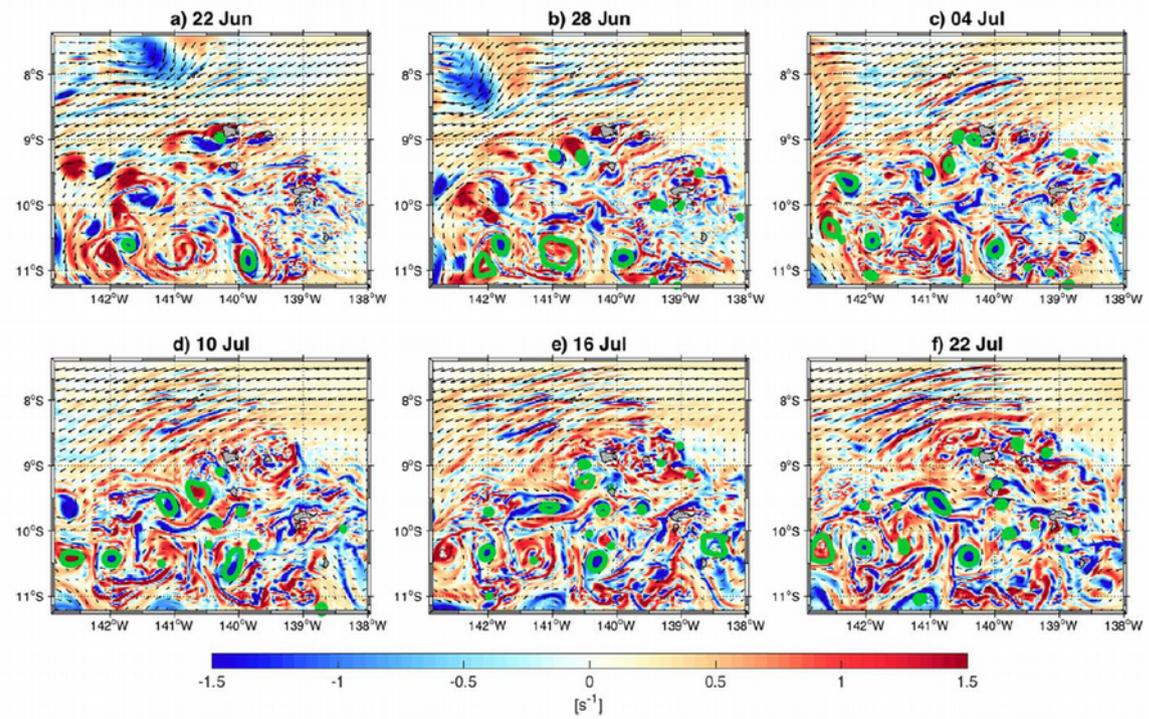
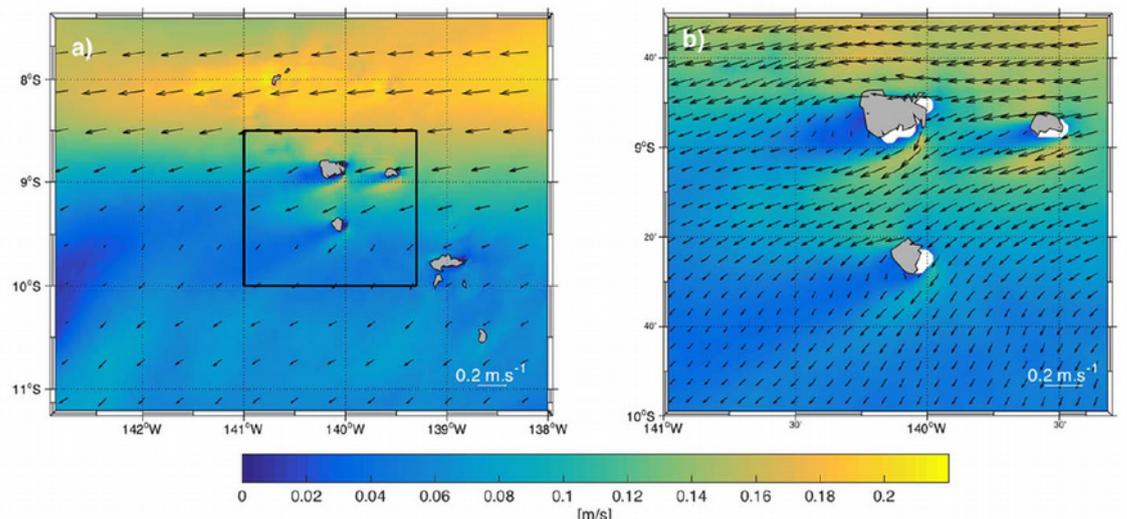
[Kersale et al, OS 2011]

2) Les processus de la circulation à méso et sous-mésoéchelle

# Archipel des Marquises

Étude de la génération de cyclones par simulations numériques ROMS:

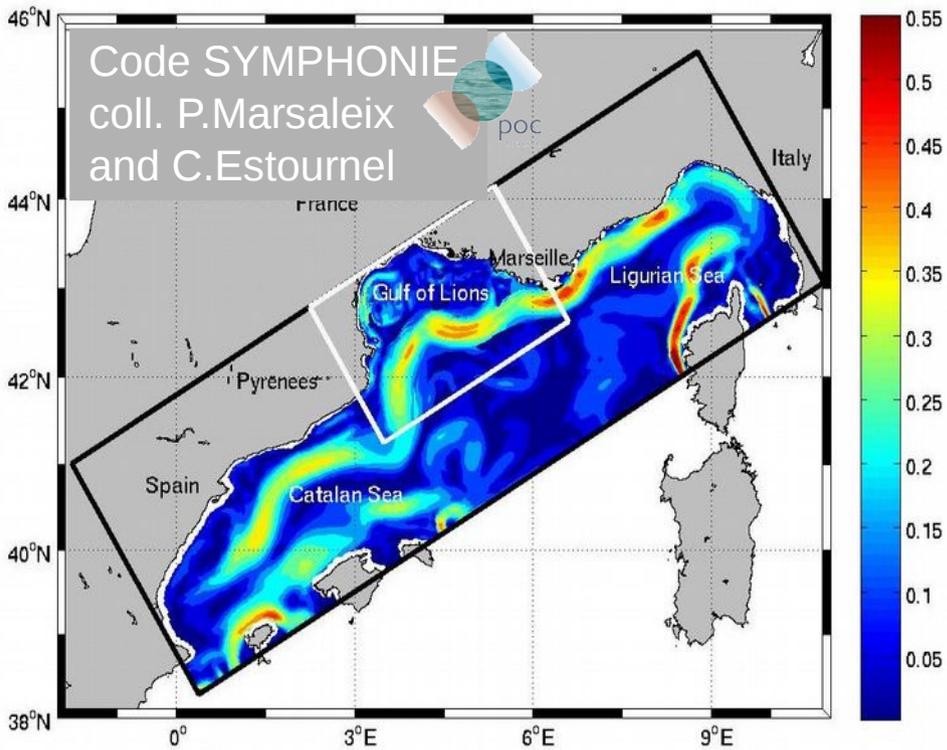
- Max d'activité tourbillonnaire en hiver
- plus de cyclones
- $w$  importantes
- piégeage et advection des eaux côtières



[Raapoto et al, JGR 2018]

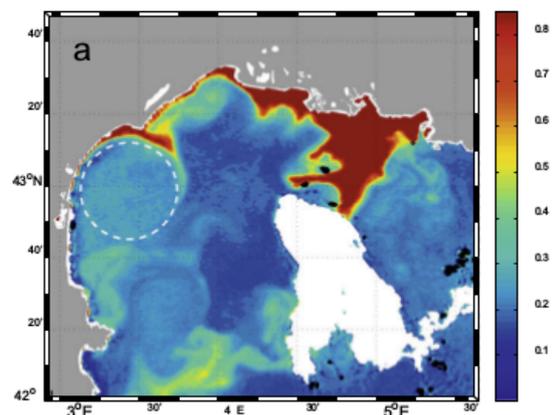
2) Les processus de la circulation à méso et sous-mésoéchelle

# Golfe du Lion

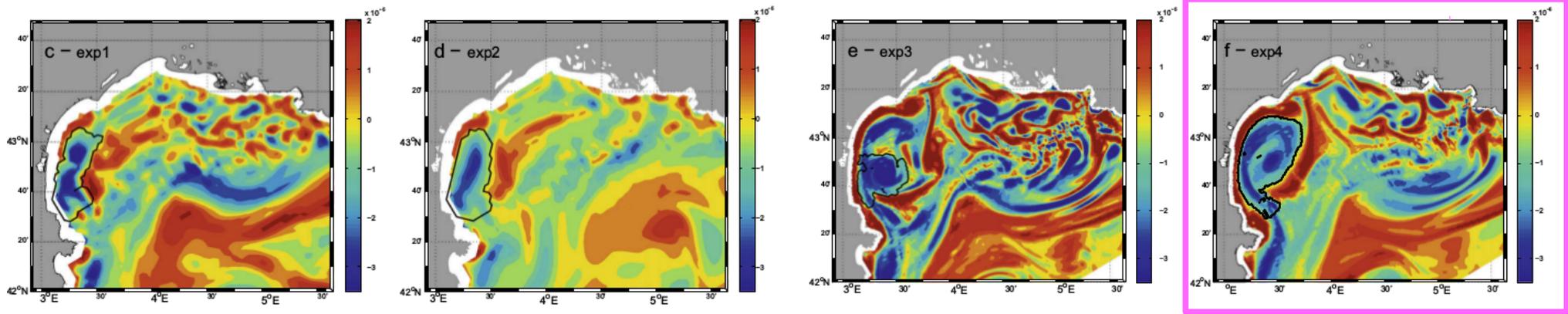


Tests sensibilité sur résolution et diffusivité par schéma *upwind*

Prenant comme référence une image satellite de CHL

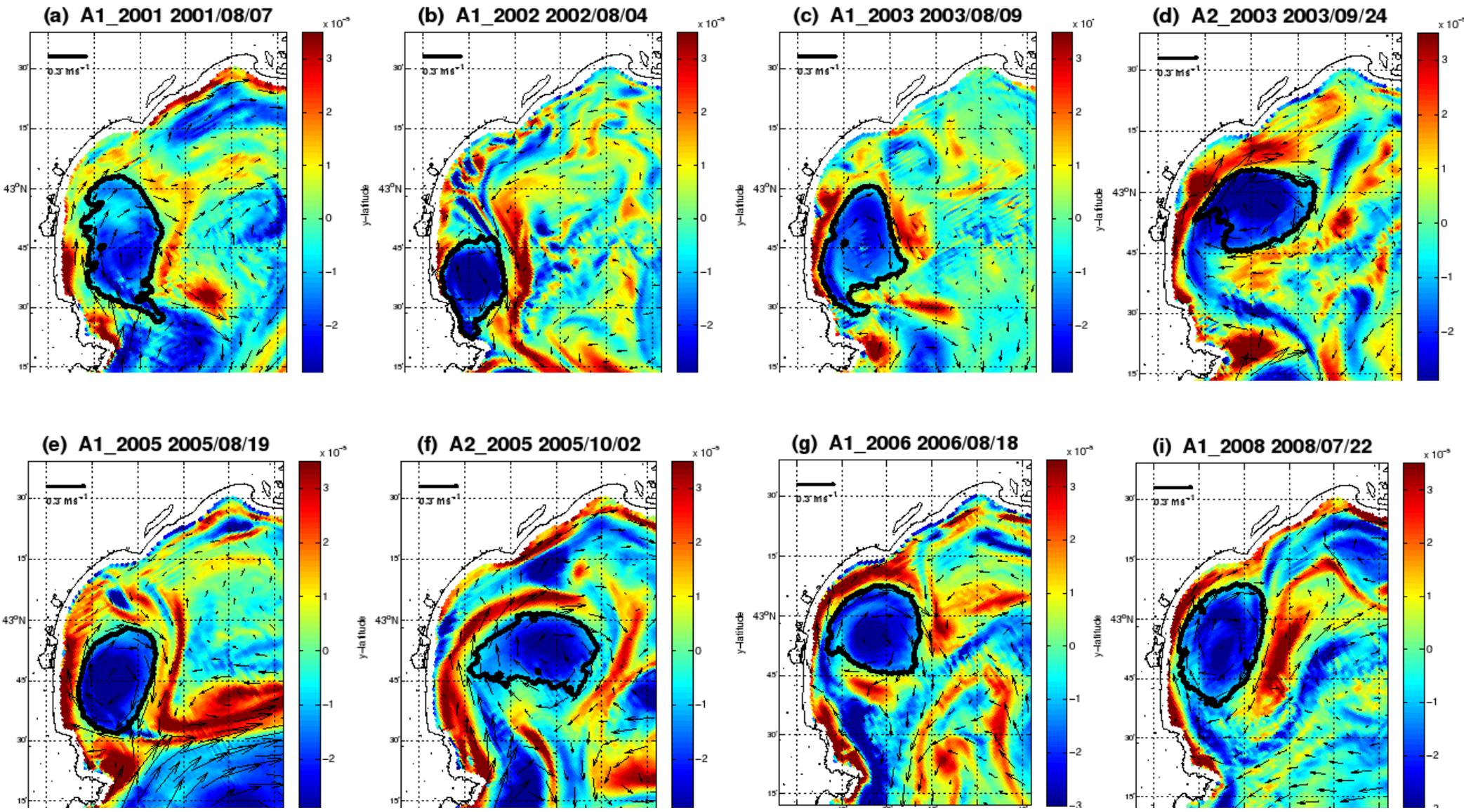


identification de la meilleure configuration



# 2) Les processus de la circulation à méso et sous-mésoéchelle

## «Bestiaire» des tourbillons du GoL



[Hu et al., JGR, 2011]

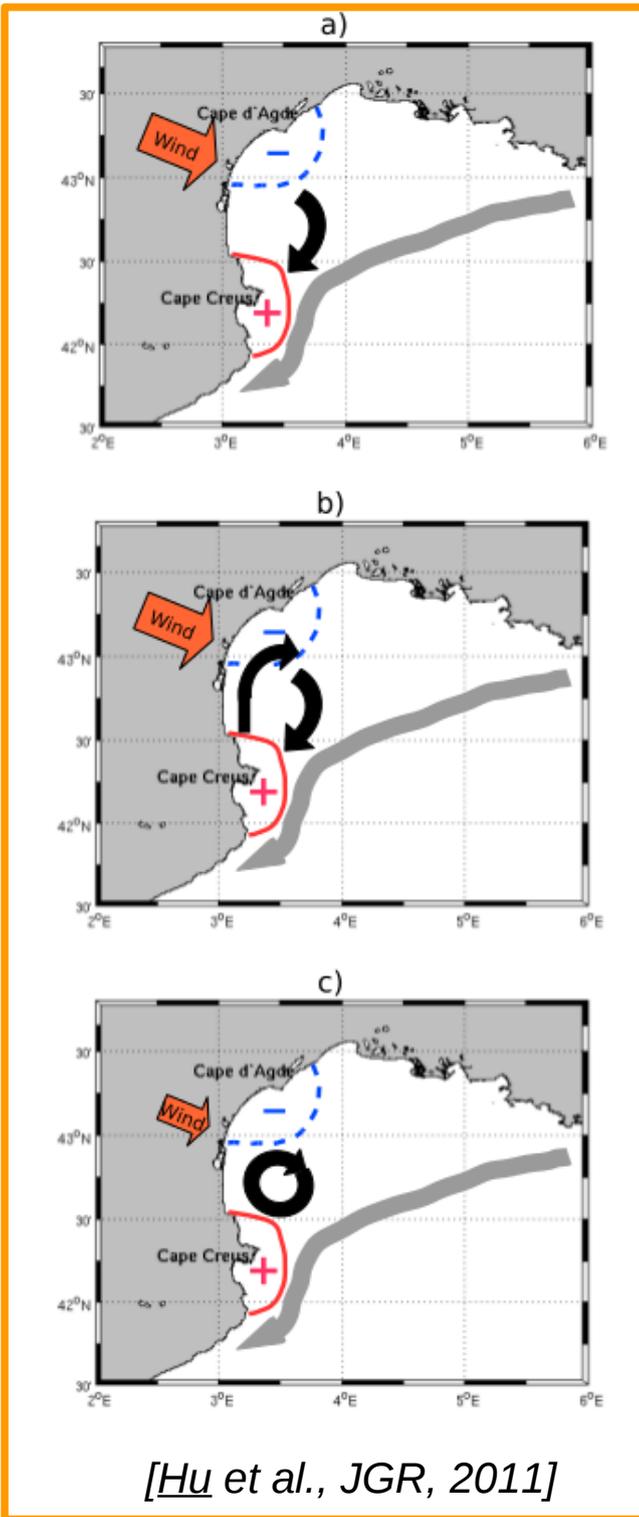
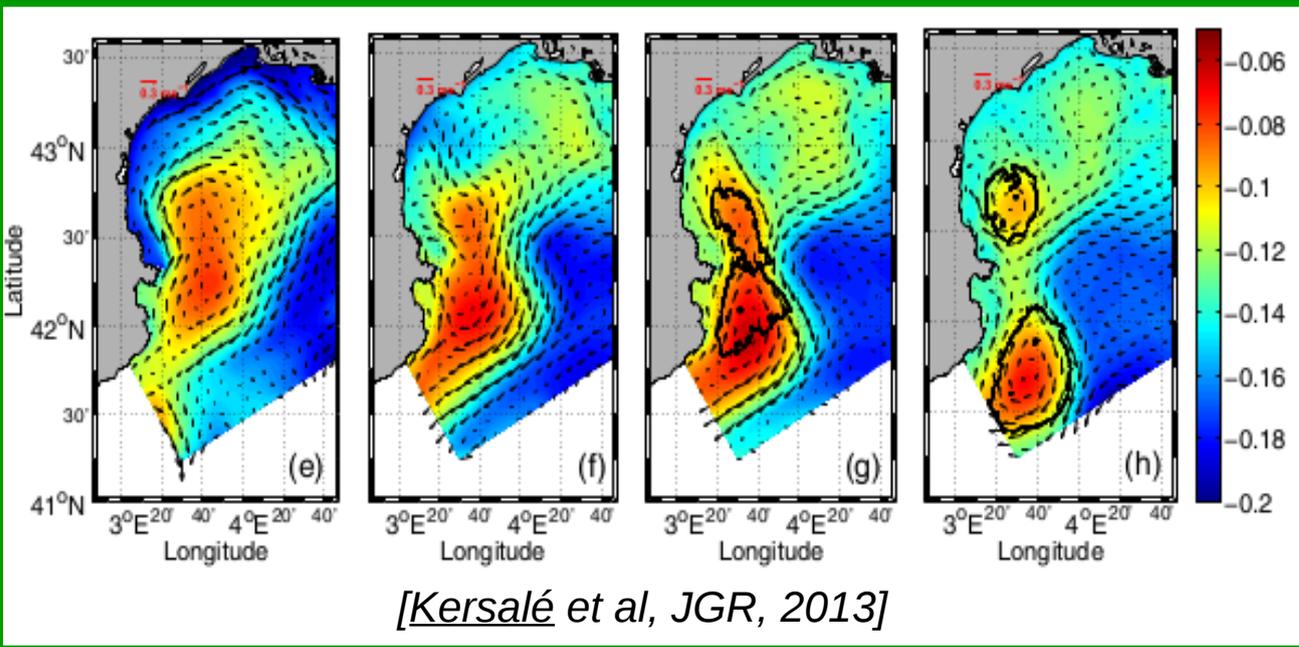
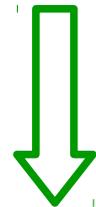
## 2) Les processus de la circulation à méso et sous-mésoéchelle

### Mécanismes de formation des tourbillons dans l'ouest du Golfe du Lion:

i) relaxation après vent fort et/ou persistant en période stratifiée



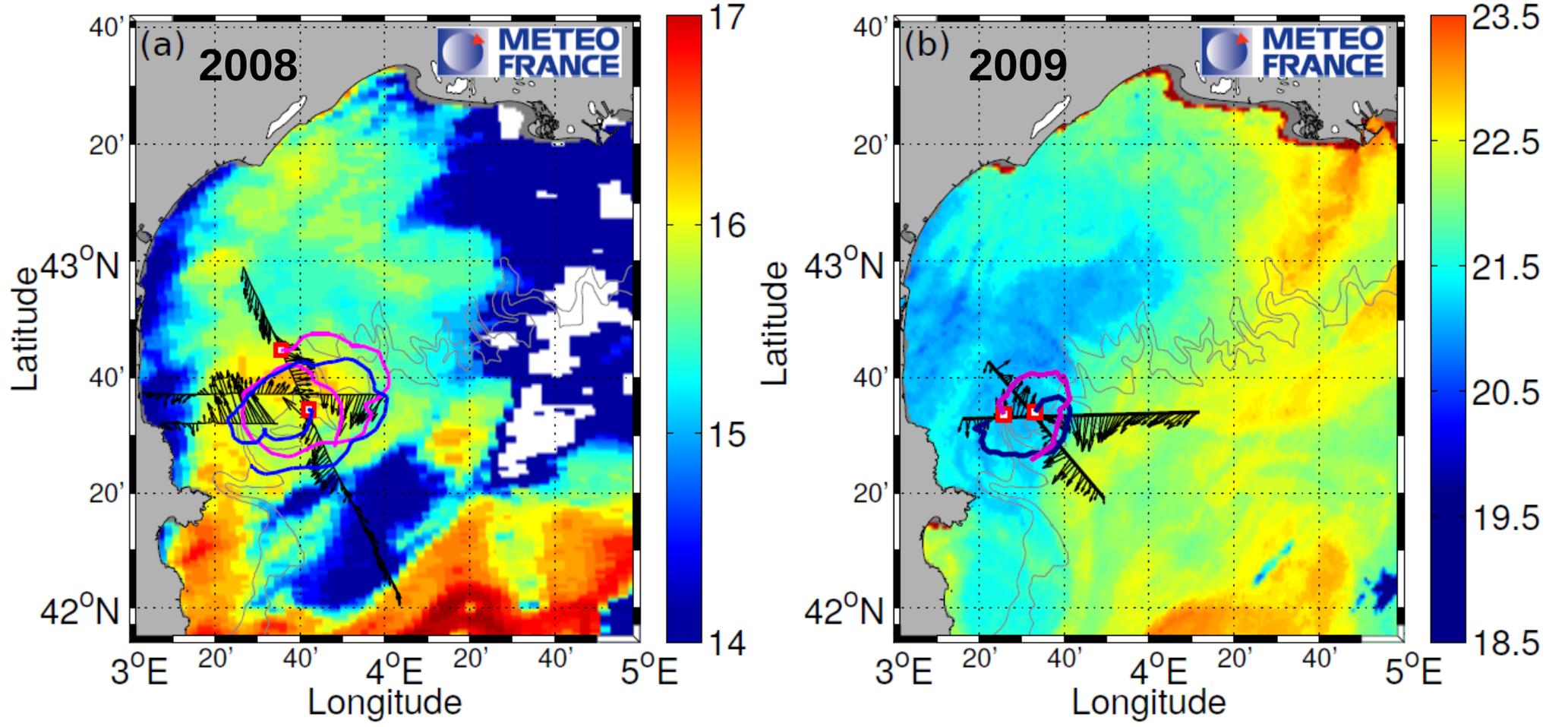
ii) séparation de circulation anticyclonique



2) Les processus de la circulation à méso et sous-mésoéchelle

Campagnes Latex08 et Latex09 [Petrenko 2008, 2009]

Observations des tourbillons confirmant les prévisions du modèle

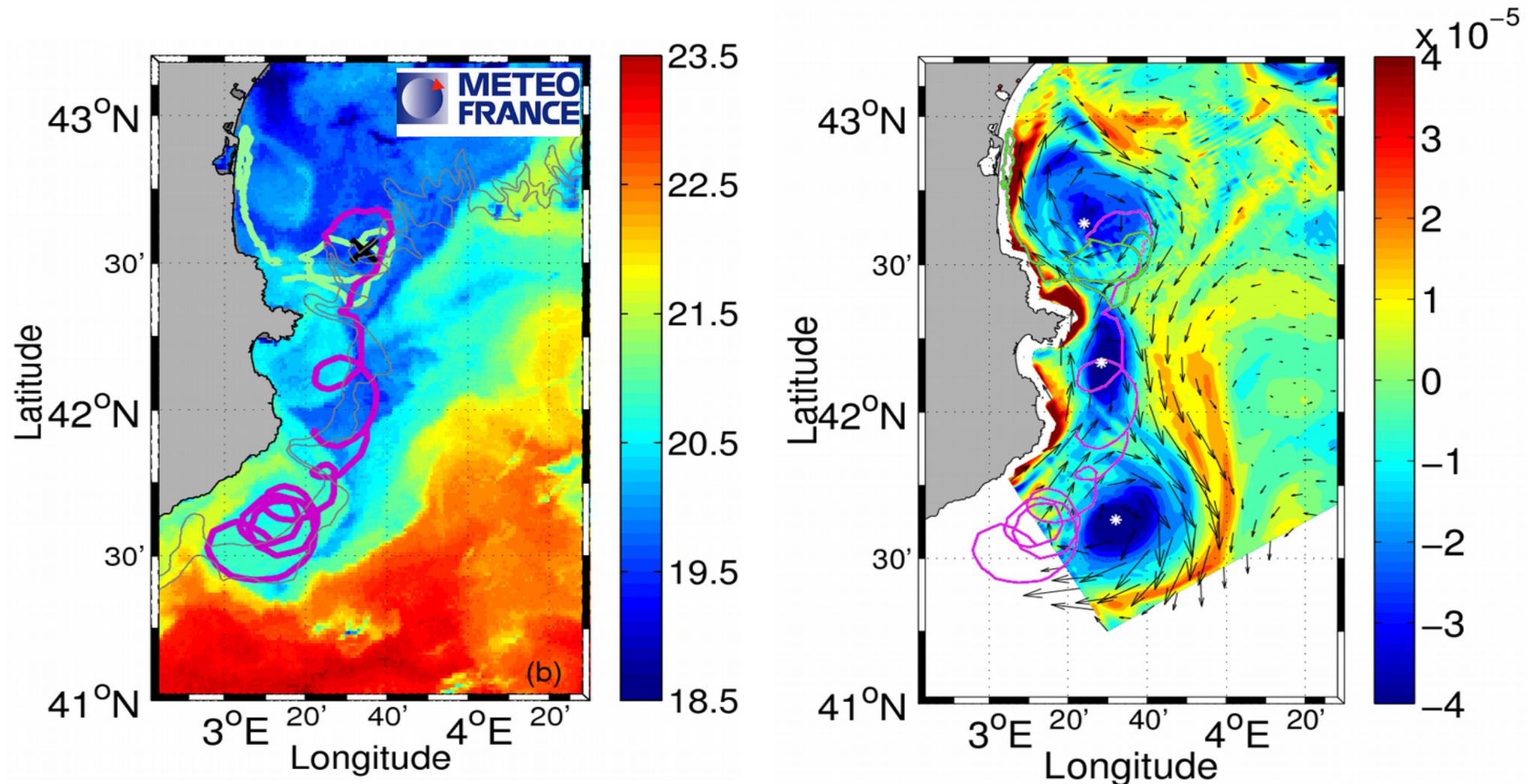


[Hu et al, JMS 2011; Kersalé et al, JGR 2013; Petrenko et al, OD 2017]

## 2) Les processus de la circulation à méso et sous-mésoéchelle

### Campagne Latex09 [Petrenko 2009]

Trajectoires des bouées expliquées grâce au modèle



[Kersalé et al, JGR 2013; Petrenko et al, OD 2017]

## Campagne Latex10

**Tethys II**  
[Petrenko 2010]



**Le Suroît**  
[Quéguiner 2010]



Stratégie adaptative et lagrangienne basée sur analyse en temps réel de :

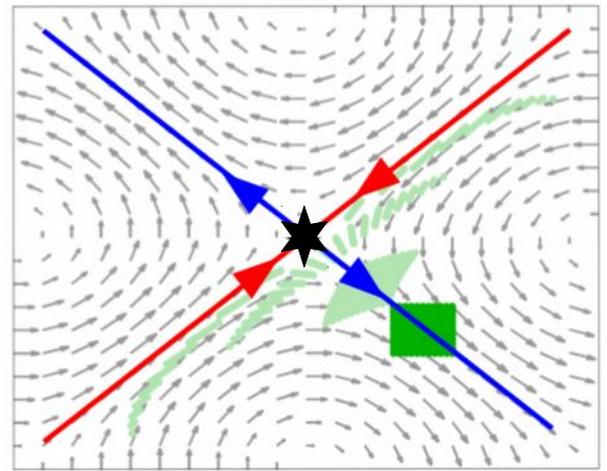
- données in situ (ADCP, bouées, gliders)
- images satellites (SST, couleur, altimétrie)
- modèle numériques et opérationnels

**En absence de tourbillon dans les eaux françaises,  
un filament a été étudié  
identifié par analyse en Exposants de Lyapunov**

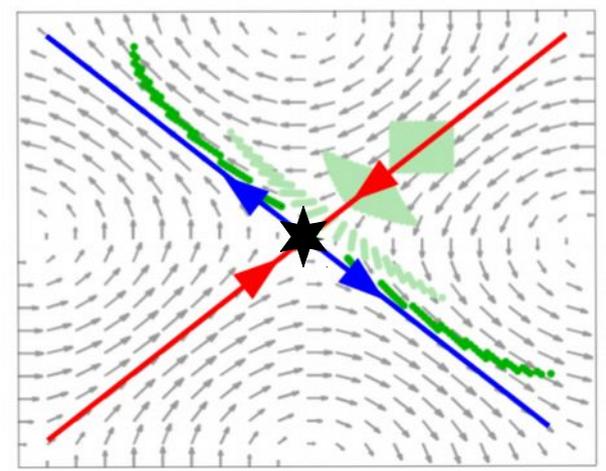
2) Les processus de la circulation à méso et sous-mésoéchelle

### Campagne Latex10 [Petrenko 2010] Structure Lagrangiennes Cohérentes

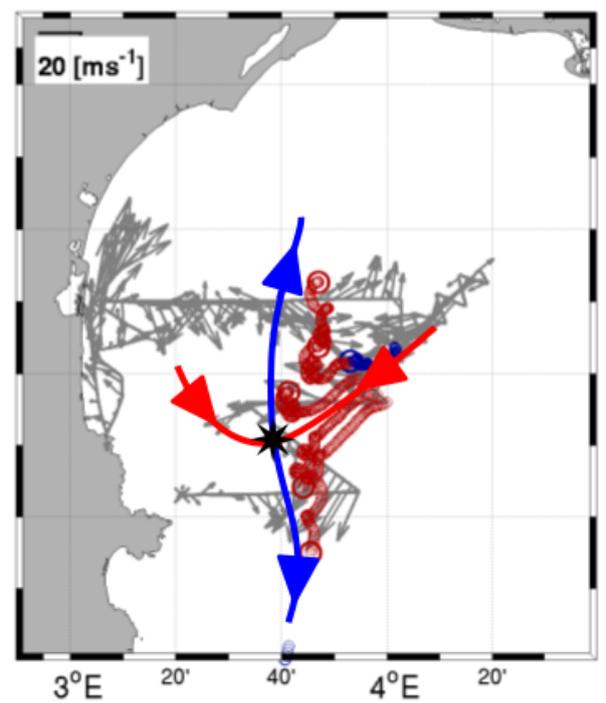
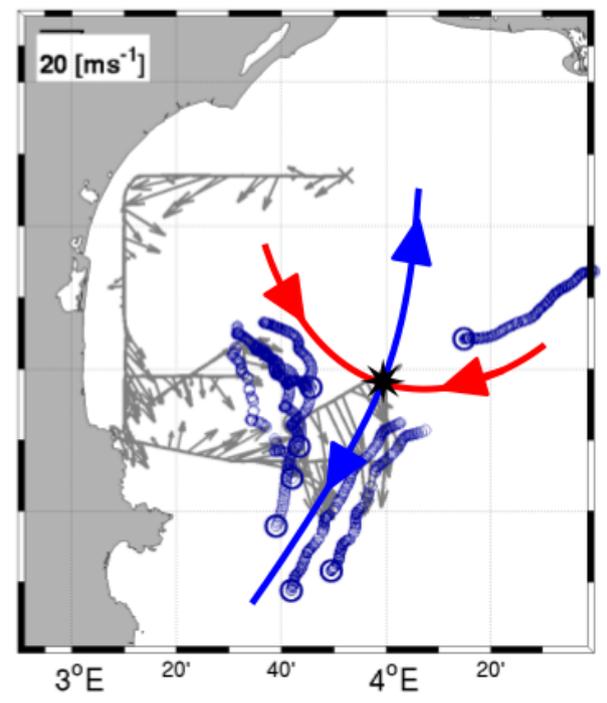
**attractive**  
les particules s'éloignent du point hyperbolique en convergeant



**repulsive**  
les particules se propagent vers le point hyperbolique en s'étirant



LCS identifié *in situ* et suivi pour ~2 semaines



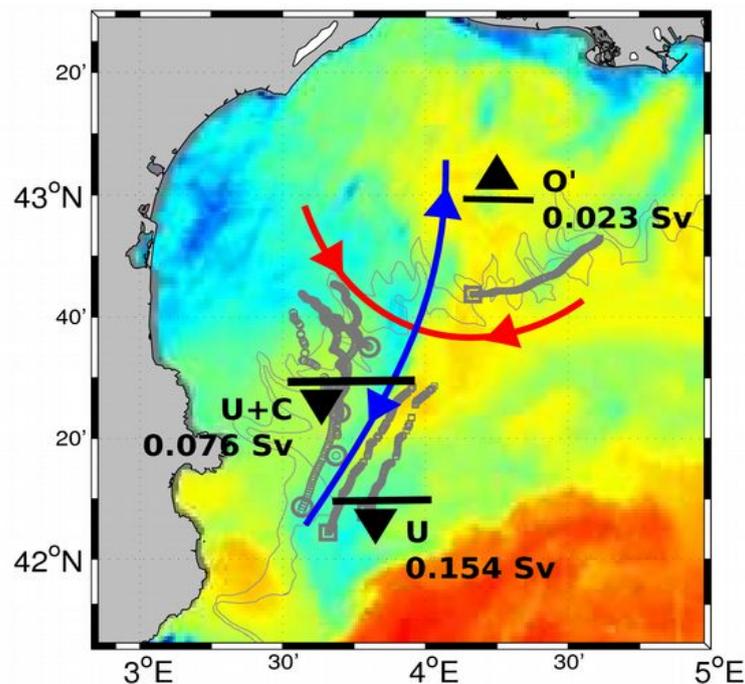
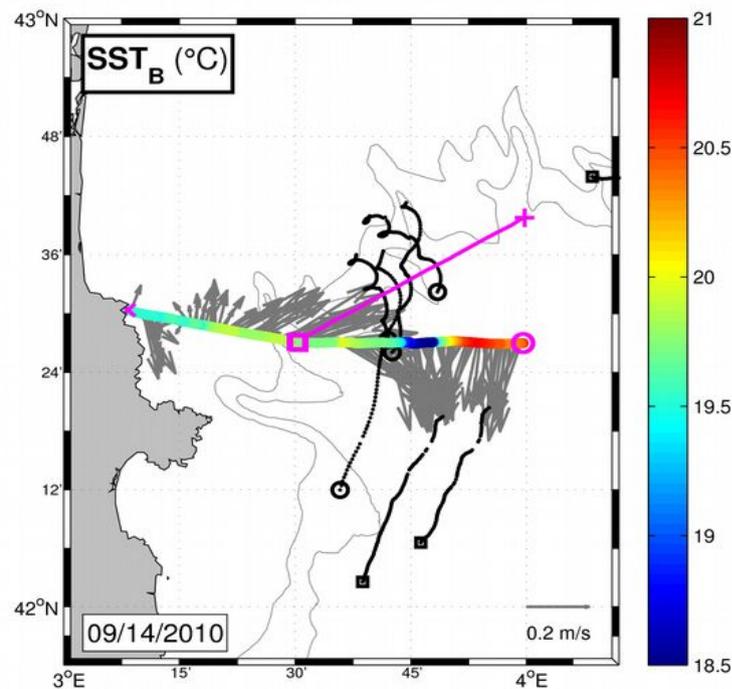
Mesure de la vitesse de translation du point hyperbolique  
~ 5 cm/s  
<< advection  
→ condition de base pour l'analyse Lyapunov satisfaite!

[Nencioli et al, JGR 2011]

## 2) Les processus de la circulation à méso et sous-mésoéchelle

### Campagne Latex10 [Petrenko 2010]

TSG + SST : Identification de différentes masses d'eau  
+  
Bouées dérivantes : estimation des oscillations d'inertie et des LCS  
+  
ADCP: vitesses du courant  
=  
**Estimation "lagrangienne" du transport côte/large**

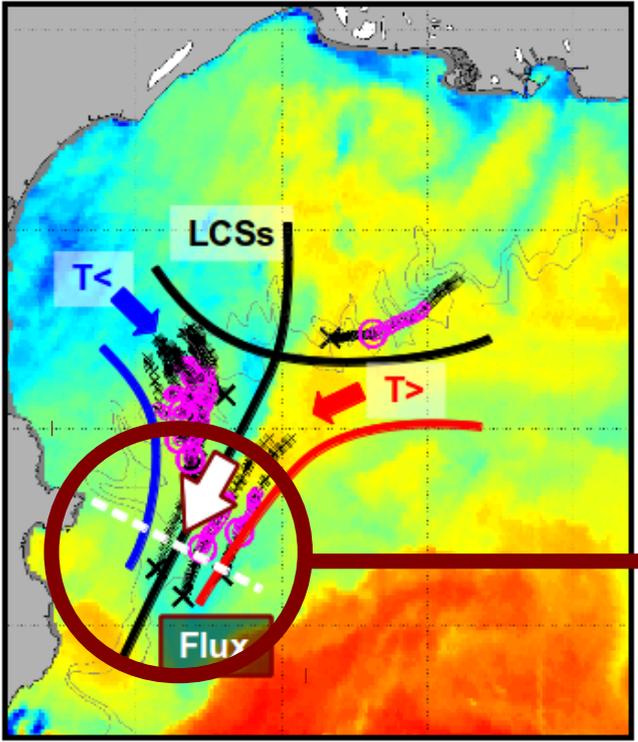


[Nencioli et al., JGR 2016]

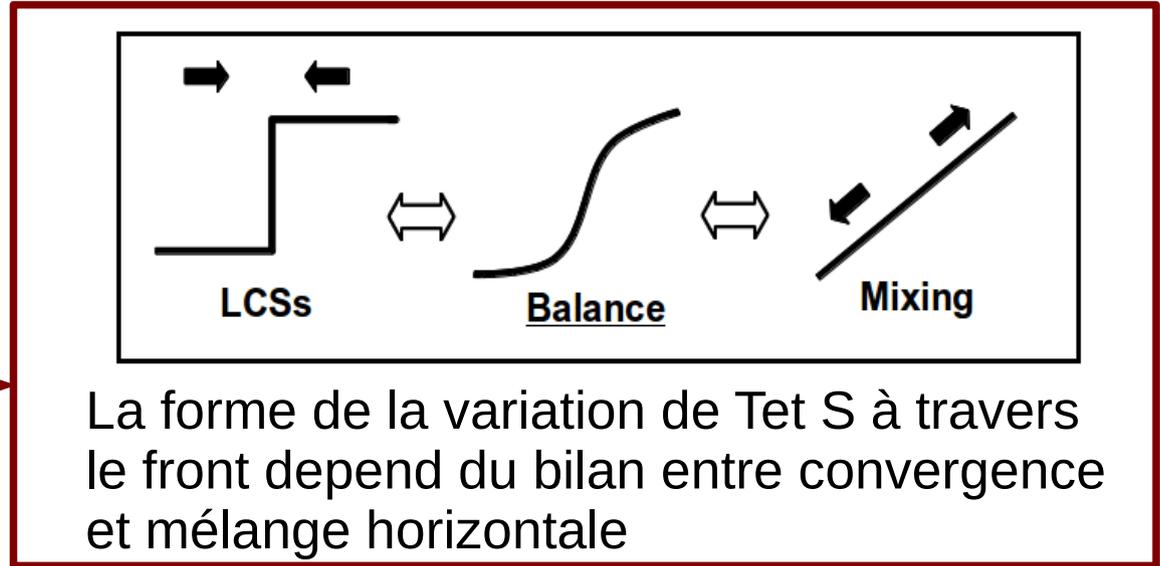
3) Le mélange turbulent sur l'horizontale

Campagne Latex10 [Petrenko 2010]

TSG : variation de T et S à travers le front  
+  
Bouées dérivantes: estimation du taux d'étirement  
=



Estimation de  $K_h$

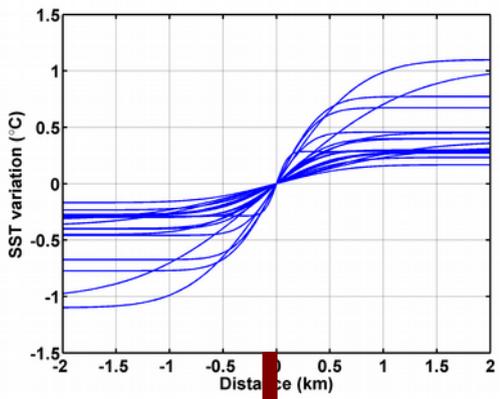


[Nencioli et al., JGR 2013]

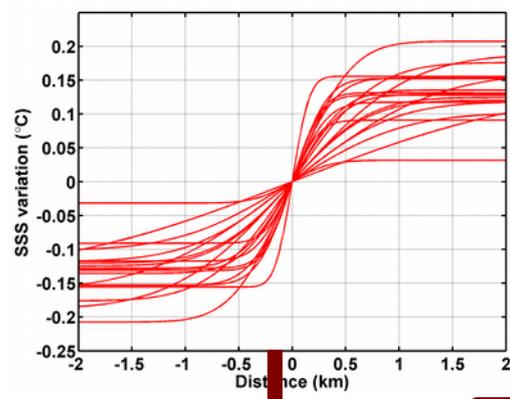
3) Le mélange turbulent sur l'horizontale

Campagne Latex10 [Petrenko 2010]

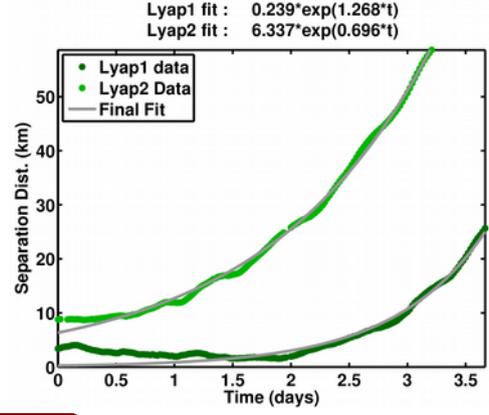
Temperature



Salinité

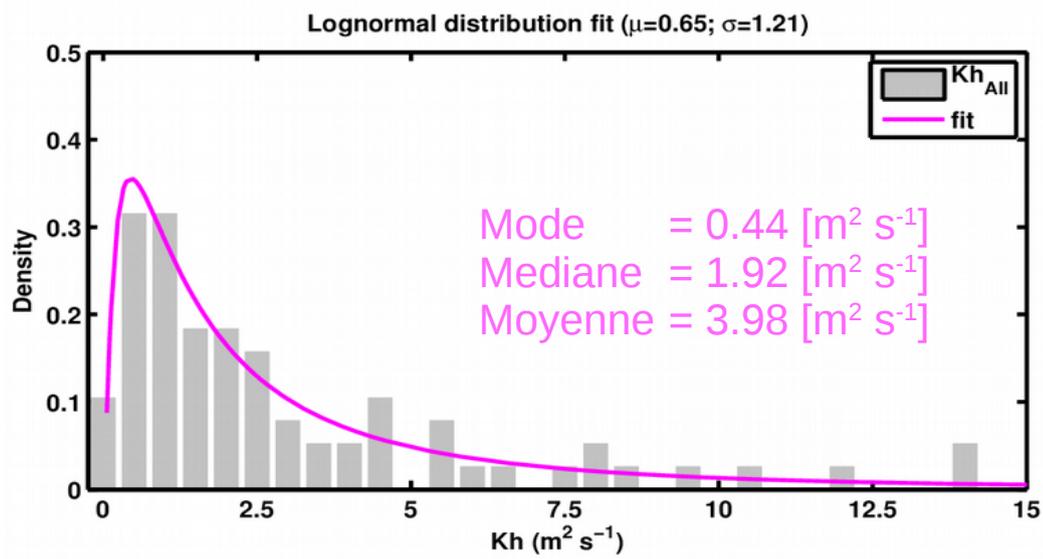


Taux étirement



$$K_H = \frac{\gamma}{(2 C^3)^2}$$

Coefficient de mélange  $K_h$



Estimations de  $K_h$  distribution de probabilité log-normale

70%  $K_h = 0.4 \text{ à } 5 \text{ [m}^2 \text{ s}^{-1}\text{]}$

Largeur du front 1 à 4 km

$$K_h^{SST} \cong K_h^{SSS}$$

[Nencioli et al, JGR, 2013]

3) Le mélange turbulent sur l'horizontale



Campagne Latex10 [Quéguiner 2010]

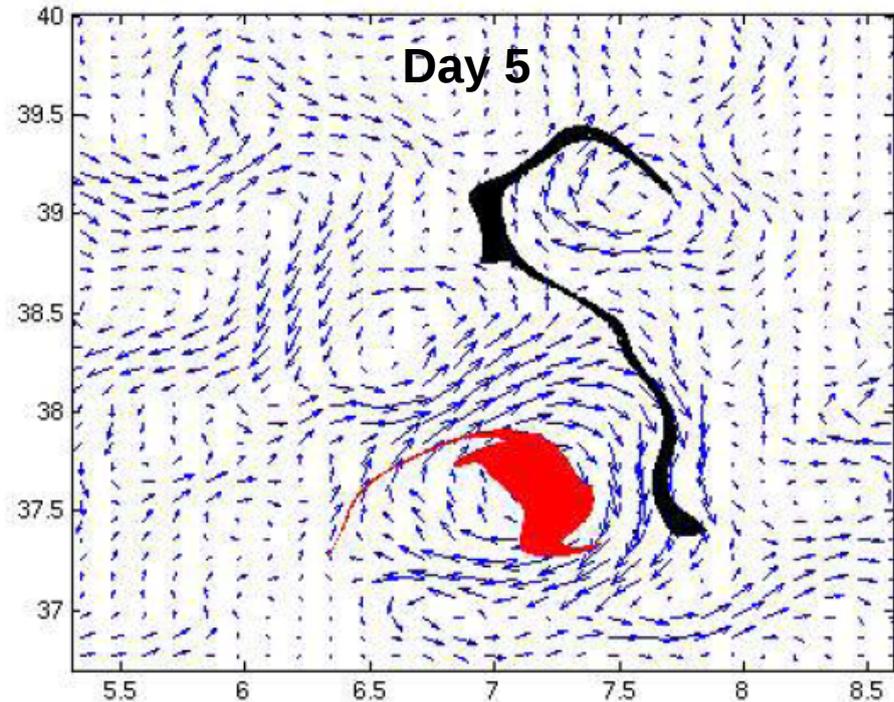
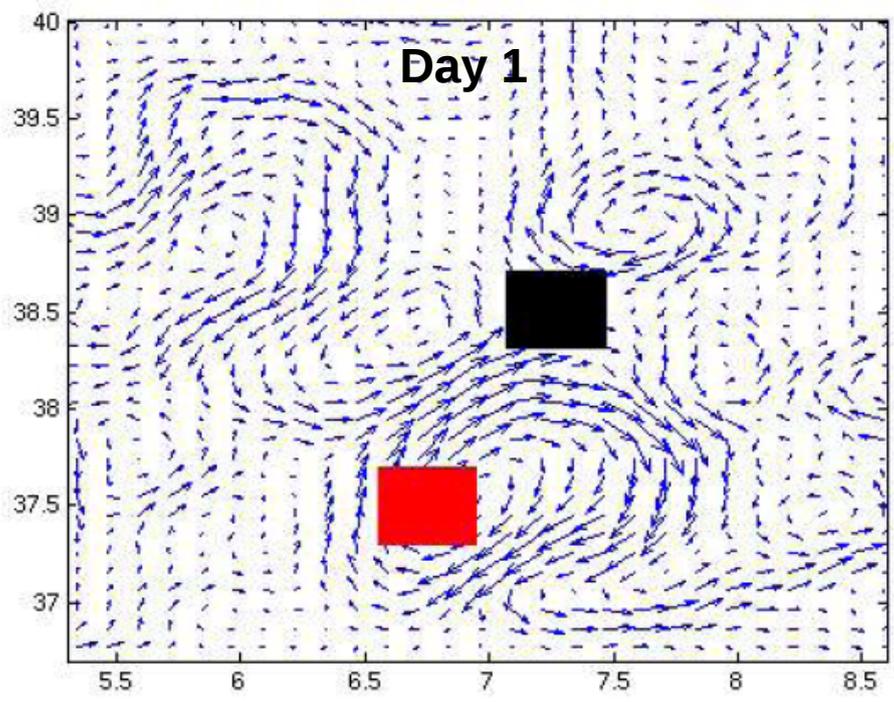
Largage d'un traceur inerte (conservatif) et passif



$$\nabla \vec{v} = \zeta + \gamma$$

Rotation dominante => dispersion isotropique

Déformation dominante => filamentation



from d'Ovidio et al.

Nécessité d'effectuer un largage de forme régulière *in situ*!

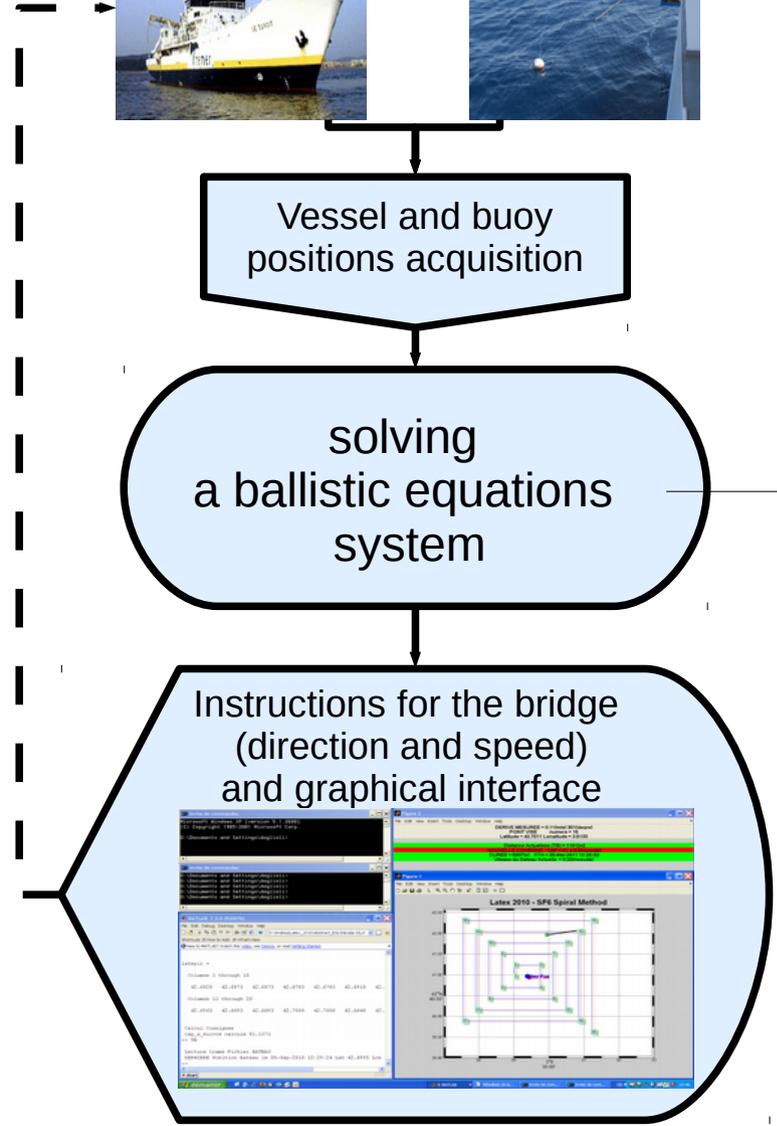
### 3) Le mélange turbulent sur l'horizontale

## Campagnes Latex00, 08, 09, 10

### Navigation Lagrangienne (logiciel LATEXtools)



*HYP : la bouée est cohérente avec la masse d'eau étudiée*



**Defining**

- $\vec{v}_{vessel} \equiv (u_{vessel}, v_{vessel})$  the vessel speed, which modulus during LATEX experiments was fixed  $|\vec{v}_{vessel}| = 4 \text{ kn}$  for technical reasons associated to SF6 release system ;
- $\vec{v}_{target} \equiv (u_{target}, v_{target}) = \vec{v}_{buoy}$  is the drift speed of the «target», i.e. the point  $(x_{target}, y_{target})$  corresponding to a corner of the experimental route (radiator, spiral or an other shape) ;

we need to solve the following closed equation system :

$$\begin{aligned} x_{vessel} + u_{vessel} t &= x_{target} + u_{target} t \\ y_{vessel} + v_{vessel} t &= y_{target} + v_{target} t \\ u_{vessel}^2 + v_{vessel}^2 &= |\vec{v}_{vessel}|^2 \end{aligned}$$

Solving the above equation system we obtain the following equation:

$$at^2 + bt + c = 0$$

where

$$\begin{aligned} a &= u_{target}^2 + v_{target}^2 - |\vec{v}_{vessel}|^2 \\ b &= 2[(x_{target} - x_{vessel})u_{target} + (y_{target} - y_{vessel})v_{target}] \\ c &= (x_{target} - x_{vessel})^2 + (y_{target} - y_{vessel})^2 \end{aligned}$$

Then the estimated time the vessel needs to join the target is chosen as  $t_{tojoin} = \max(t_1, t_2)$  , where  $t_1$  and  $t_2$  are the two real solutions of the equation.

On the basis of this time we estimate the real vessel drift as the sum of the estimated vessel speed plus the current speed obtained from the buoy displacement

$$\begin{aligned} u_{vessel\text{drift}} &= \frac{(x_{target} - x_{vessel})}{t_{tojoin}} + u_{target} \\ v_{vessel\text{drift}} &= \frac{(y_{target} - y_{vessel})}{t_{tojoin}} + v_{target} \end{aligned}$$

The component of the velocity above allow us to calculate the direction of the route :

$$\begin{aligned} \alpha &= 90 - (180/\pi) \arctan(v_{vessel\text{drift}}/u_{vessel\text{drift}}) && \text{for } u_{vessel\text{drift}} > 0 \\ \alpha &= 180 && \text{for } u_{vessel\text{drift}} = 0 \\ \alpha &= 270 - (180/\pi) \arctan(v/u) && \text{for } u_{vessel\text{drift}} < 0 \end{aligned}$$

and the distance between the vessel and the «target »

$$d = (u_{vessel\text{drift}}^2 + v_{vessel\text{drift}}^2)^{1/2} t_{tojoin}$$

### 3) Le mélange turbulent sur l'horizontale



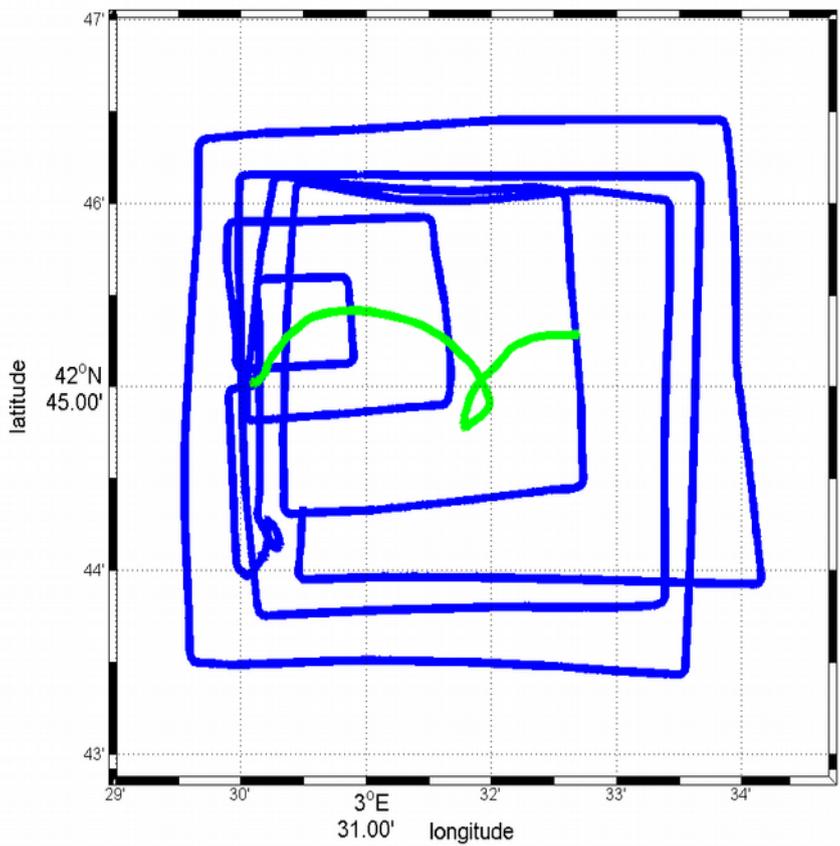
Campagnes Latex00, 08, 09, 10

Navigation Lagrangienne

logiciel LATEXtools

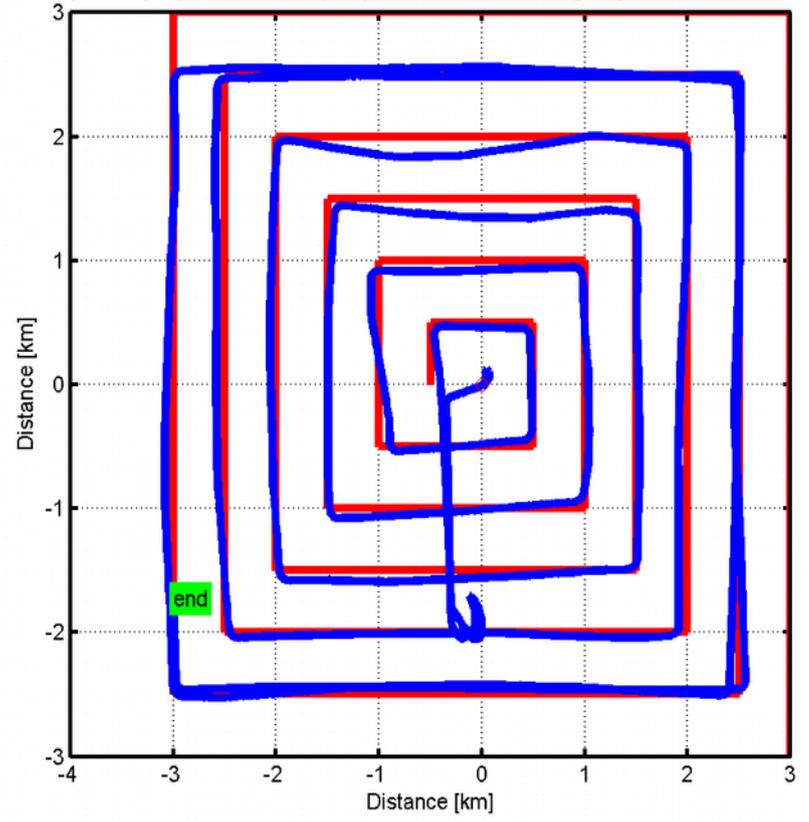


Vessel (blue) - Buoy (green) tracks



Vessel and buoy tracks in geographical coordinates

expected (red) and obtained (blue) vessel track in the Lagrangian reference frame



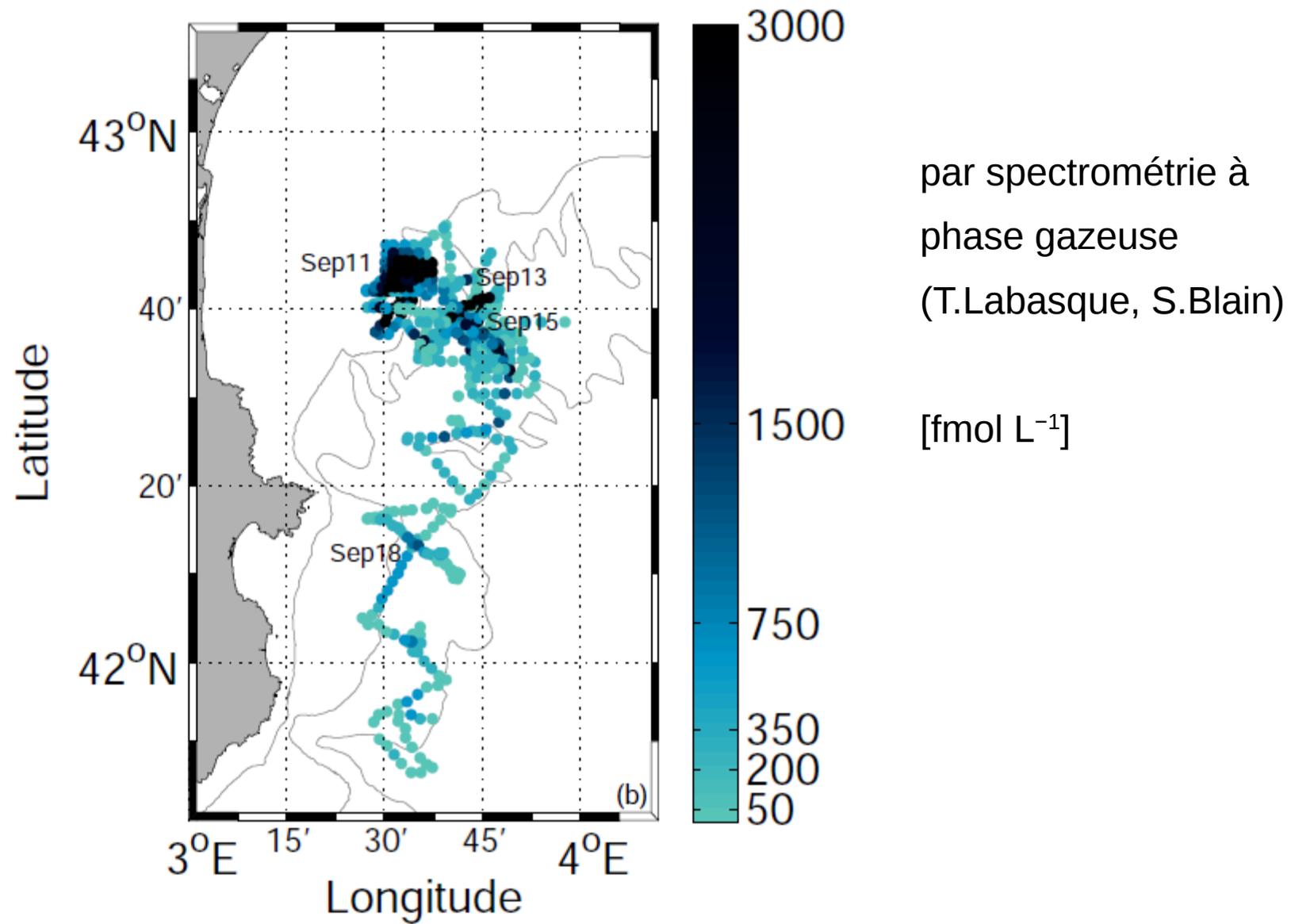
Expected and obtained vessel track in the Lagrangian reference frame

[Doglioli et al, JAOT, 2013]

3) Le mélange turbulent sur l'horizontale

**Campagne Latex10 [Quéguiner 2010]**

Cartographie de la concentration de SF6

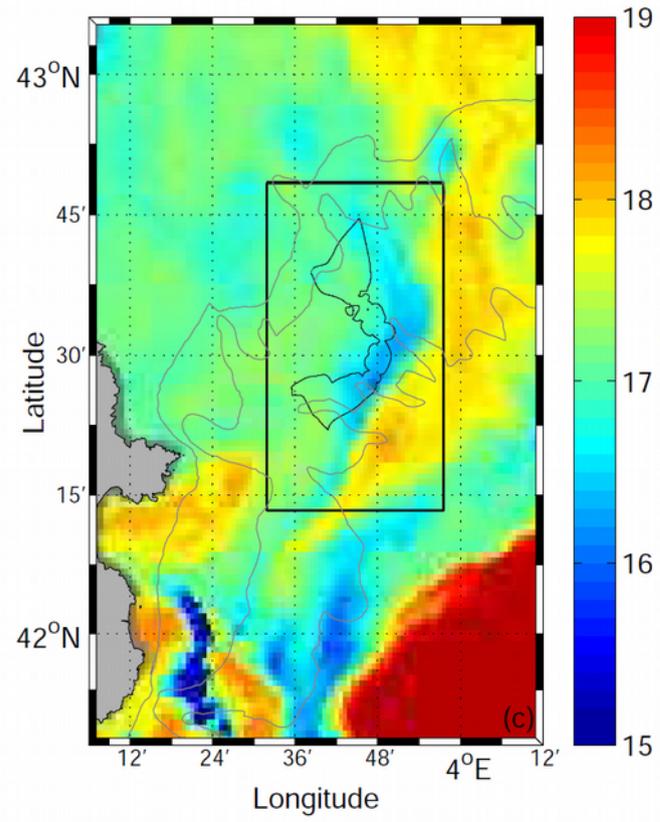


3) Le mélange turbulent sur l'horizontale

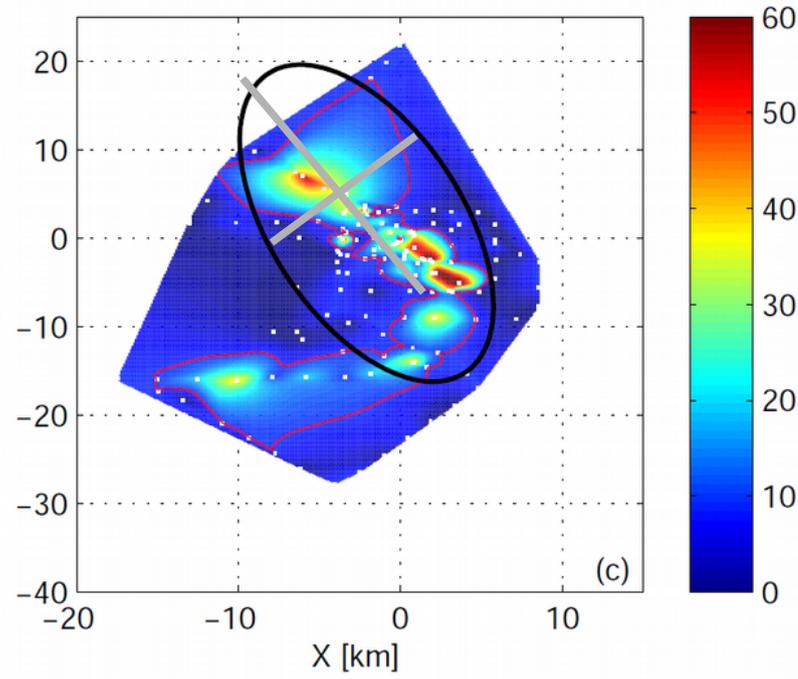
**Campagne Latex10 [Quéguiner 2010]**

Estimation du  $K_h$  (e.g. cartographie #3)

Projection géographique



Projection centre de masse



Mesure des axes de l'ellipse

Résolution du modèle de diffusion-déformation

$$\sigma_l^2 = \left( \sigma_{l_0}^2 + \frac{K_h}{\gamma} \right) e^{2\gamma t} - \frac{K_h}{\gamma}$$

$$\sigma_w^2 = \left( \sigma_{w_0}^2 - \frac{K_h}{\gamma} \right) e^{-2\gamma t} + \frac{K_h}{\gamma}$$

**$K_h = 23.2 \text{ [m}^2 \text{ s}^{-1}\text{]}$**

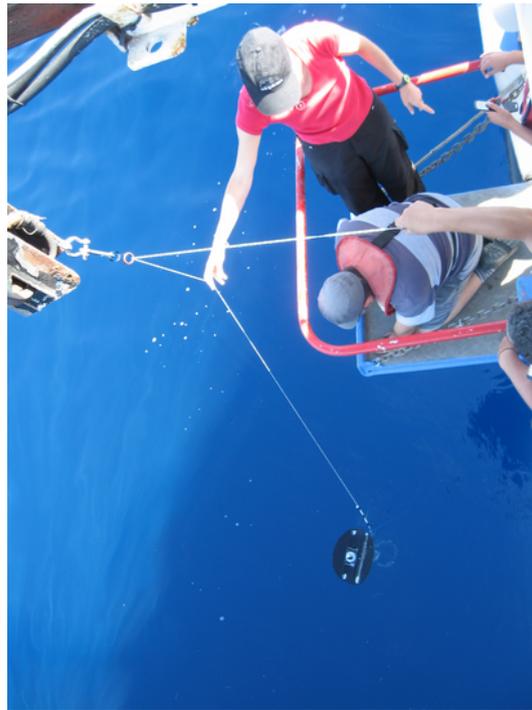
Pour un patch de  $11.8 \pm 1.4 \text{ km}$

[Kersalé et al., JMS 2016]

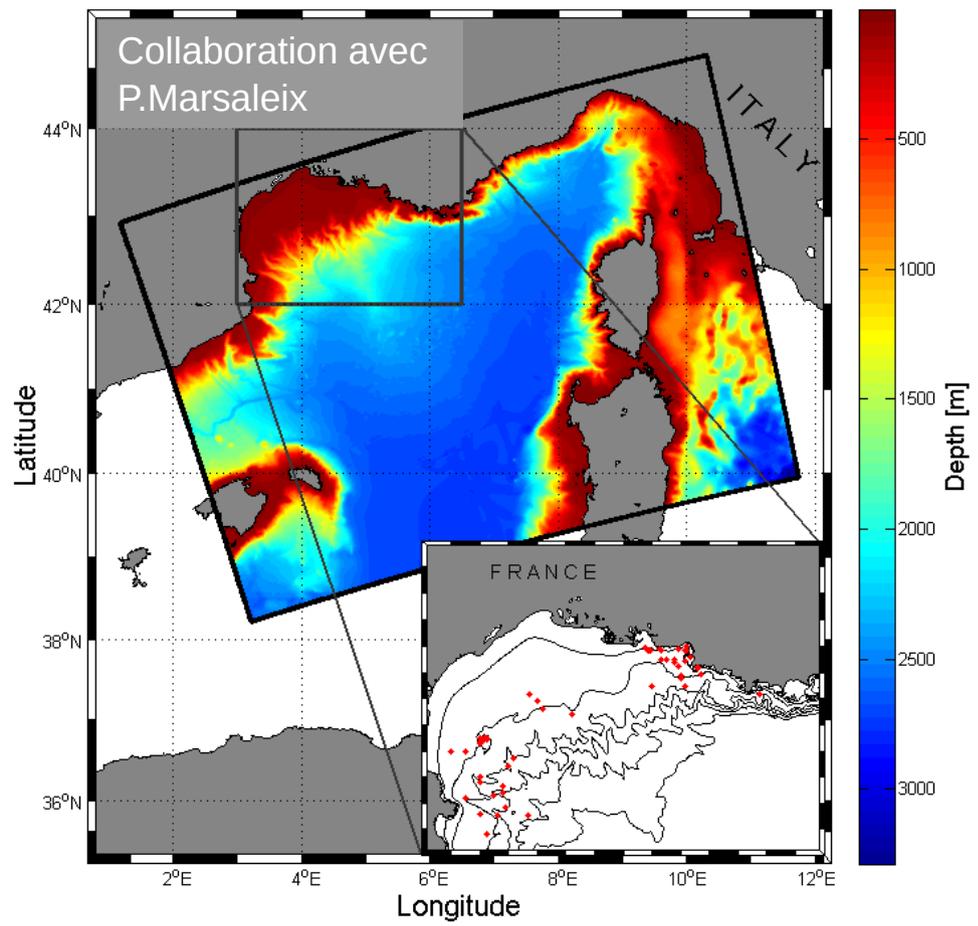
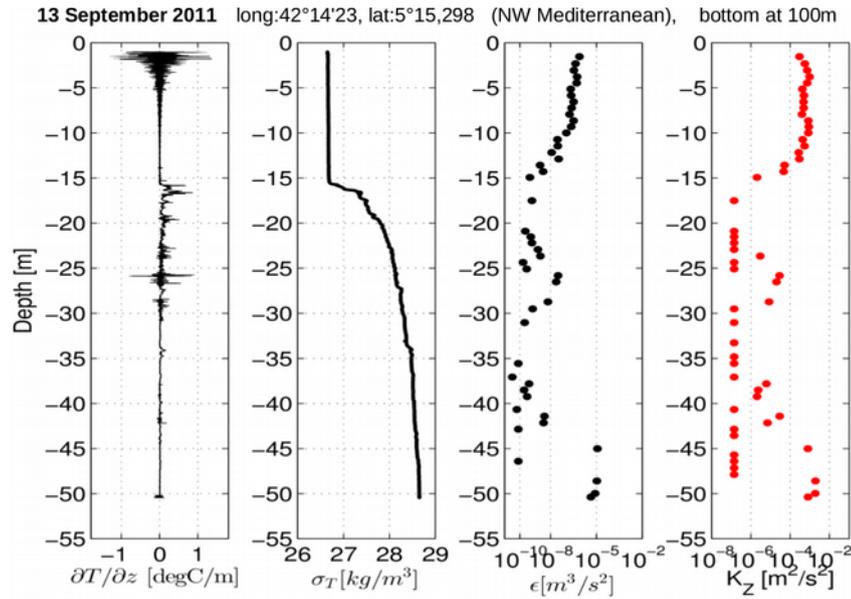
### 3) Le mélange turbulent sur la verticale

## Mesures in situ et schémas de fermeture de la turbulence

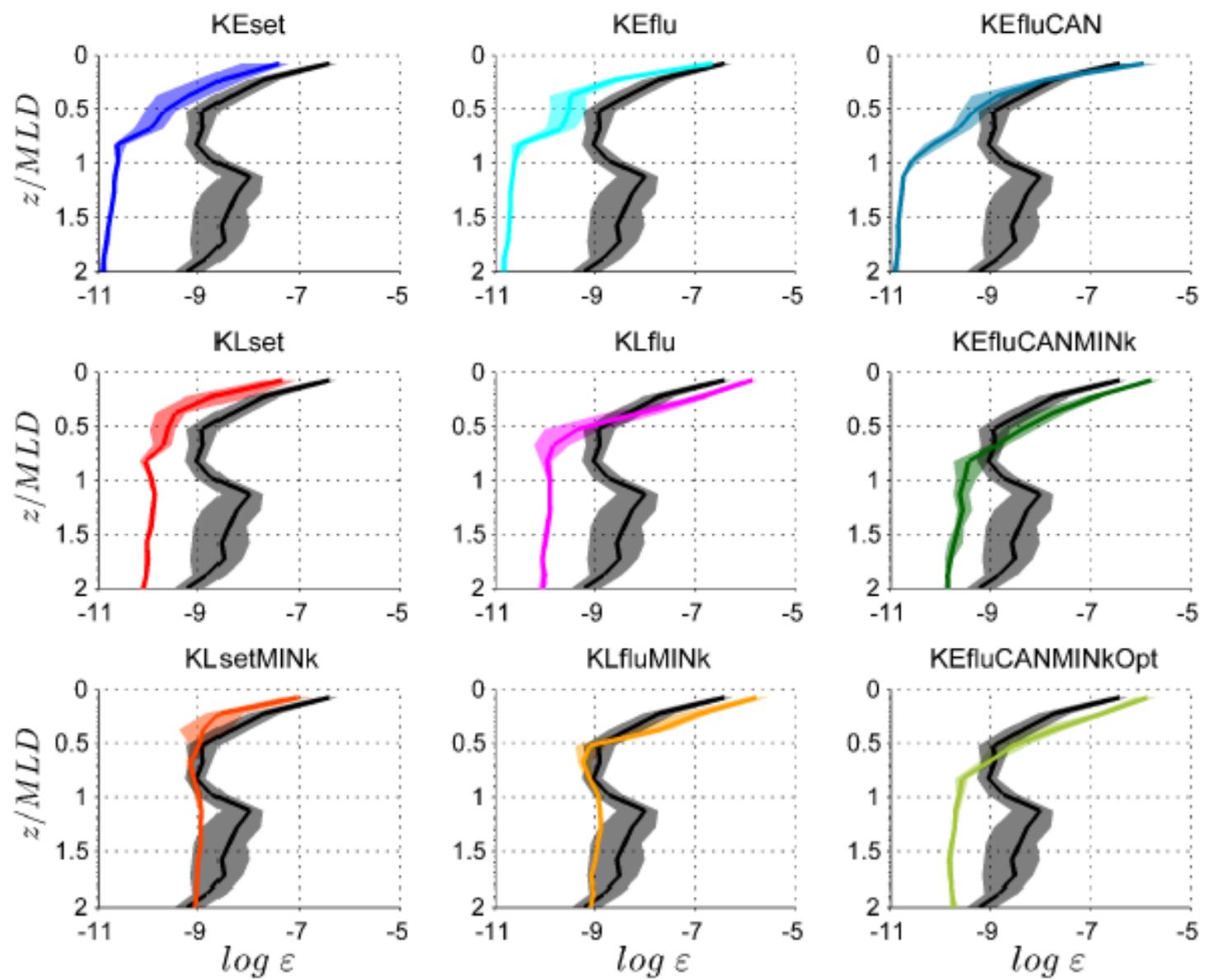
Mesures  
avec le  
microprofileur  
SCAMP



domaine du modèle SYMPHONIE 3D(!)  
+  
positions géographiques des  
300 profils (2010-2014) effectuées  
pendant plusieurs campagnes.



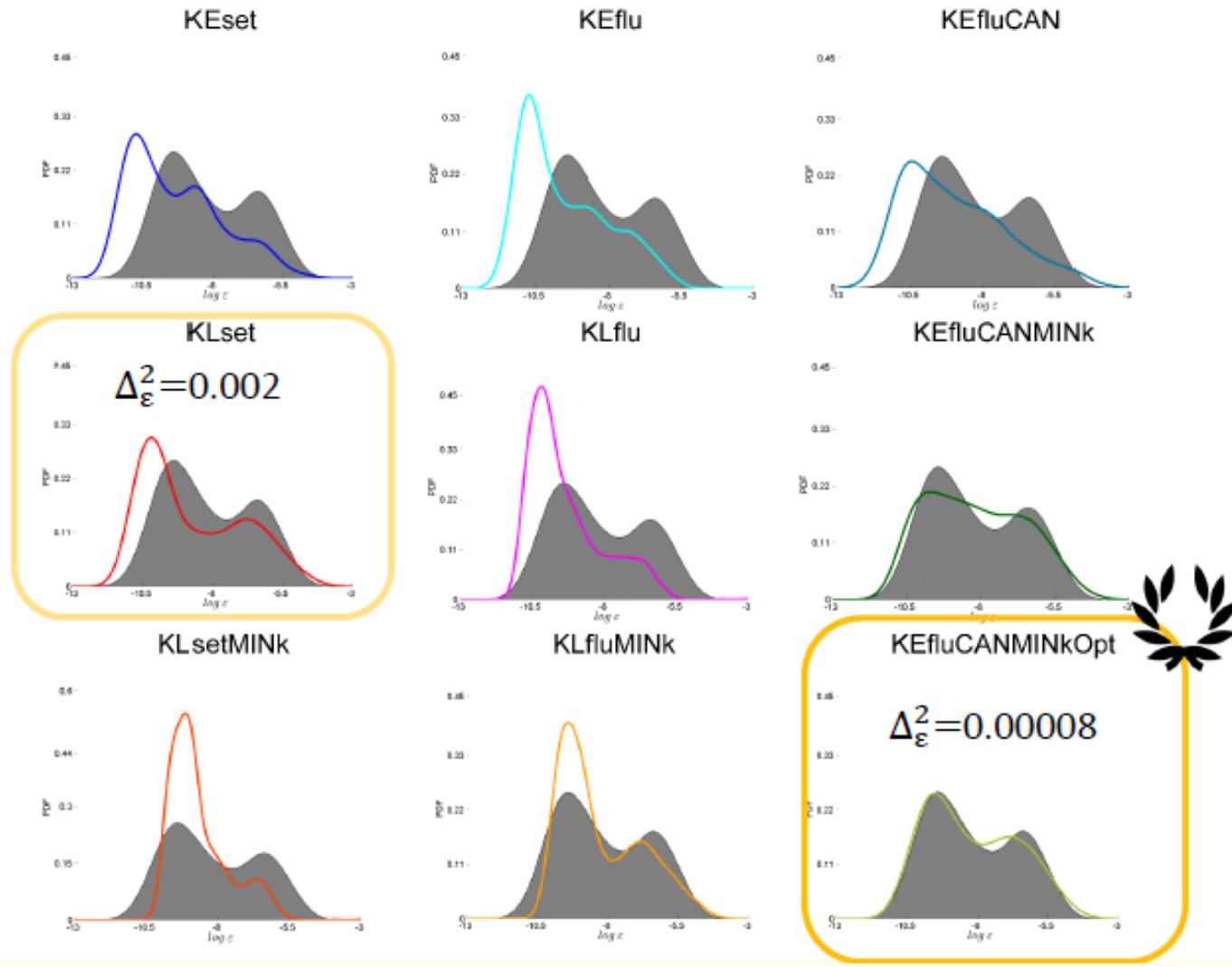
# Mesures in situ et schémas de fermeture de la turbulence



[Costa et al., OM 2017]

3) Le mélange turbulent sur la verticale

Mesures in situ de Kz et schémas de fermeture



Meilleur config :

- schéma  $k-\epsilon$
- condition au bord de flux
- seuil  $10^{-7}$
- fonction de stabilité Canuto
- profondeur PAR 23 [m]



Essentiel mesurer la pénétration de la chaleur modulée par l'activité biologique ;  
**du couplage biologie- physique!**

[Costa et al., OM 2017]

# Thématiques de recherche

## *Océanographie Physique*

- 1) La dynamique des tourbillons de mésoéchelle et leur impact sur le transport
- 2) Les processus de la circulation à méso et sousmésoéchelle
- 3) Le mélange turbulent sur l'horizontale et sur la verticale

Descente d'échelle

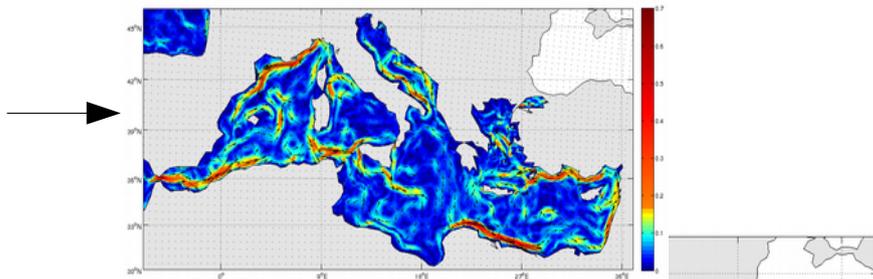
## ***Couplage Physique-Biogéochimie-Biologie***

- 1) le transport du plancton et la connectivité larvaire
- 2) l'impact de la (sous)mésoéchelle sur les blooms et la structure de la communauté phytoplanctonique
- 3) l'advection, la dispersion et la décantation de particules

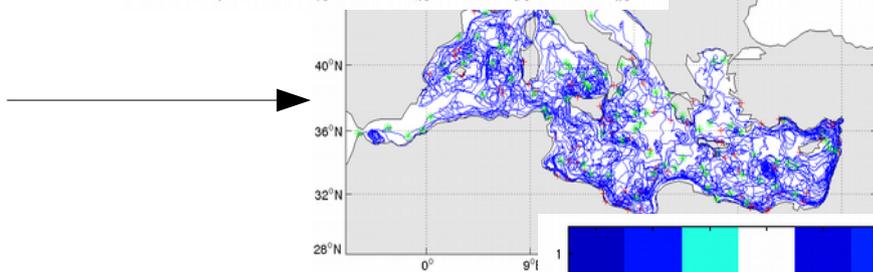
# 1) Le transport du plancton et la connectivité larvaire

## Une régionalisation de la Méditerranée basée sur le temps de transport...

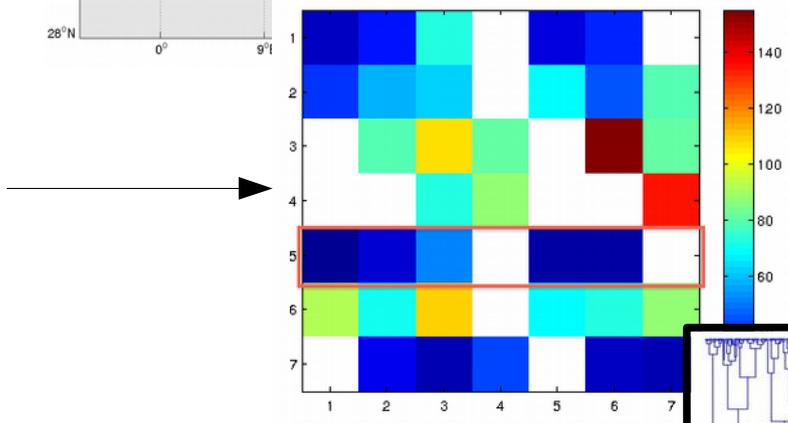
Champ de courant Eulérien



Module Lagrangien



Matrice de connectivité



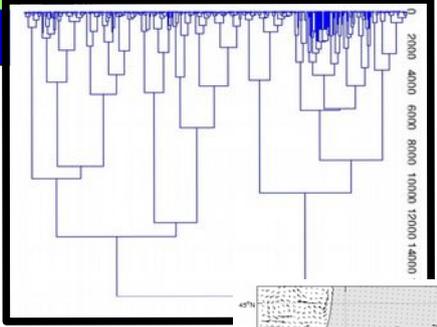
Mean Connection Time

$$MCT(i, j) = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^{n=N} T_n(i, j)$$

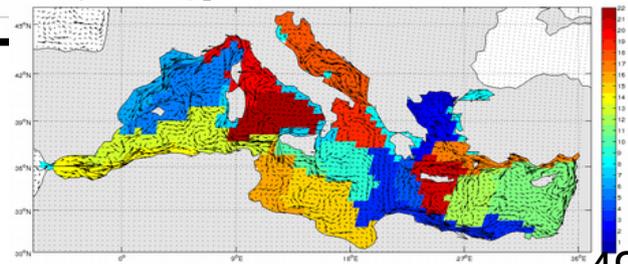
Oceanographic Distance

$$OD(i, j) = \min(MCT(i, j), MCT(j, i))$$

Classification hiérarchique



Identifications des régions

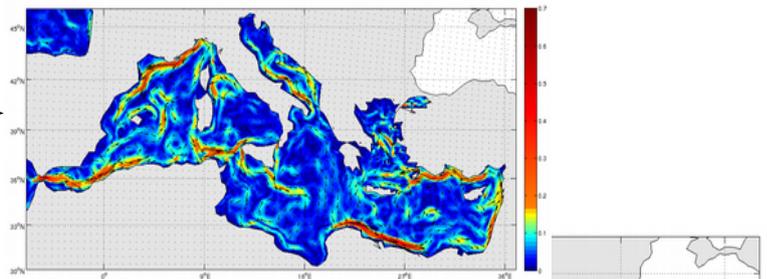


[Berline et al, PlosOne 2014]

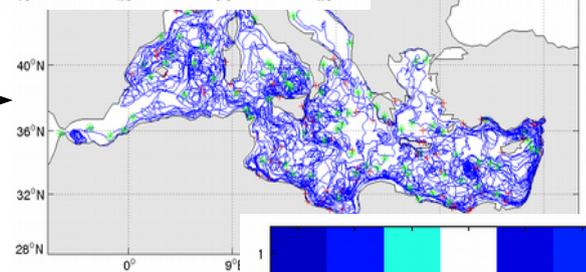
# 1) Le transport du plancton et la connectivité larvaire

## ... et perspective sur l'étude des réseaux

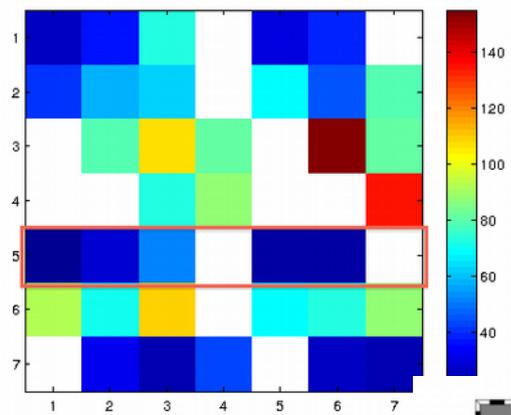
Champ de courant Eulérien



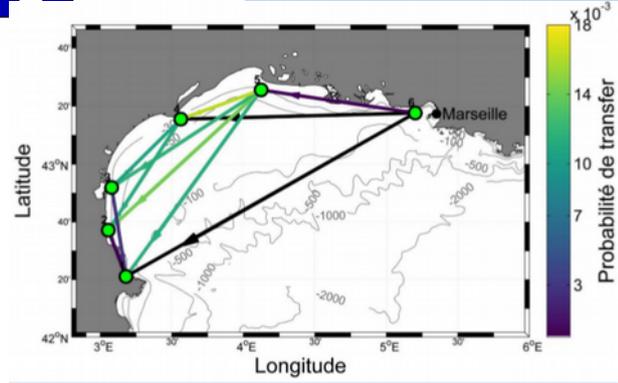
Module Lagrangien



Matrice de connectivité



GT - Théorie des Graphes



Une nouvelle définition pour une application correcte de la GT aux simus Lagrangiennes:

$$d_{AB} = \sum \log \left( \frac{1}{C_{ij}} \right)$$

↓

**Chemin plus court**  
=  
**Chemin plus probable**

[Costa et al, PlosOne 2017]

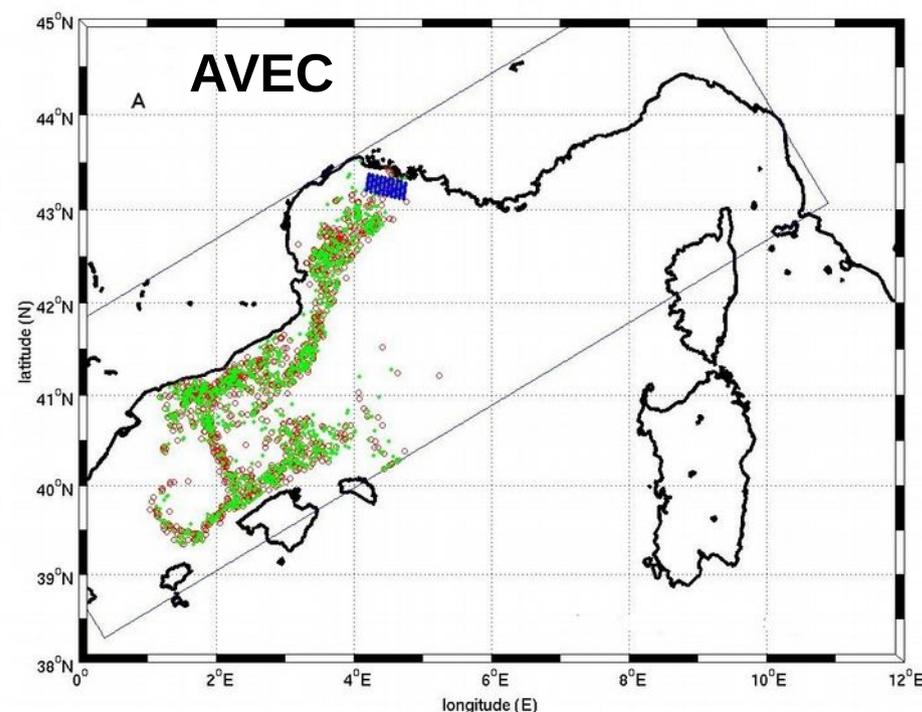
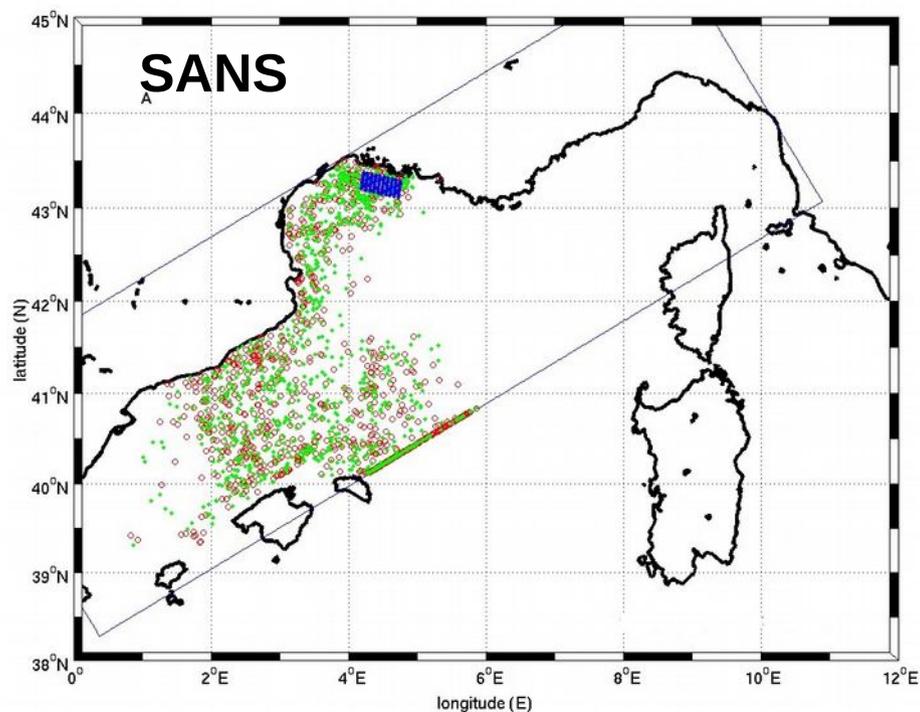
E.G. Identifications des noeuds clés pour la persistance

# 1) Le transport du plancton et la connectivité larvaire

## Interaction entre courants et comportement

Simulations numériques de dispersion du zooplancton

Quel effet sans/avec la migration nyctéméral?



Destinations différentes quand courant cisailé  
mais pas bcp plus de rétention sur le plateau

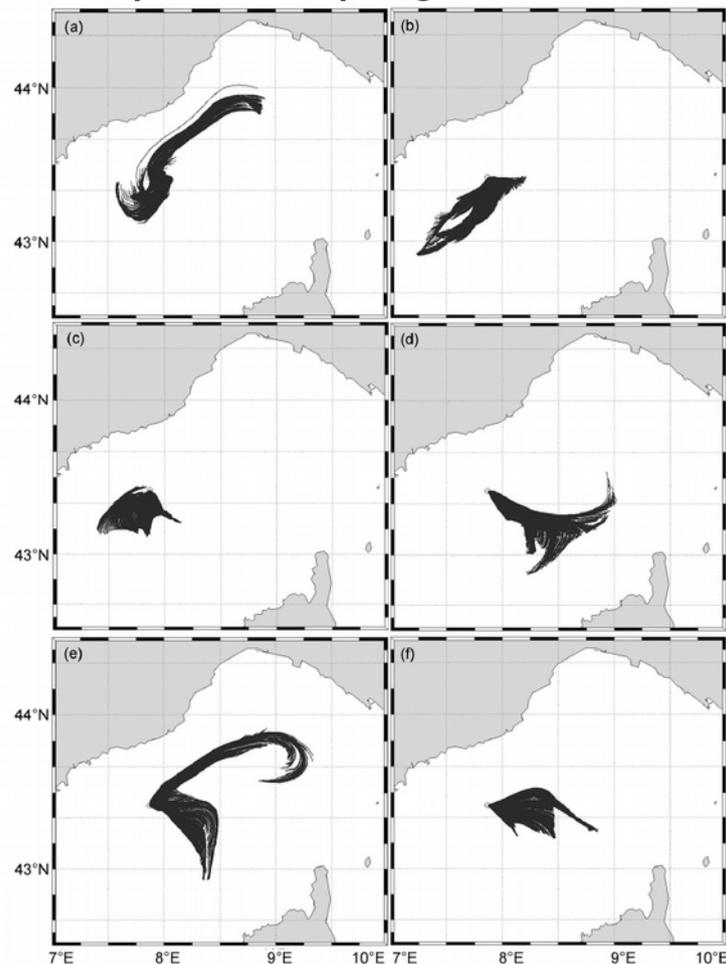
[Qiu et al., EM 2010]

## 1) Le transport du plancton et la connectivité larvaire

### Interaction entre courants et comportement

Simulation numériques de dispersion des particules 100 [ $\mu\text{m}$ ]

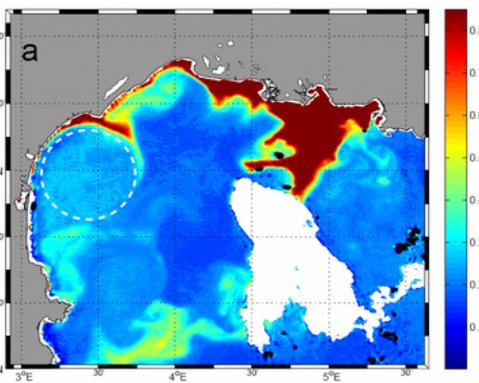
Quelles sources pour les pièges DYFMED à 200 [m]?



Patterns complexes, variabilité mensuelle, modèle 1D vertical difficilement applicable

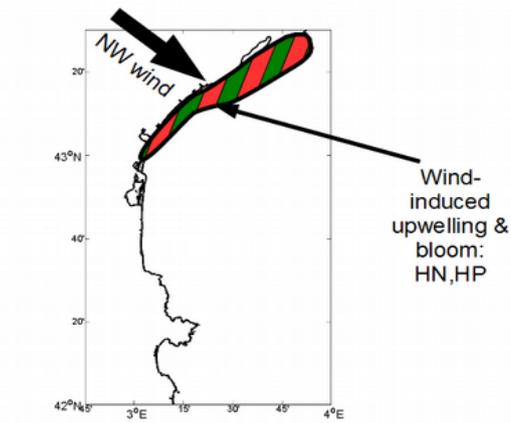
## 2) Impact de la (sous)mésoéchelle sur les blooms

### Réponse biogéochimie en présence de tourbillon côtier

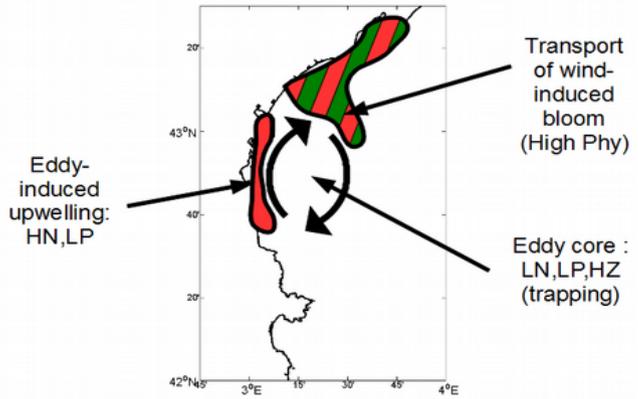


Modèle Symphonie  
+  
ECO3M  
[Baklouti et al., 2006]

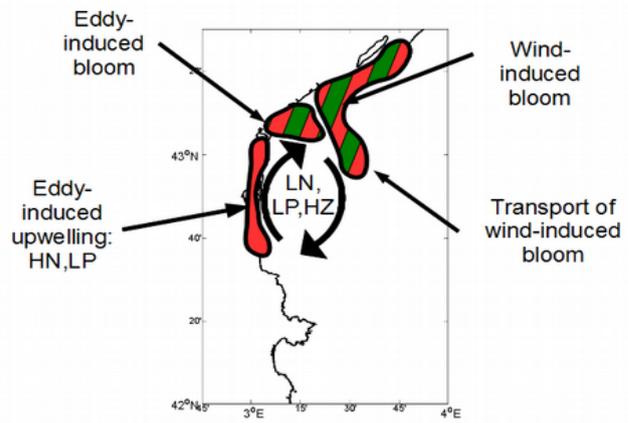
collaboration avec  
F.Diaz



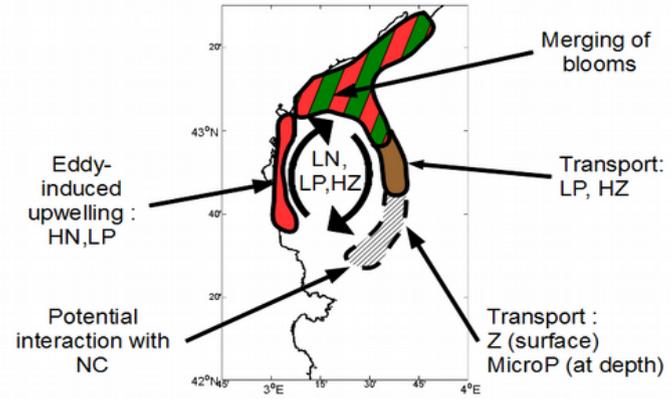
1 Eddy generation



2 Beginning of eddy's life



3 Middle of eddy's life



4 End of eddy's life

**H(L)N**  
High(Low)  
Nutrients

**H(L)P**  
High(Low)  
Phytoplankton

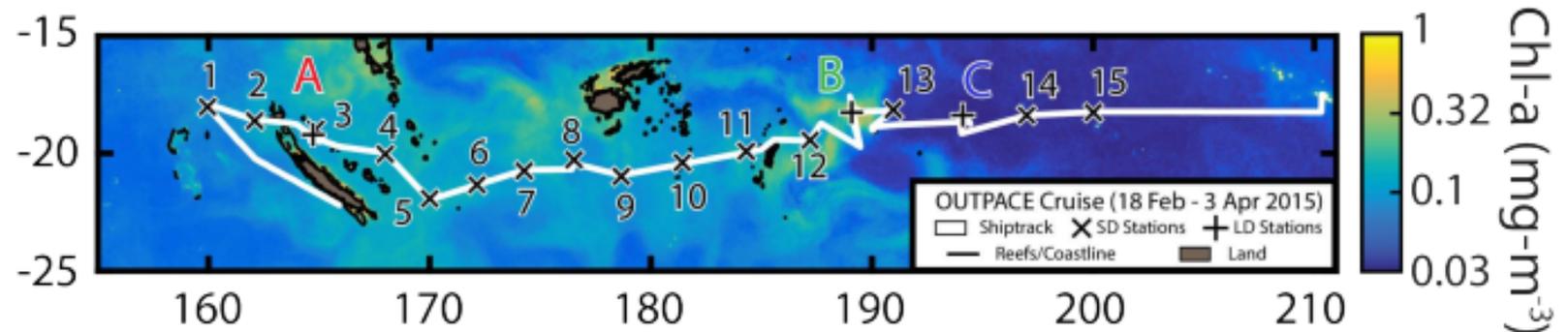
**H(L)Z**  
High(Low)  
Zooplankton

[Campbell et al., Progr.Oceanogr., 2013]

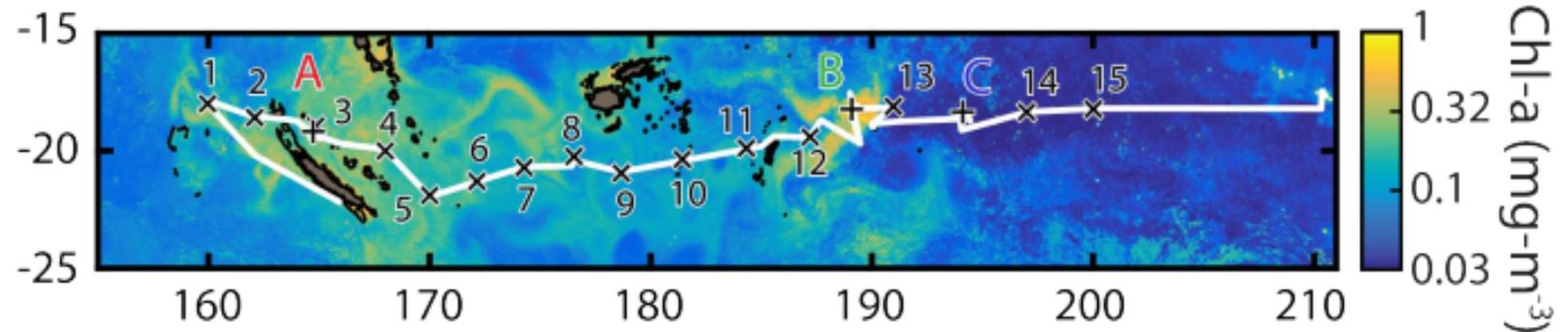
2) Impact de la (sous)mésoéchelle sur les blooms

**Campagne OUTPACE**  
[Moutin et Bonnet, 2015]

Moyenne



Moyenne  
"Lagrangienne"



18 Feb-3 April 2015

From Noumea (New Caledonia) to Papeete (Tahiti)

15 SD stations (~24h)

3 LD stations (~1 week)

[Moutin et al., 2017]

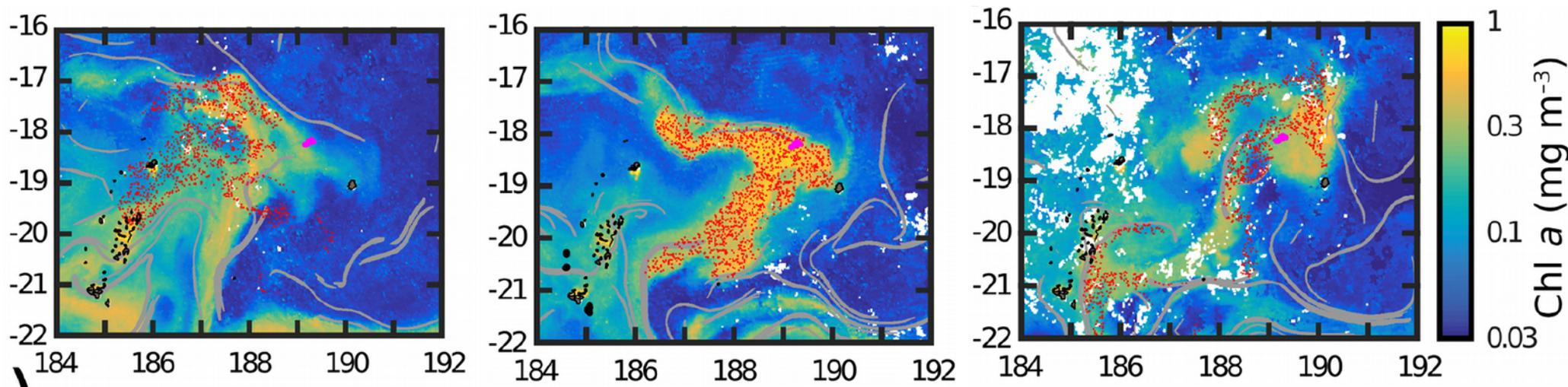
## 2) Impact de la (sous)mésoéchelle sur les blooms

### Campagne OUTPACE [Moutin et Bonnet, 2015] : le bloom de la station LD-B

Données Physique (MVP) : pas de sousméso → pas d'injection verticale de nutriments

Données Biogéochimie : tous les indices d'un bloom en milieu oligotrophe soutenu par la diazotrophie

Simulation Particules Lagrangiennes (points rouges) et exp Lyapunov FSLE (filaments gris)



*Eaux de surface enrichies étirées par la circulation de mésoéchelle*

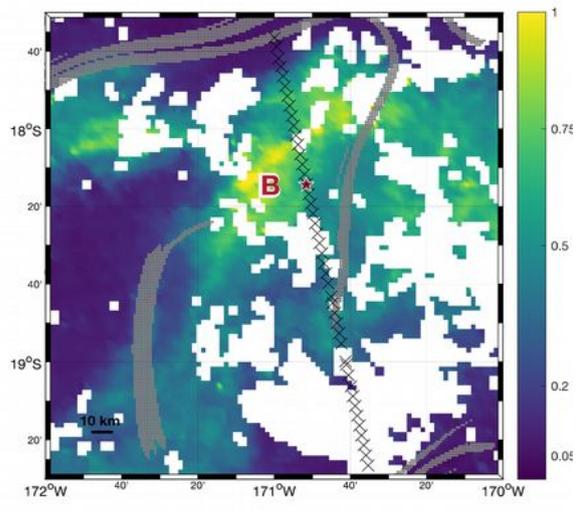
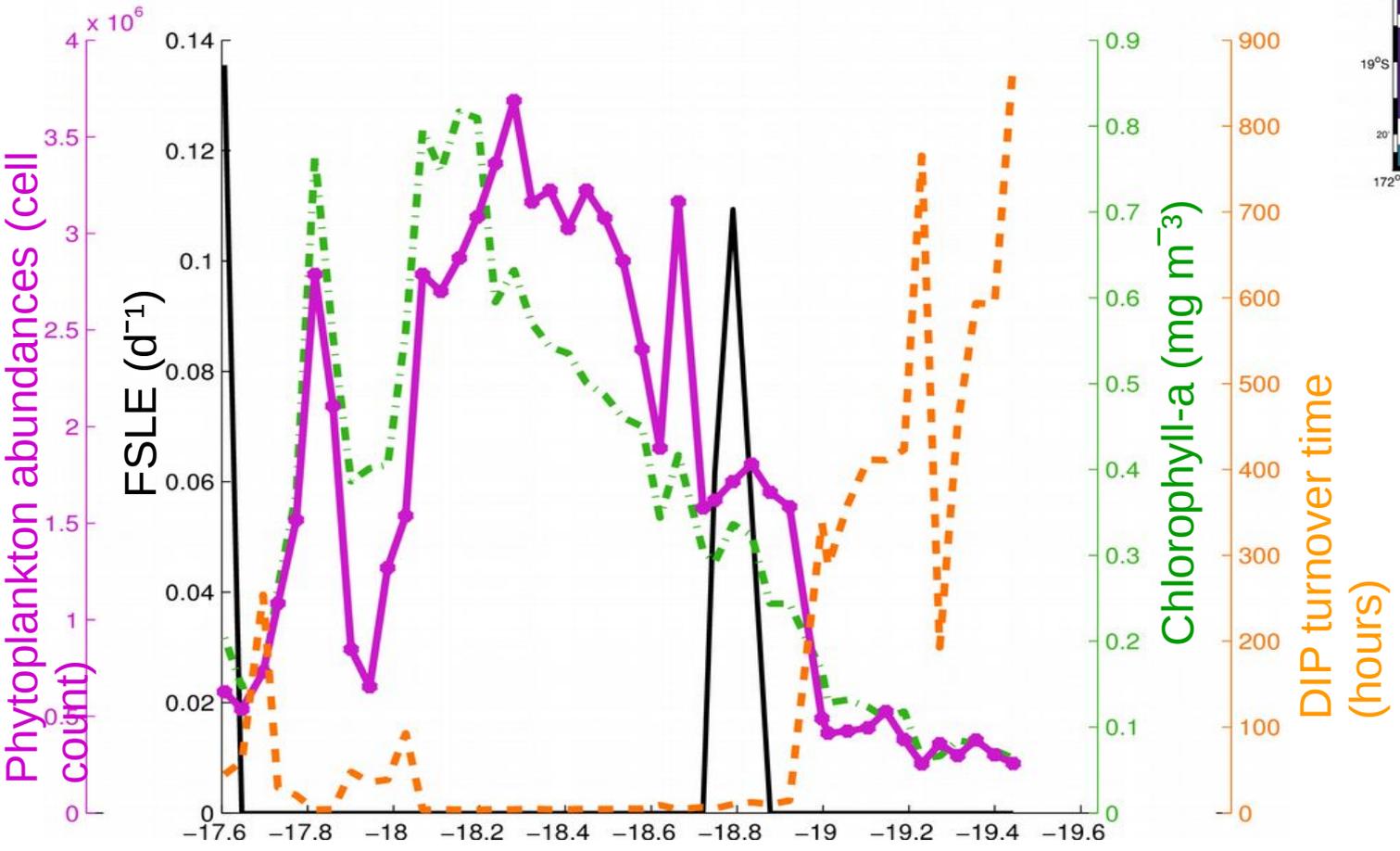
*Mouvement vers l'est: méso-échelle déplace la limite oligo-ultraoligo?*

[de Verneil et al., 2017]

## 2) Impact de la (sous)mésoéchelle sur les blooms

### Campagne OUTPACE [Moutin et Bonnet, 2015] : le bloom de la station LD-B

L'analyse Lyapunov identifie bien la frontière entre deux régions contrastées

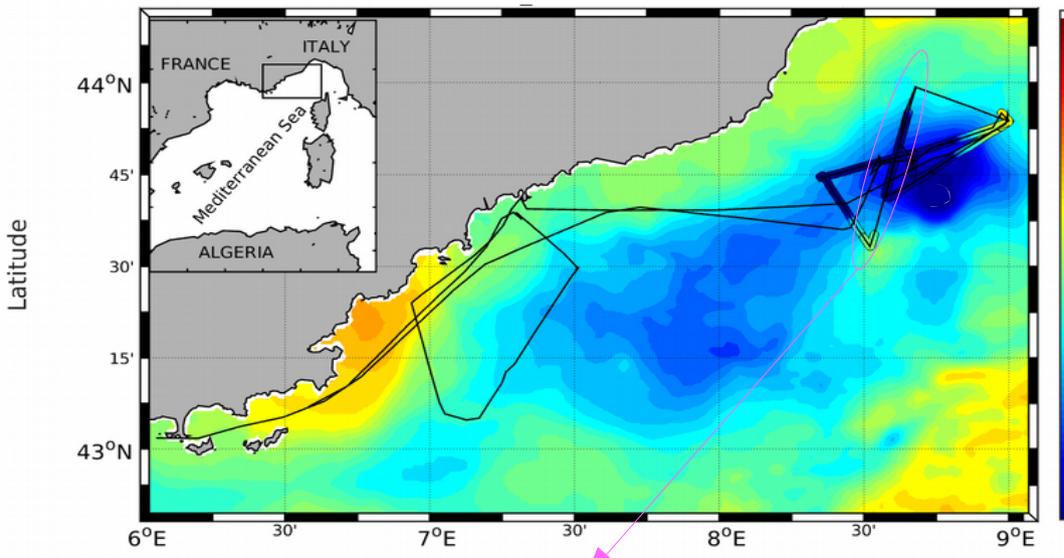


[Rousselet et al., 2018]

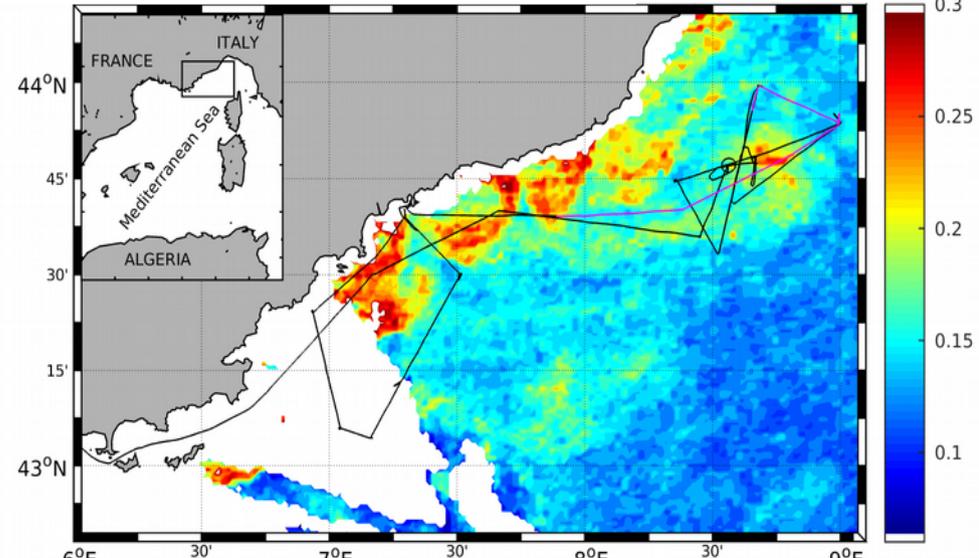
## 2) Impact de la (sous)mésoéchelle sur les blooms

### Campagne OSCAHR [Doglioli, 2015]

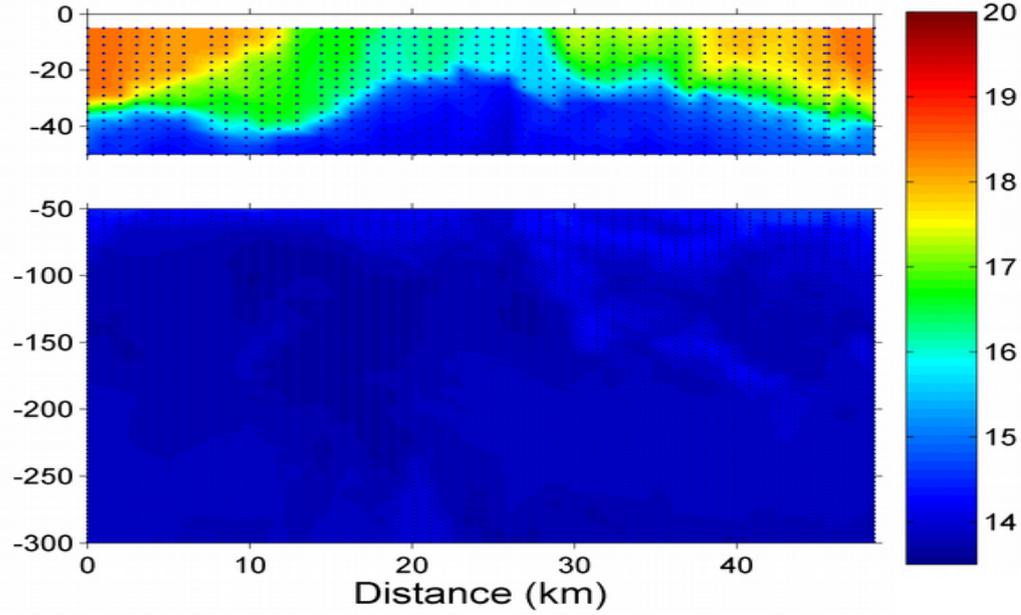
SST satellite et TSG



CHL satellite



Profils MVP

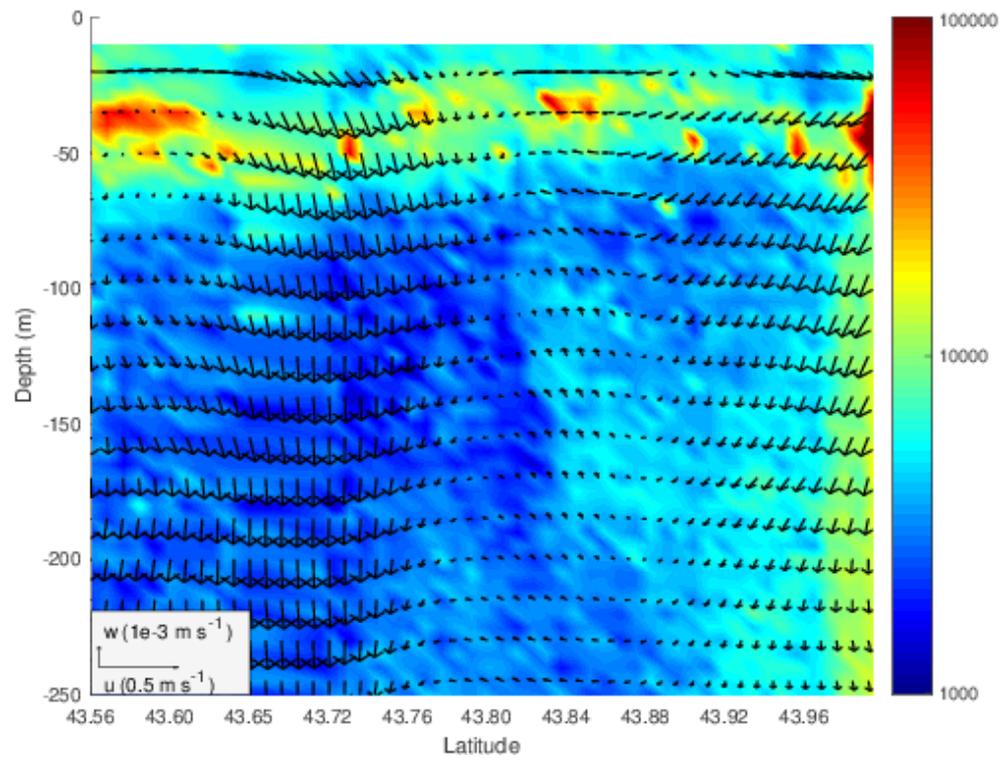


Minimum local de SST  
&  
Maximum local de CHL  
associés à une remontée  
des isothermes

## 2) Impact de la (sous)mésoéchelle sur les blooms

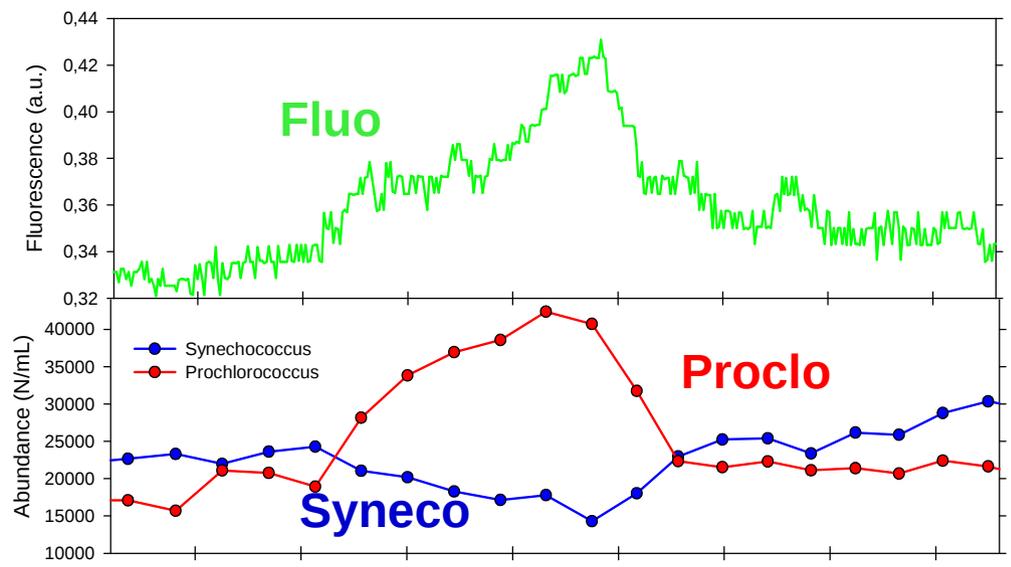
### Campagne OSCAHR [Doglioli, 2015]

Profils MVP-LOPC et ADCP  
et reconstruction des  $w$



*Recirculation verticale  
qui redistribue les particules*

Mesures de cytométrie  
de surface



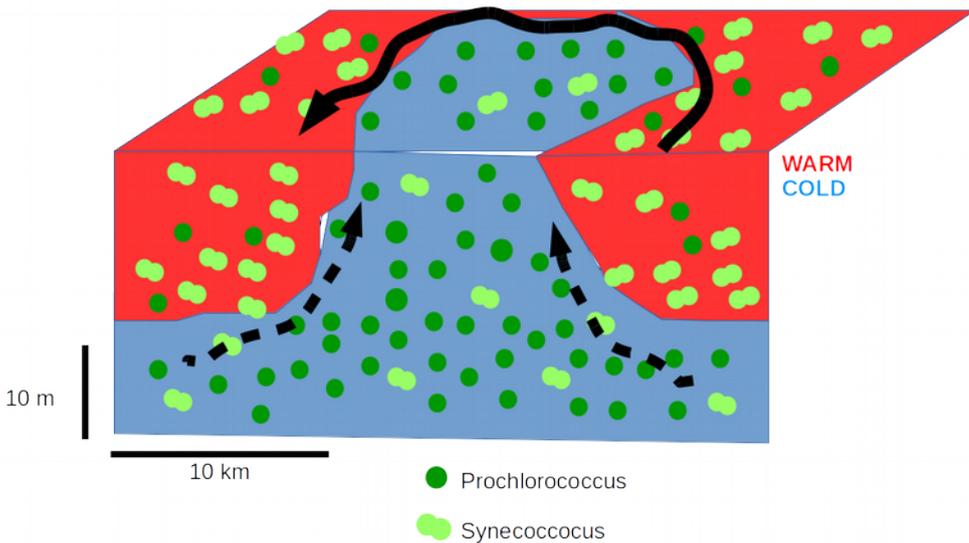
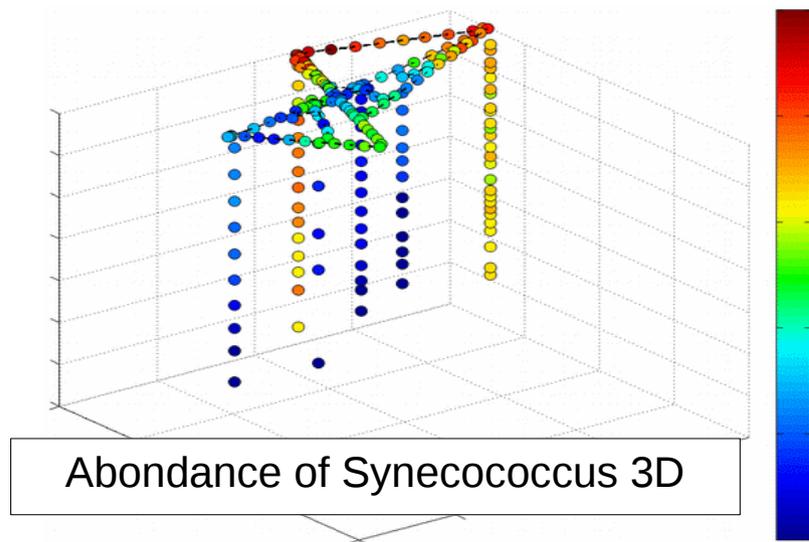
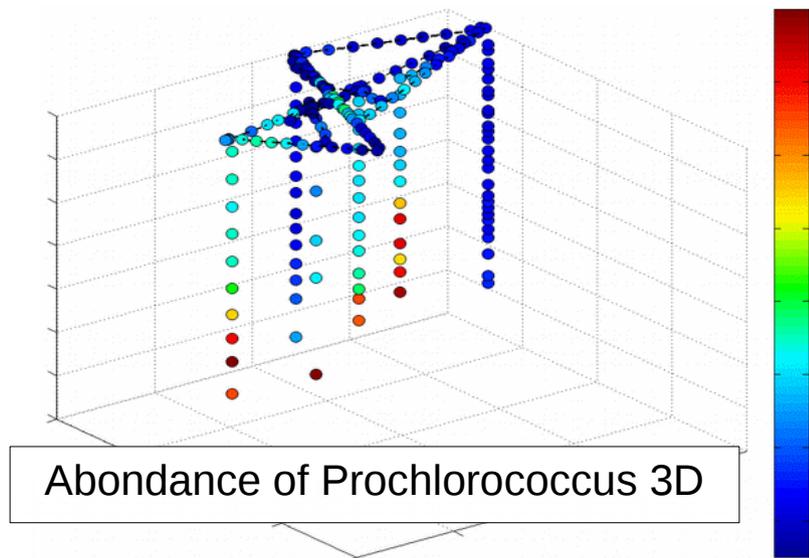
*Changement de structure de  
la communauté*

[Marrec et al. Biogeosc. 2017, Rousselet et al., JGR in prep.]

## 2) Impact de la (sous)mésoéchelle sur les blooms

### Campagne OSCAHR [Doglioli, 2015]

#### Mesures de cytométrie 3D



*La physique dirige  
l'organisation spatiale  
de la communauté  
phytoplantonique*

[Marrec et al. Biogeosc. 2017, Rousselet et al., JGR in prep.]

# Bilan des recherches

## *Océanographie Physique*

- Identification des processus de genèse des tourbillons et meilleure compréhension de leur dynamique et de leur impact sur le transport sur une large gamme d'échelle et de sites
- identification et suivi des barrières de transport *in silico* et *in situ*
- nouvelles estimations *in situ* des coefficients de mélange dus à la turbulence et comparaison avec les modèle numériques

# Bilan des recherches

## *Couplage Physique-Biogéochimie-Biologie*

- identification du rôle des courants sur la connectivité larvaire et de l'interaction entre courant et mouvement verticale du zooplancton
- modélisation de l'advection, la dispersion et la décantation de particules
- mise en évidence par données in situ de l'impact de la (sous)mésoéchelle sur les blooms et la structure de la communauté phytoplanctonique

# Bilan des recherches

Méthodologies échantillonnage nouvelles et originales

Développement d'outils numériques

LAMP3D-FOAM, WATERS, LATEXtools, SPASSO

*disponibles dans section « Download » de mes pages web perso*

Production scientifique

>30 articles de rang A et >50 participation à conférences

*dont une partie importante dans le cadre d'encadrement de stagiaires et doctorants et collaboration avec jeunes post-doc*

# Perspectives d'enseignement

## Nouvelle Licence Science de la Vie et de la Terre

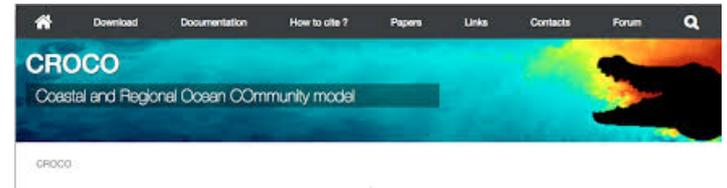
*UE Introduction à l'Océanographie → sorties en mer*



## Nouveau Master de Sciences de la Mer

*UE Modélisation Océanique 3D → plateforme CROCO*

*UE Approches Lagrangiennes →*



## Formation Doctorale

*Suite à l'expérience de*

*FineMed 2017*

*International Workshop and Summer School*

[www.mio.univ-amu.fr/~doglioli/FineMed/](http://www.mio.univ-amu.fr/~doglioli/FineMed/)

*une "École Méditerranéenne d'Océanologie" ?*



# Perspectives de recherche

Court  
Term

## ***Effet d'îles***

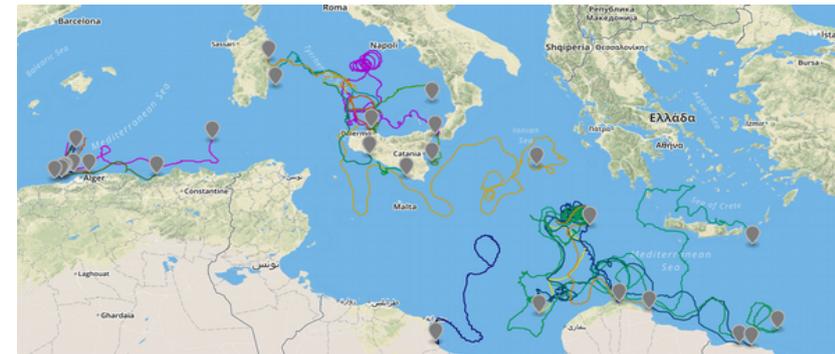
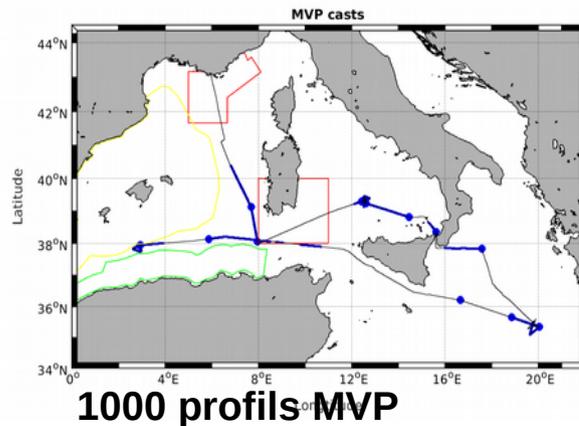
Finalisation de la valorisation des données OUTPACE et Satellite

## ***Impact des vitesses verticales sur la distribution des particules + calval***

Données OSCAHR et modélisation numérique

## ***Circulation fine échelle et de bassin et impact sur budgets biogéochimiques***

Valorisation données campagne PEACETIME [Guieu et Desboeuf, 2017]



20 bouées avec trajectoires plurimensuelles

## ***Circulation fine-échelle et biodiversité***

**Projet BIOSWOT**

***Vitesses verticales et impact sur la pompe biologique du carbone de la surface au mésopélagique***

**Projet Marbless**

Moyen  
Term

Long  
Term

Temps

# Perspectives de recherche

## *BIOSWOT*

### Fine-scale **biophysical** applications of **SWOT**

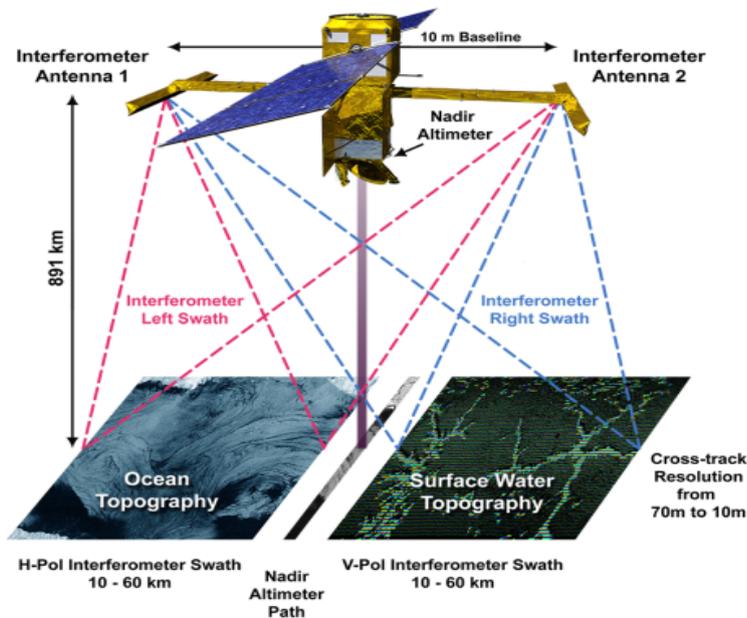
PI: F.d'Ovidio CoI: X.Capet, M.Levy, C.Cotté, A.Doglioli

G.Gregori, S.Barrillon, A.Petrenko, J.-L. Fuda, M.Thyssen, M.Goutx, N.Bhairy (MIO)

F.Dumas (SHOM), P.Garreau (IFREMER), A.Pietri (LOCEAN),

A.Pascual (IMEDEA, Spain), F.Cyr (MPO, Canada)

### SWOT (Surface Water and Ocean Topography)



***Courant dérivé par altimétrie  
approchera résolution de SST & CHL***

**Une grande opportunité pour  
l'étude du couplage!**

### Objectif:

Ouvrir la voie à l'exploitation scientifique  
des données de SWOT  
au delà de l'océanographie physique.

### Deux axes :

- i) vitesses verticales et pompe biologique
- ii) circulation fine-échelle et biodiversité

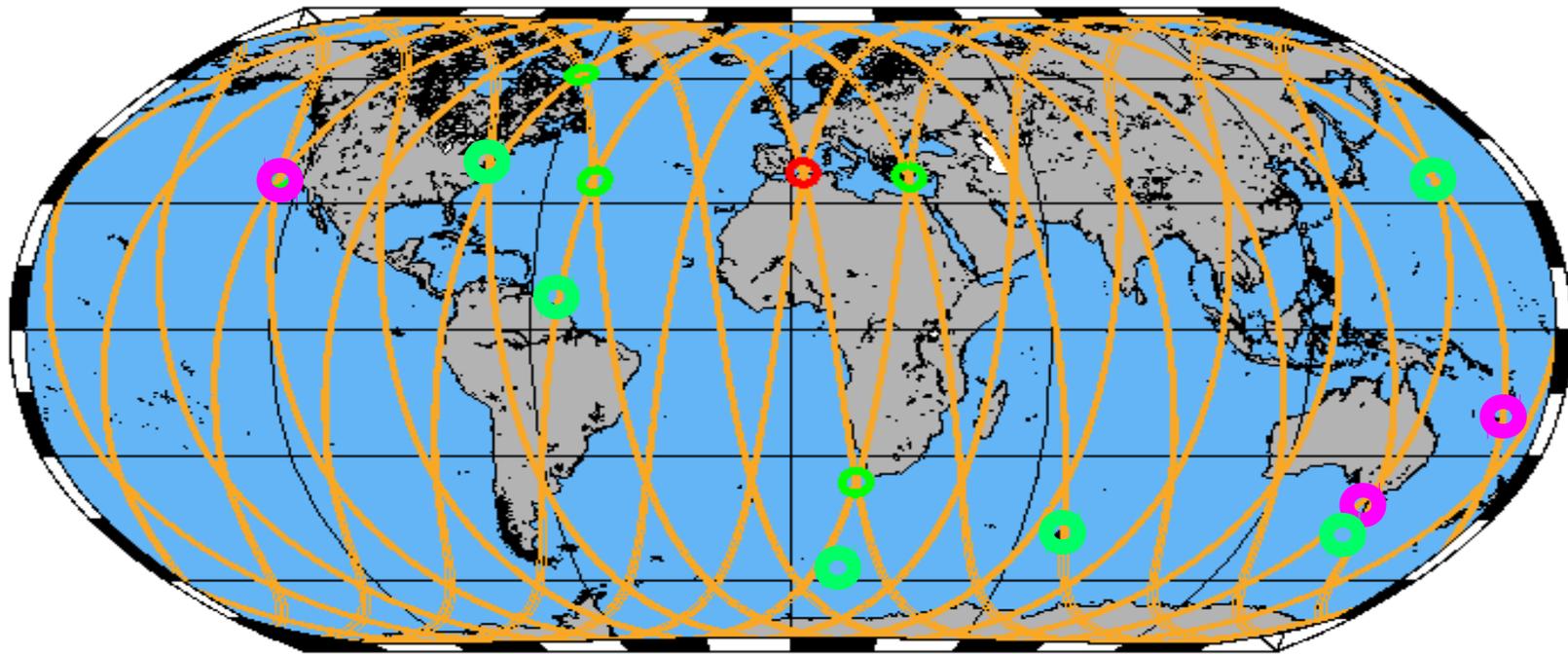
# Perspectives de recherche

## *BIOSWOT*

### Fine-scale **biophysical** applications of **SWOT**

Fast sampling phase (1 day orbit) : Jan-Fev-Mar 2022

### **“Adopt a crossover” initiative**

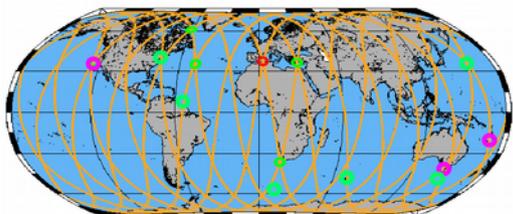


● Formally adopted (CalVal plan): 4

● Proposed adoption: 10

@MIO : développement et organisation  
de la méthodologie interdisciplinaire *in situ*

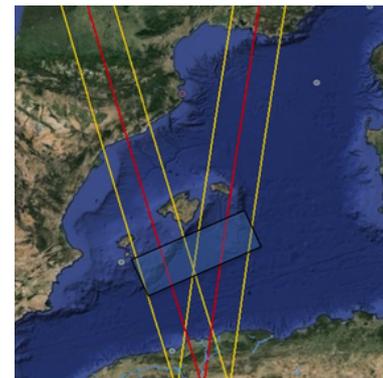
# Perspectives de recherche



● Formally adopted (CalVal plan): 4    ● Proposed adoption: 10

Première campagne

mai 2018



BHO Beautemps-Beaupré  
(SHOM, France)



28 Avril-14 May 2018

R/V García del Cid  
(CSIC, Spain)



5-17 May 2018

Gliders  
(MIO & SOCIB)



Drifters  
(CSIC, SOCIB,  
SHOM)

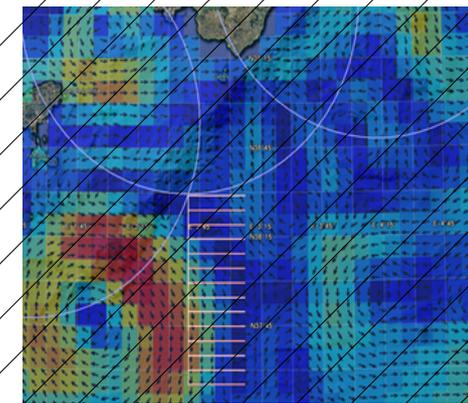
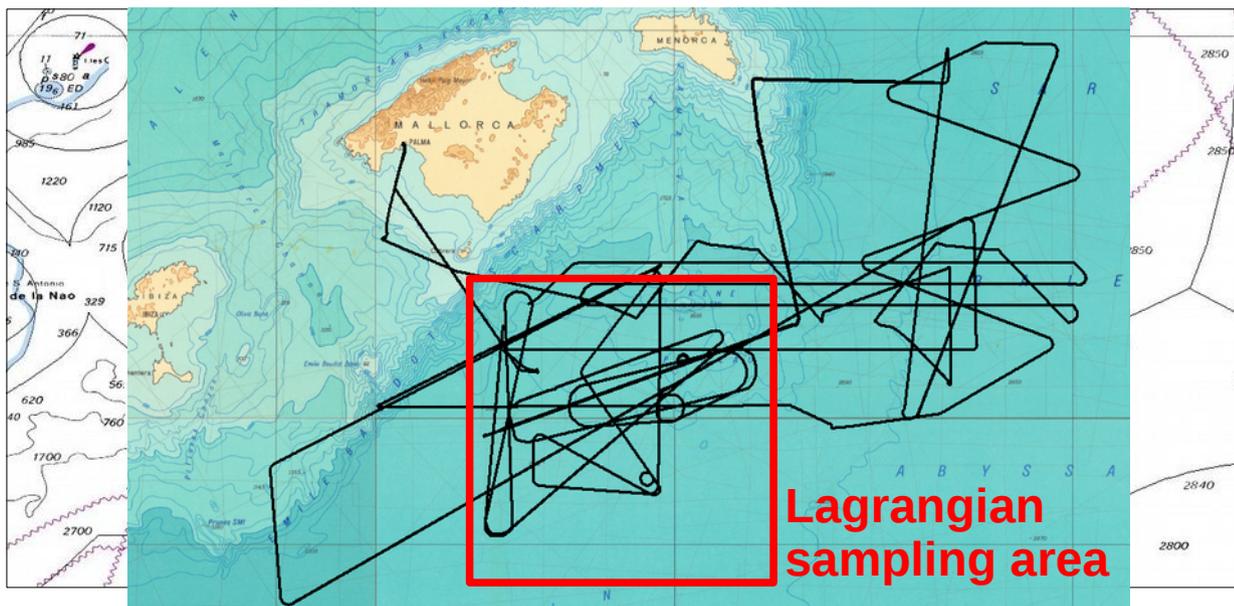


Airplane  
with Lidar & Hyperspectral  
Cameras (univ. Caen)

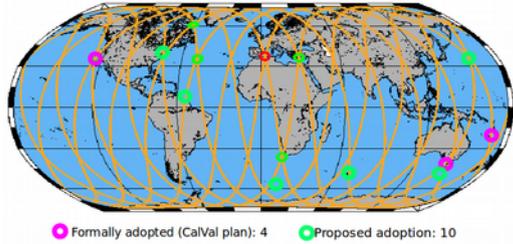
**MAUVAISE  
METEO**



**PRÉVU  
2019**

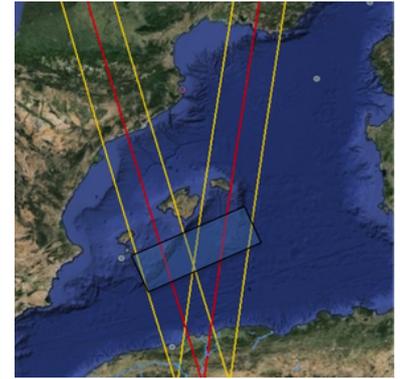


# Perspectives de recherche

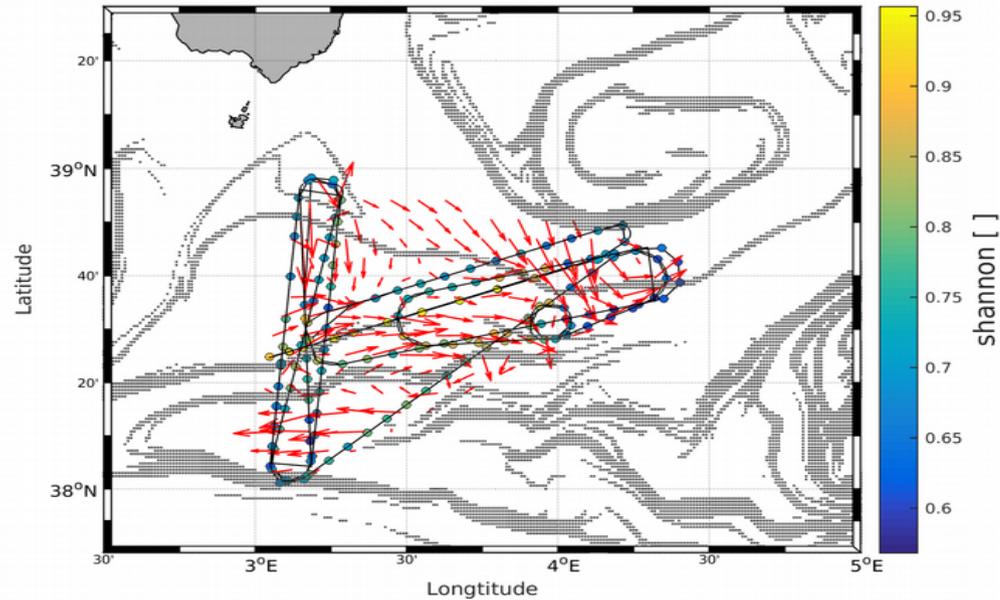


Première campagne

mai 2018



Cytometry from 08-May-2018 13:02:00 UTC to 12-May-2018 14:02:00 UTC  
ADCP (1st bin)



Analyse en temps réelle montre des contrastes intéressants en biodiversité associés aux zones frontales.

*Test de faisabilité réussi et plein de données à exploiter !*

# Remerciements

Recherche Google Images  
= (nom+prénom+[oceanography OR mio])

nov'00-oct'04

nov'04-août'06

depuis sep'06

*Thèse*

*Post-doc*

*Maître de Conférences*



RFesta



Brigitte Pantat  
Dominique Estival



et tout le reste de ma famille!

**Merci à mon tuteur, aux rapporteurs et à tout le jury**

**Merci à tous pour votre attention!**