

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

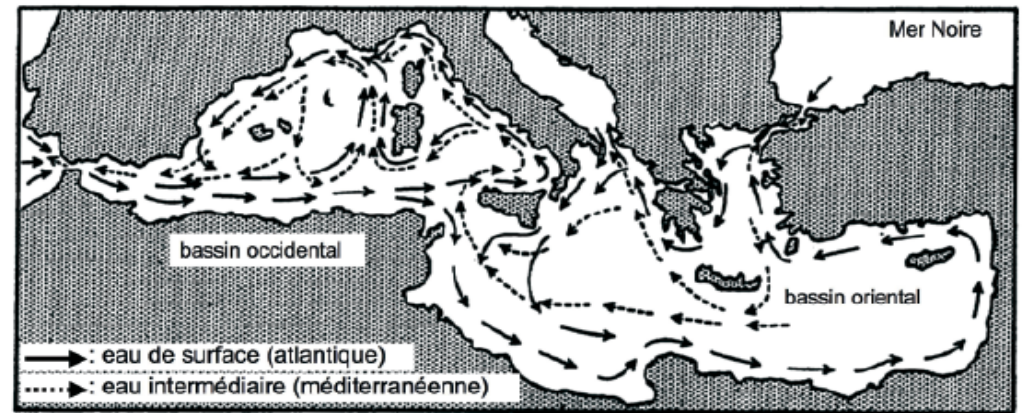
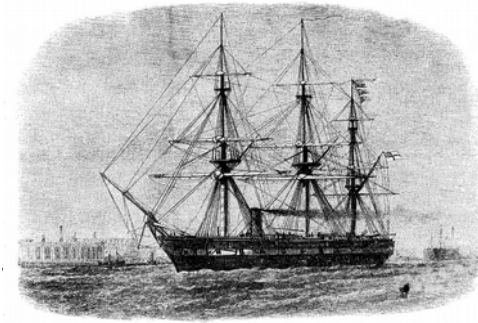
1768-1775

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

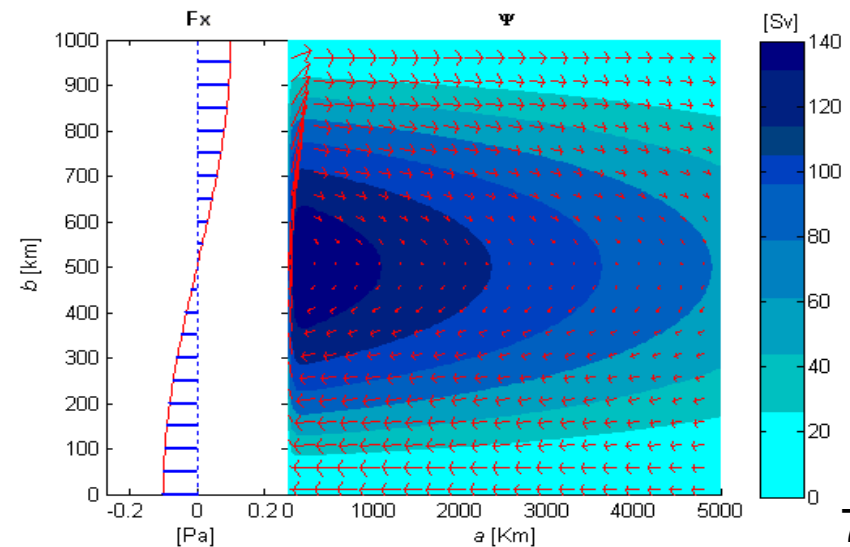
$$\psi(x, y) = \frac{F_o \pi}{\beta b} \sin\left(\frac{\pi y}{b}\right) (x - a)$$

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

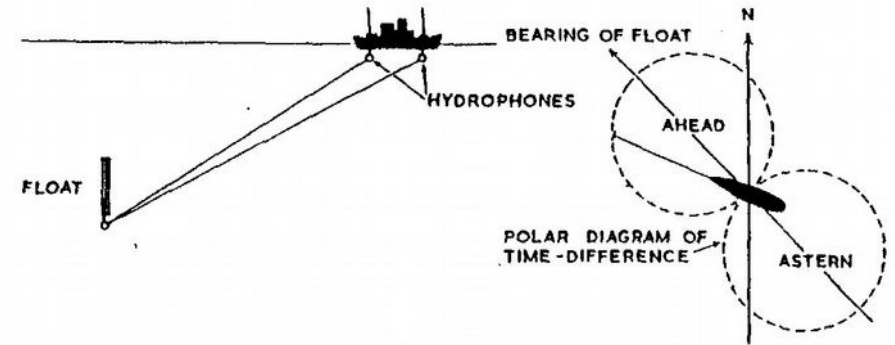


Fig. 3. Method of locating float.

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

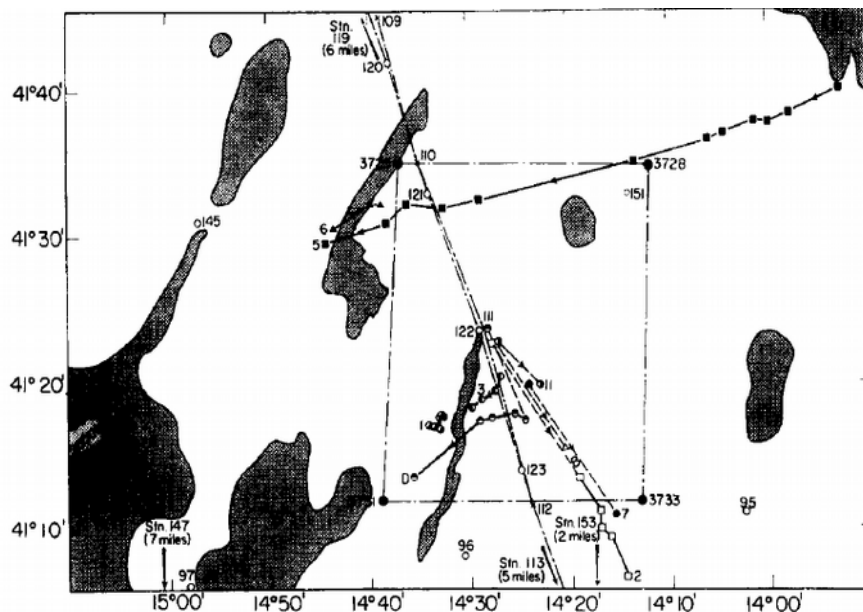


Fig. 2. Tracks of the floats, and positions of hydrographic stations. The dashed sections of the float tracks are shown on a larger scale in Fig. 3.

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

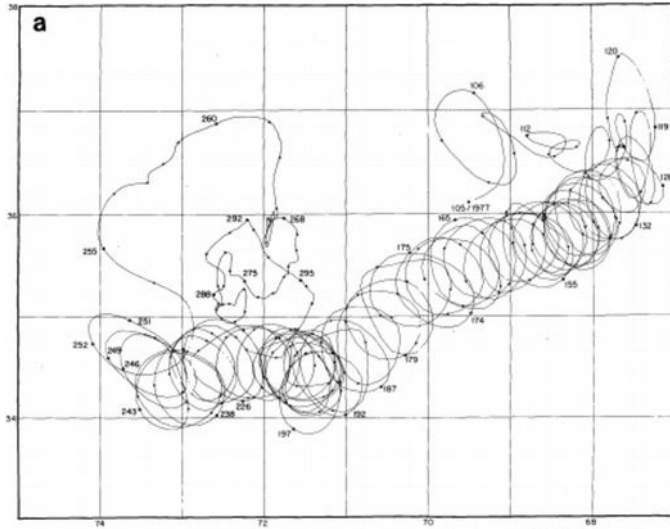


FIG. 3a. Trajectory of buoy 711 which was launched on 14 April 1977 (day 104) in ring Bob and recovered on 26 October 1977 (day 299) in the Sargasso Sea.

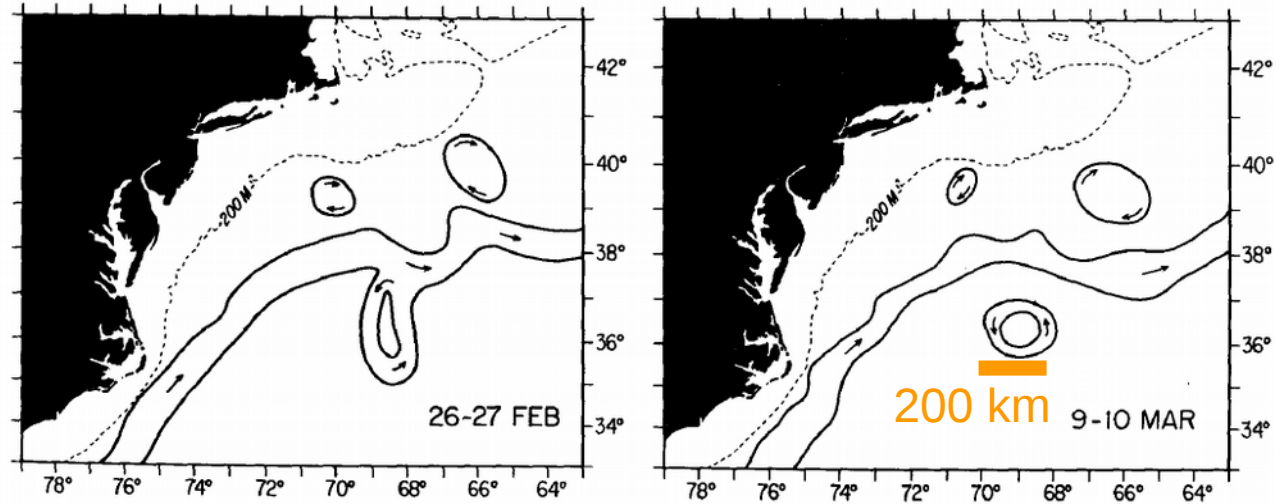


FIG. 1a. Schematic diagram showing formation of Gulf Stream ring Bob, February–March 1977, based on infrared images from the NOAA 5 satellite. Two anticyclonic rings were observed north of the Gulf Stream.

RAFOS floats



Richardson et al., 1979,80, 83

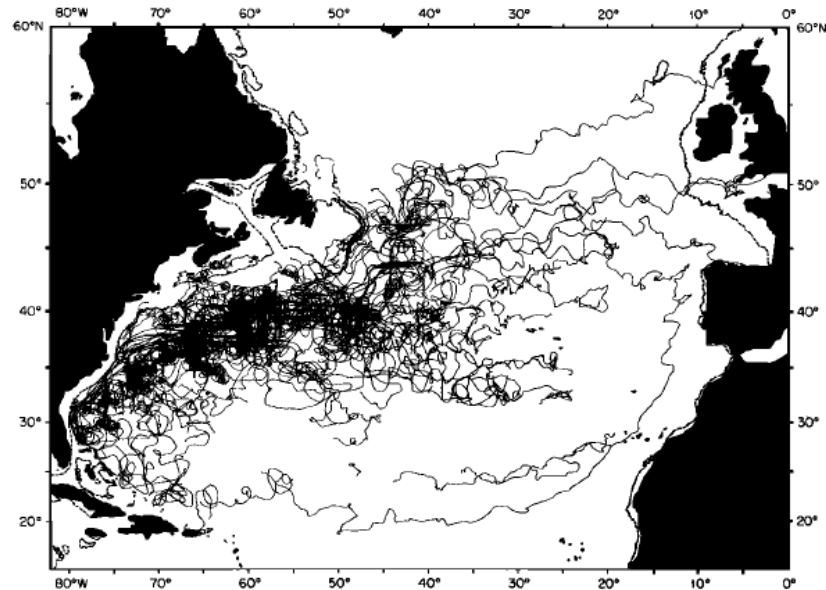


Fig. 2. Summary plot of 110 free drifting buoy trajectories (1971–1981). Buoy data were generously contributed by many individuals (Table 1).

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”

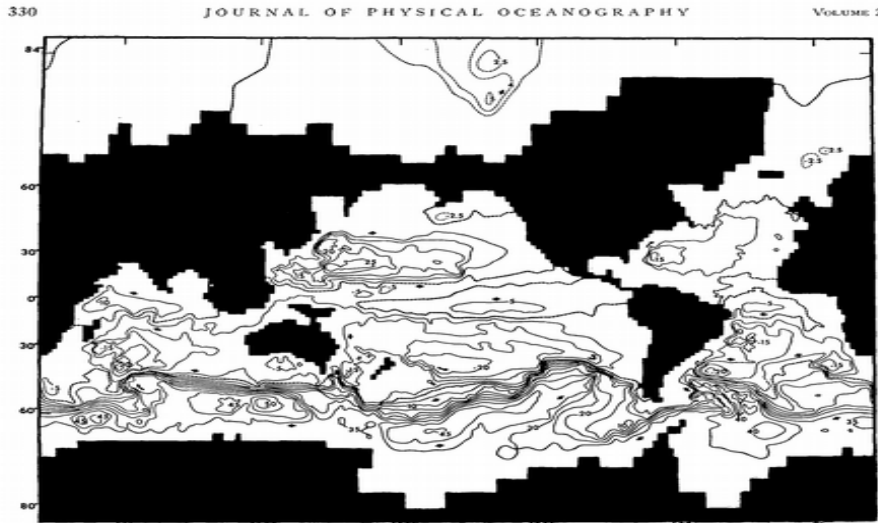


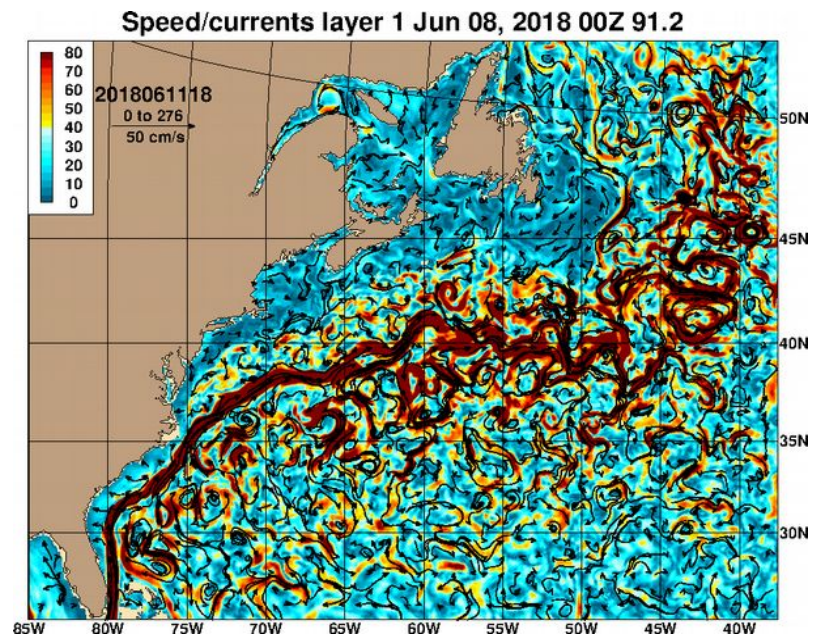
FIG. 8. Pattern of the mass transport streamfunction for the depth configuration shown in Fig. 5. $\Delta\sigma$ is equal to $4 \times 10^3 \text{ cm}^2 \text{ sec}^{-1}$.

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

et aussi
modélisation HR régionale

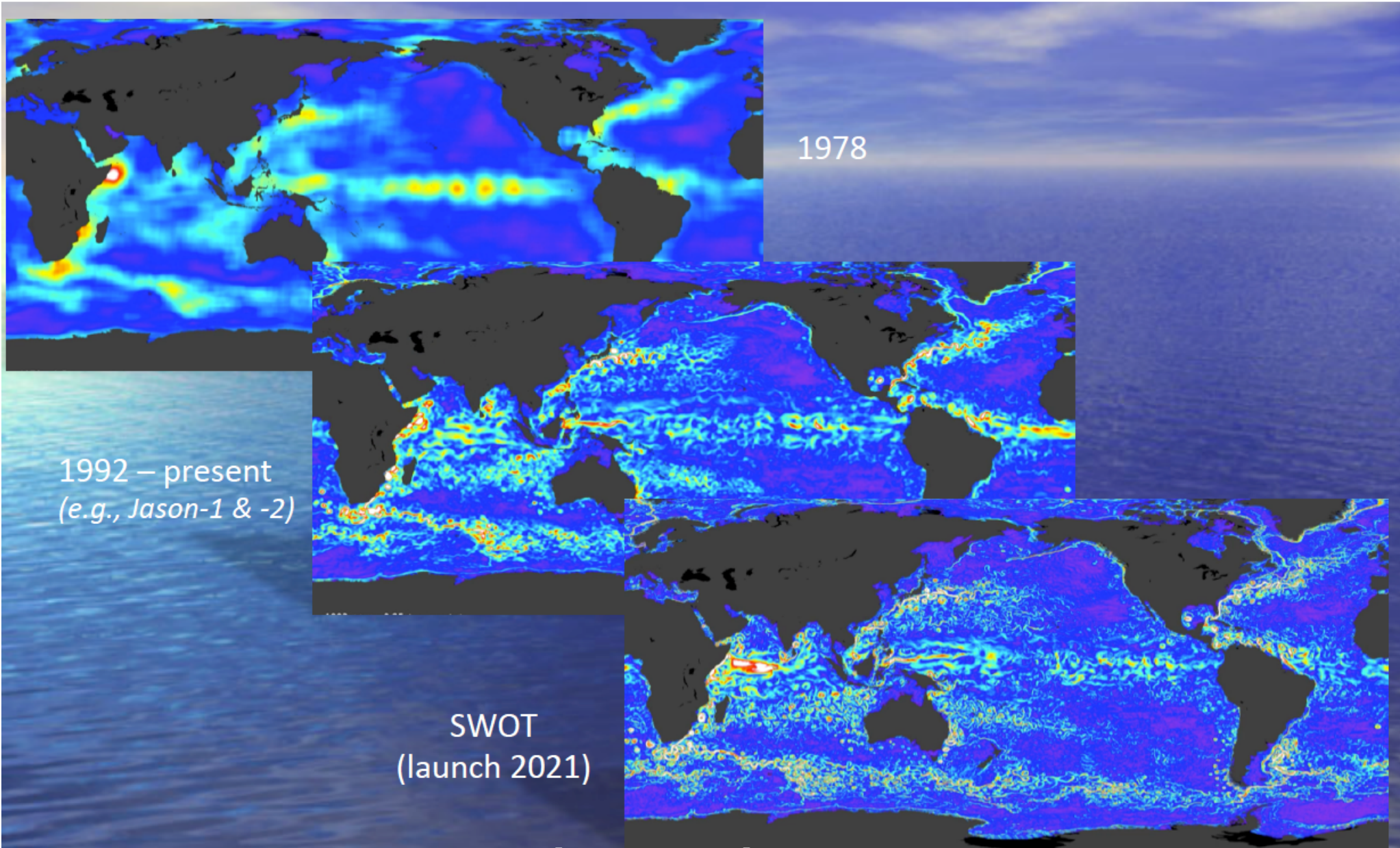
Brian & Cox 1972

Premier modèle global



La courantologie de surface par satellite

Vision synoptique des courants géostrophiques de surface: en évolution!



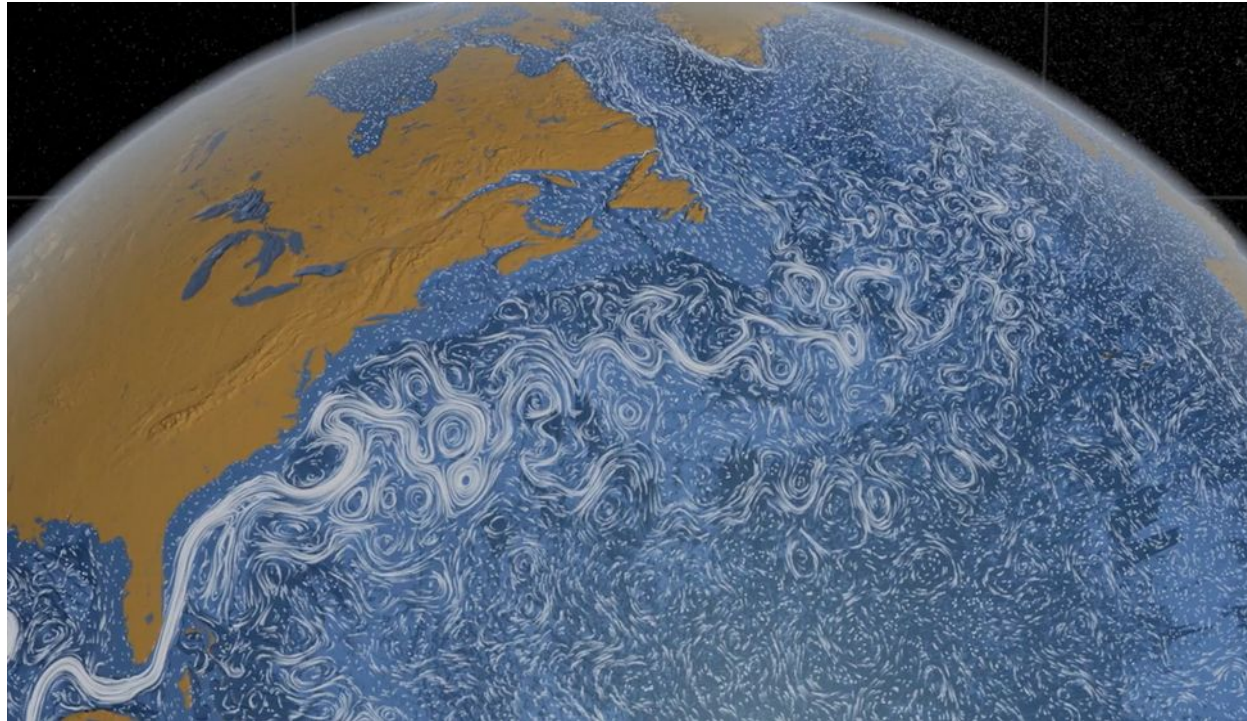
1978

1992 – present
(e.g., Jason-1 & -2)

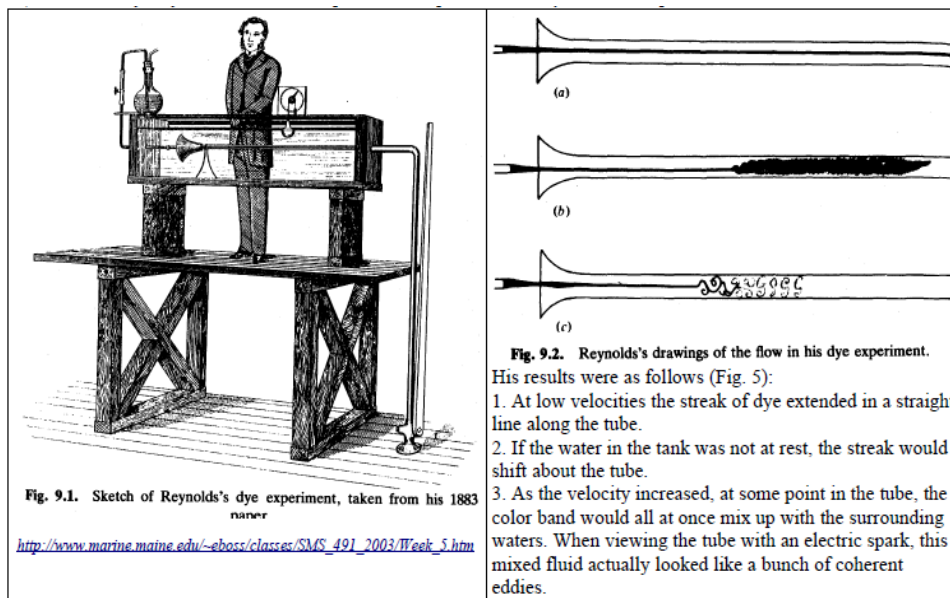
SWOT
(launch 2021)

[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

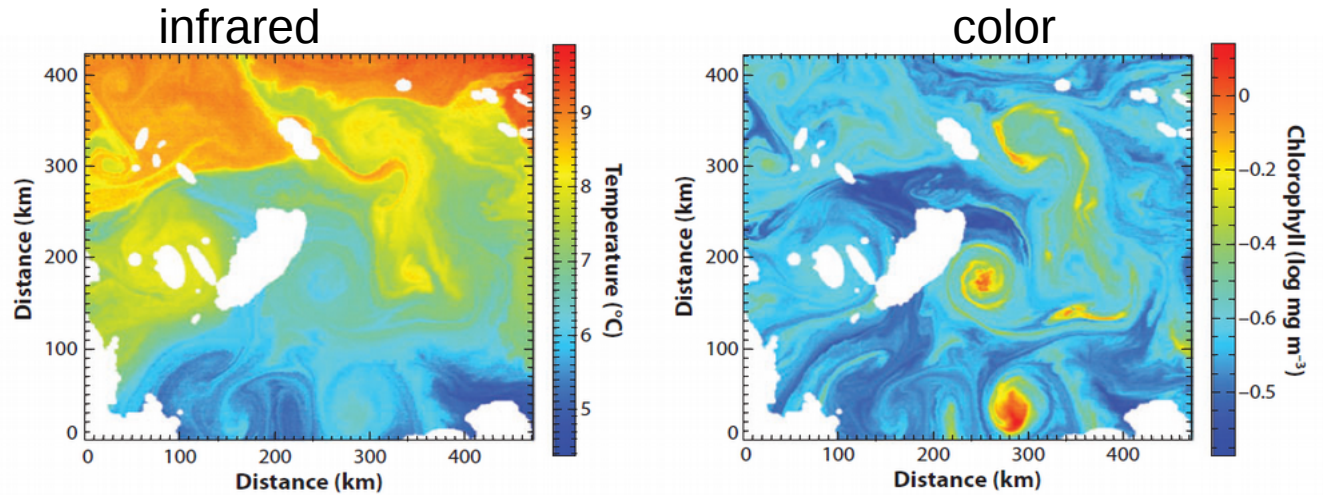
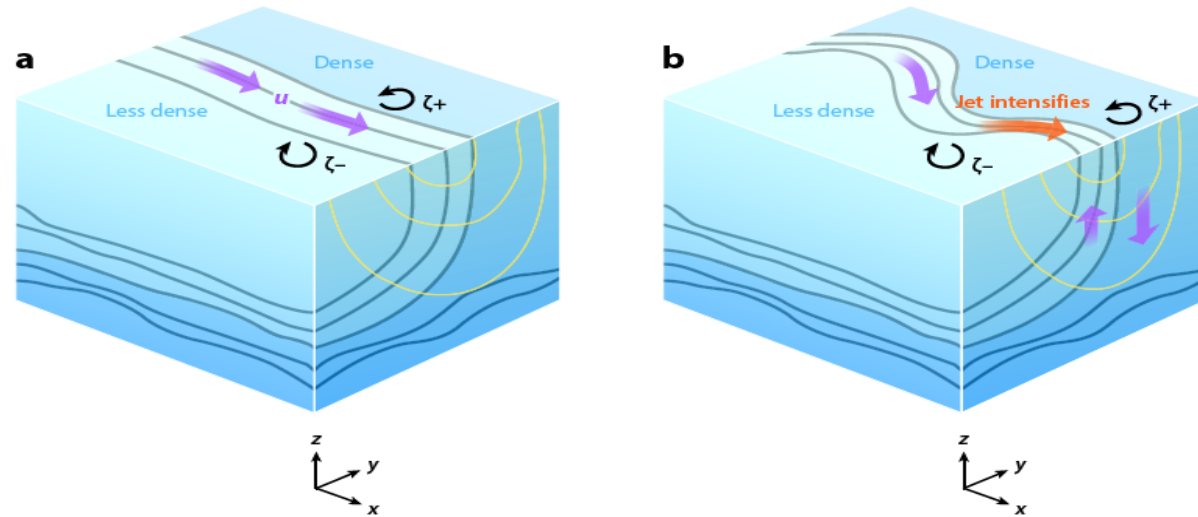


Figure 1

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

[Klein et Lapeyre, 2009]

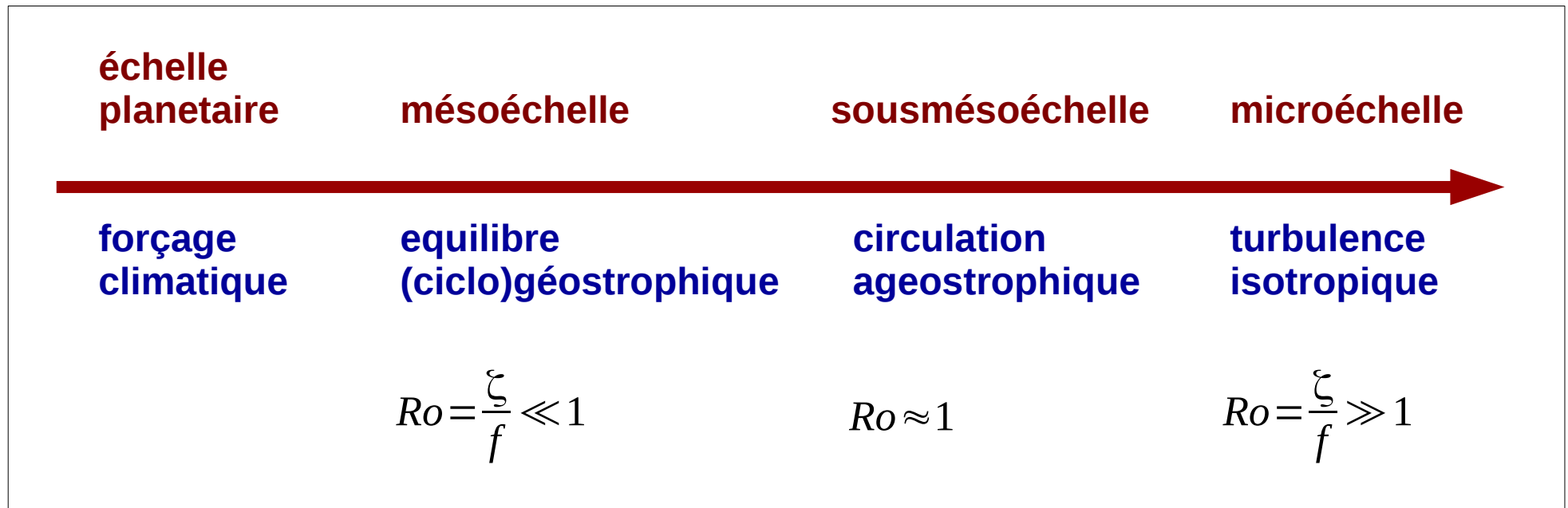


[Mahadevan 2016]

... 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

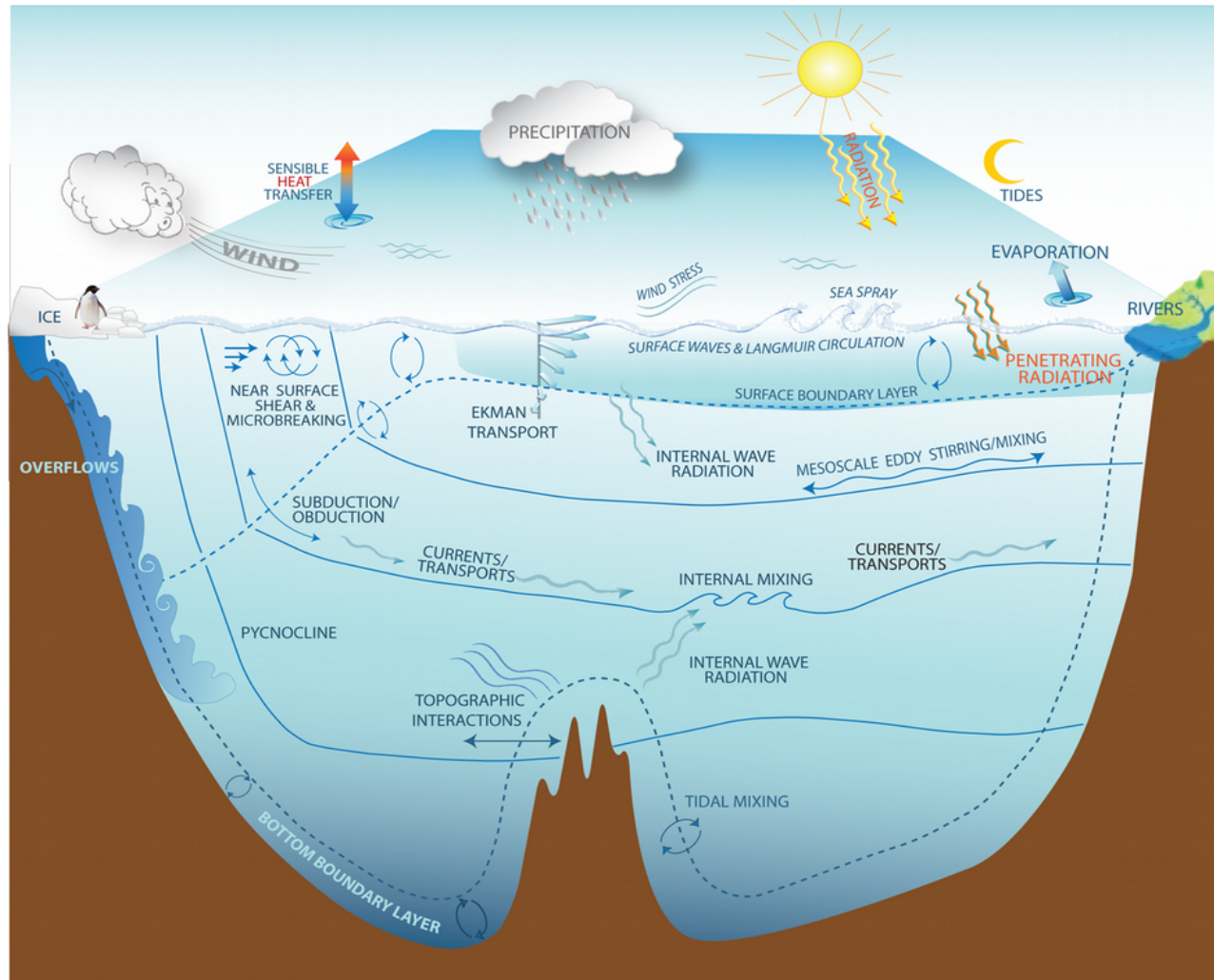
K_z sur la verticale



la turbulence, une question difficile

Grande variabilité, nombreux processus!

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



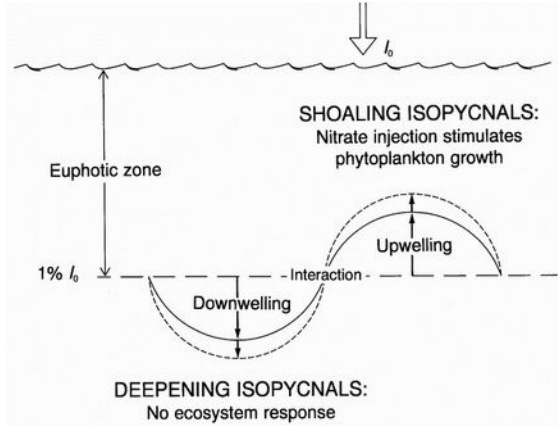
A schematic of the small scale mixing processes in the ocean

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

Couplage physique – biogéochimie – biologie

À mésoéchelle

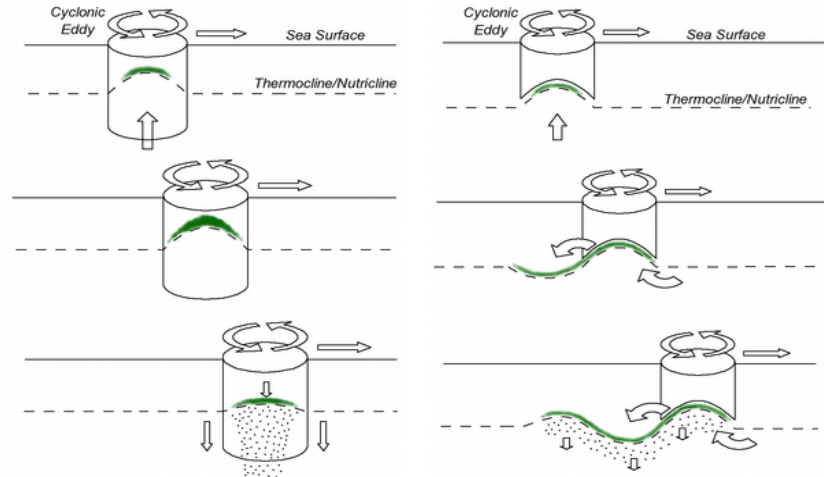
déformation de la nutricline
par les tourbillons



[MCGuillicuddy et al. 1998]

“Close” Eddy

“Leaky bottom” eddy

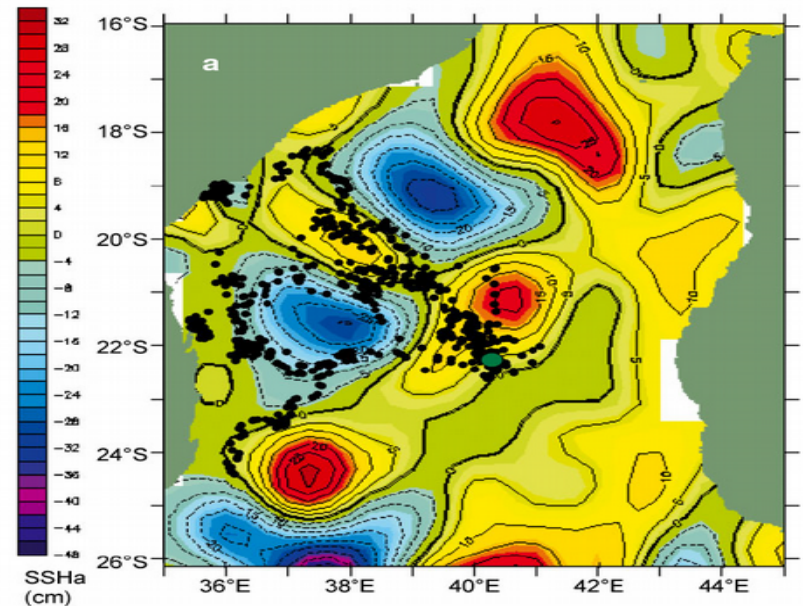
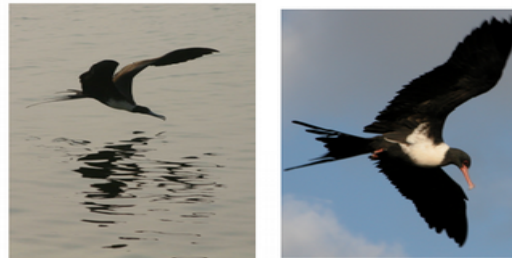


[Nencioli et al., 2008]

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

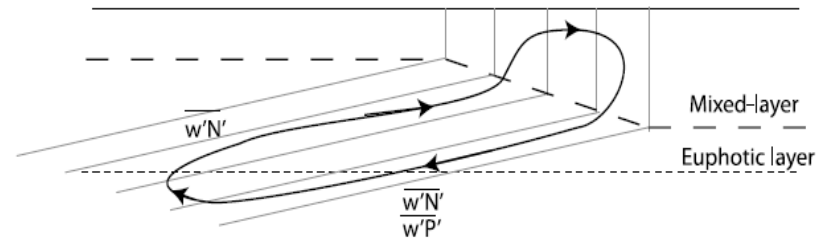
À sousmésos- et micro-échelle:

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

- contrôle de sur la diffusivité impactant la production primaire

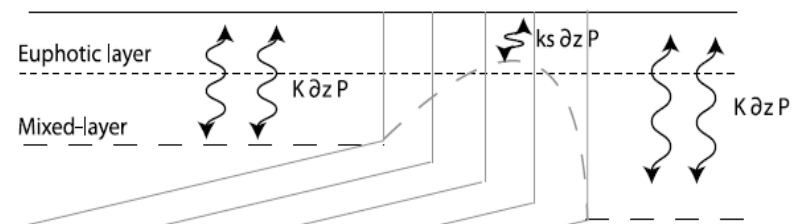
- création de “niches fluidodynamiques”

a) Transport at a submesoscale front

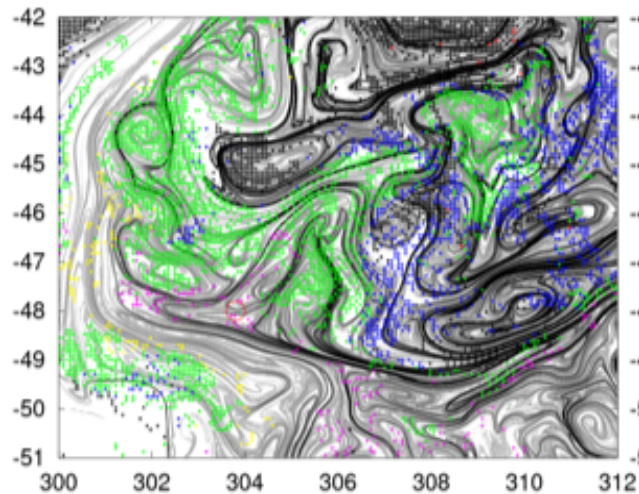


[Lévy, 2012]

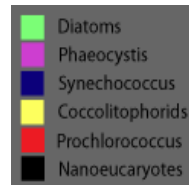
b) Vertical mixing at a submesoscale front



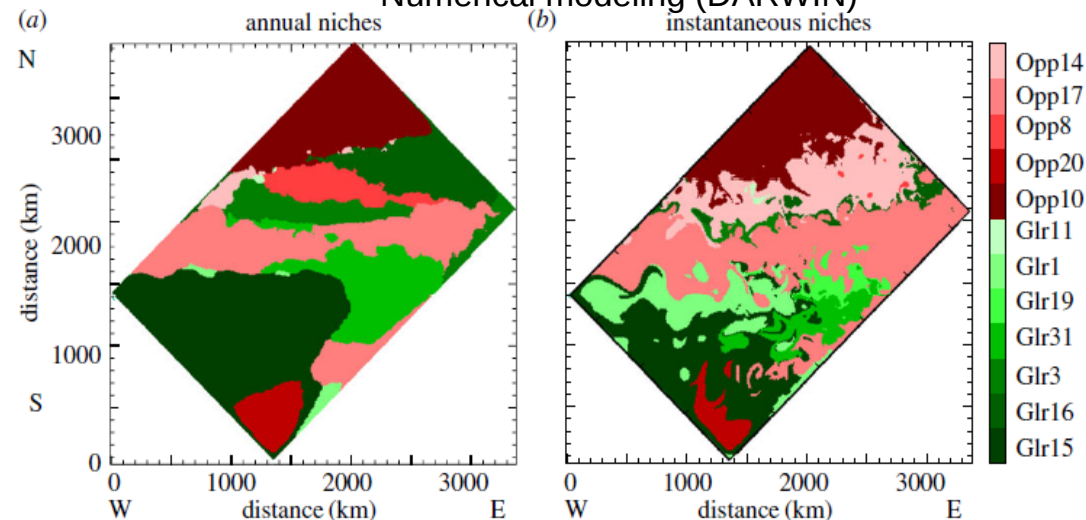
Satellite data (FSLE & Physat)



[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

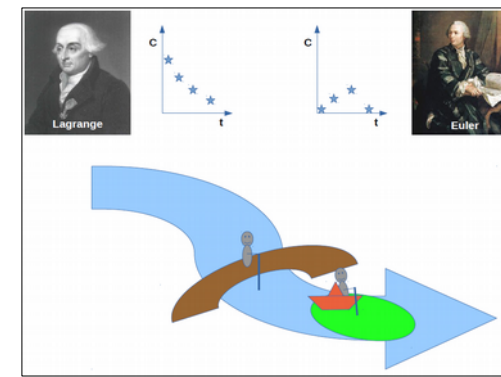
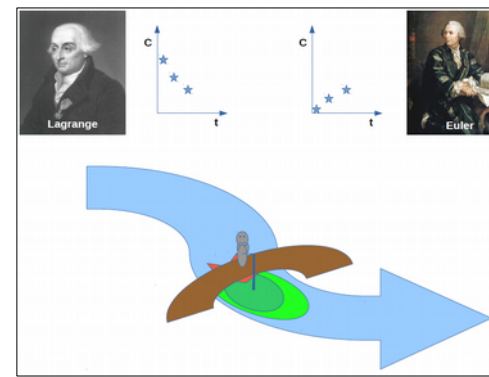
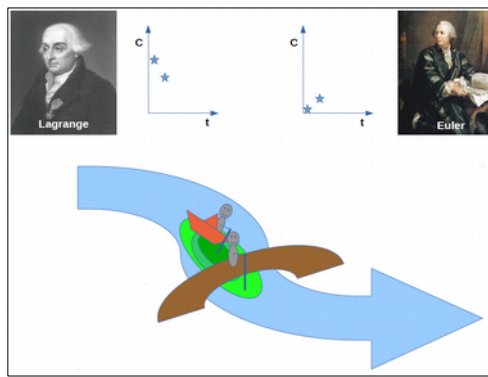
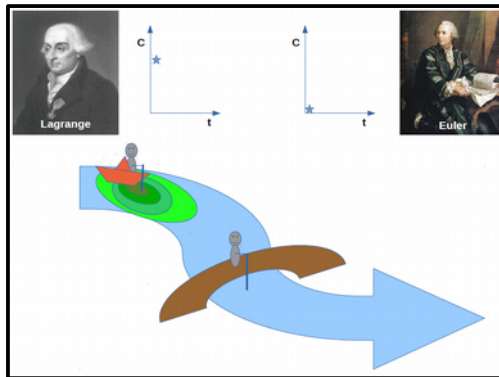
Approches

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(!)

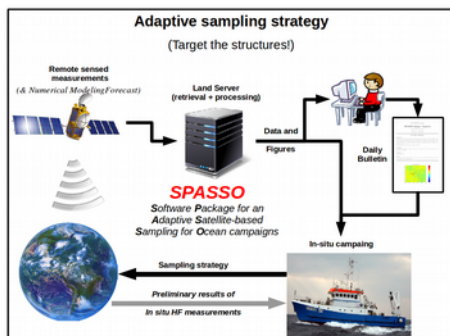
Stratégies adaptatives et Lagrangiennes (FSLE, SPASSO)

Téledétection satellite

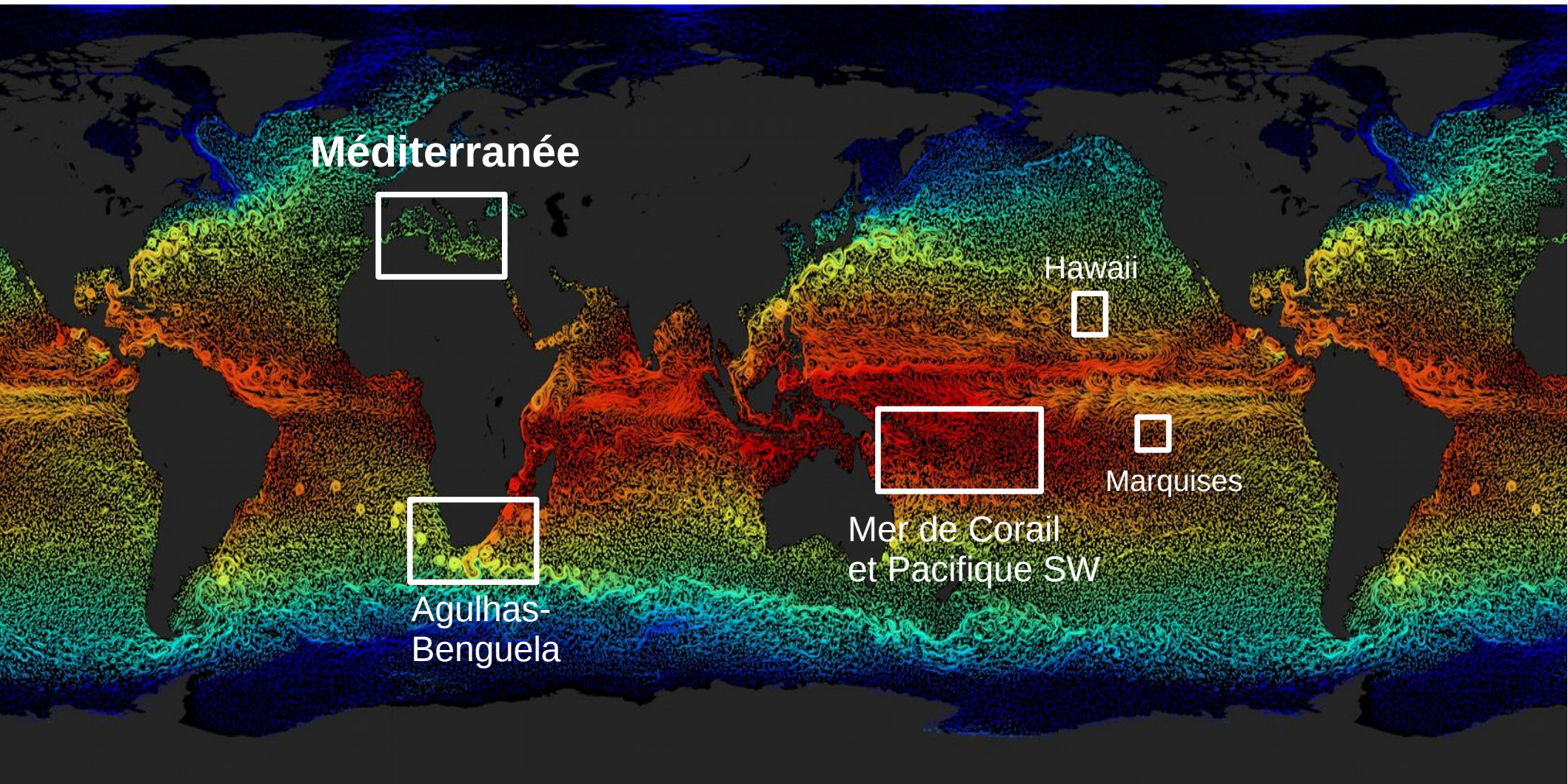
altimétrie, SST, couleur de l'eau

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

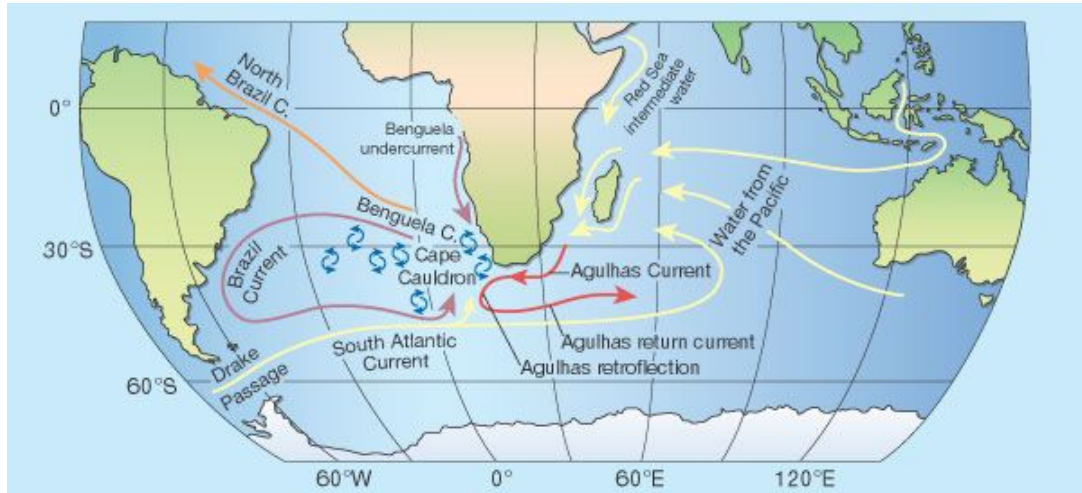


Couplage Physique-Biogéochimie-Biologie

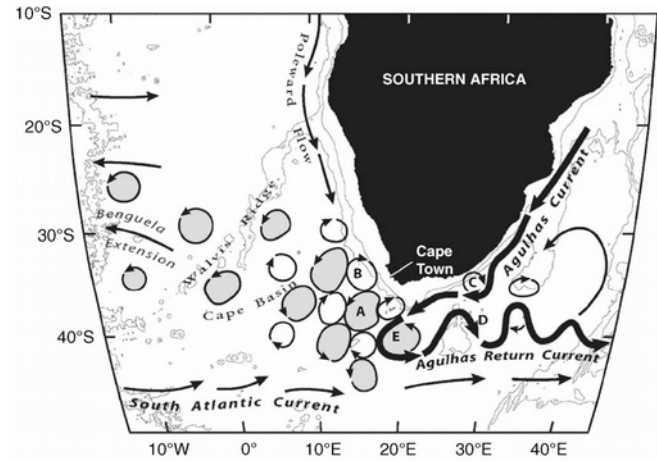
- 1) le transport du plancton et la connectivité larvaire
- 2) l'impact de la (sous)mésoéchelle sur les blooms et la structure de la communauté phytoplanctonique
- 3) l'advection, la dispersion et la décantation de particules

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

Les Anneaux des Aiguilles

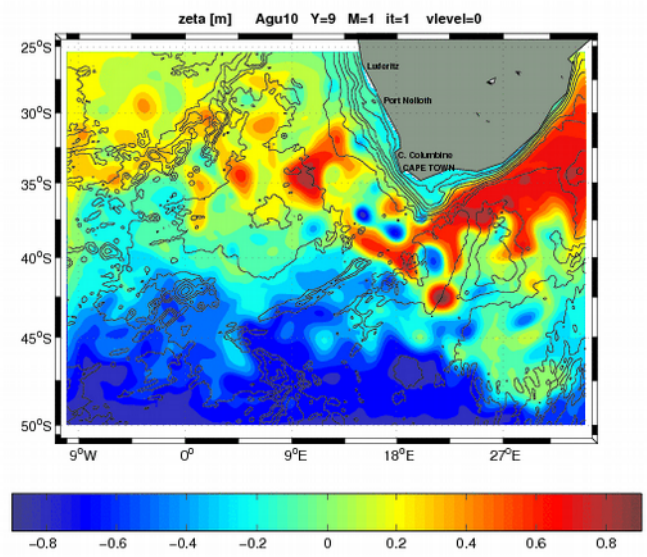


[Gordon 2003]

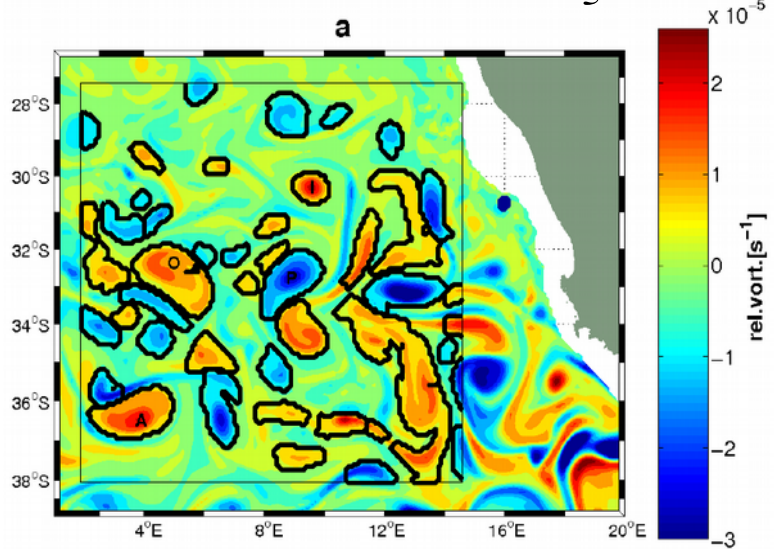


[Richardson 2007]

Config ROMS climatologique 1/10°

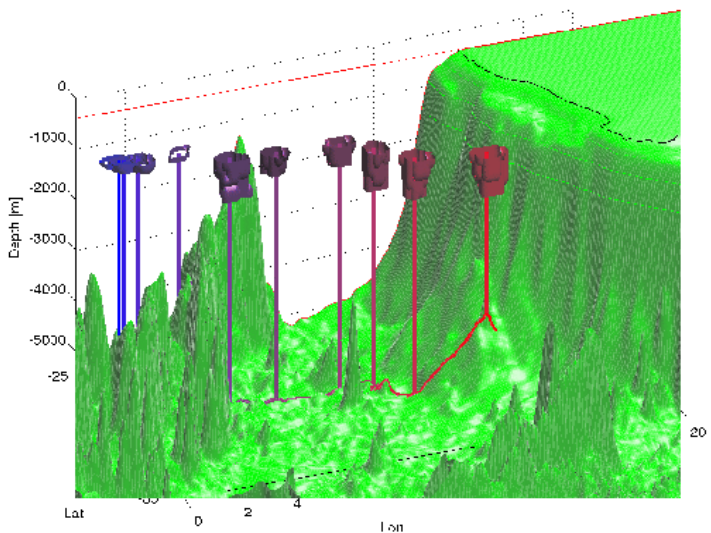
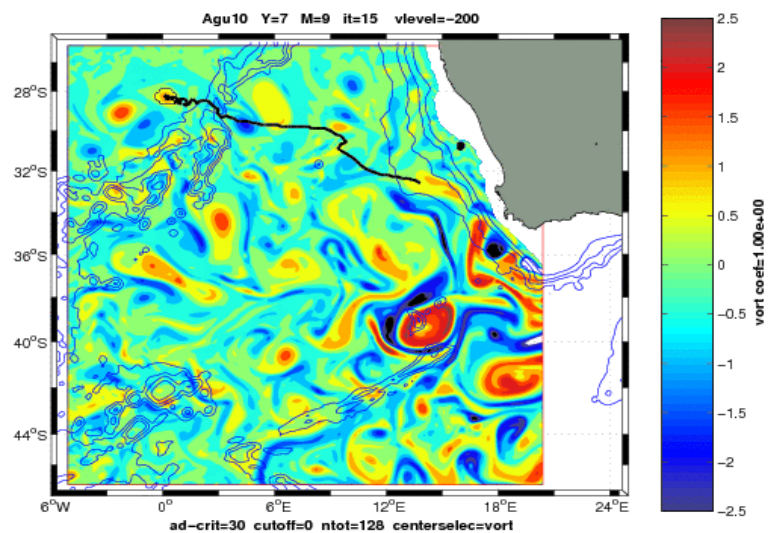


Identification des tourbillons par analyse en ondelettes de ζ

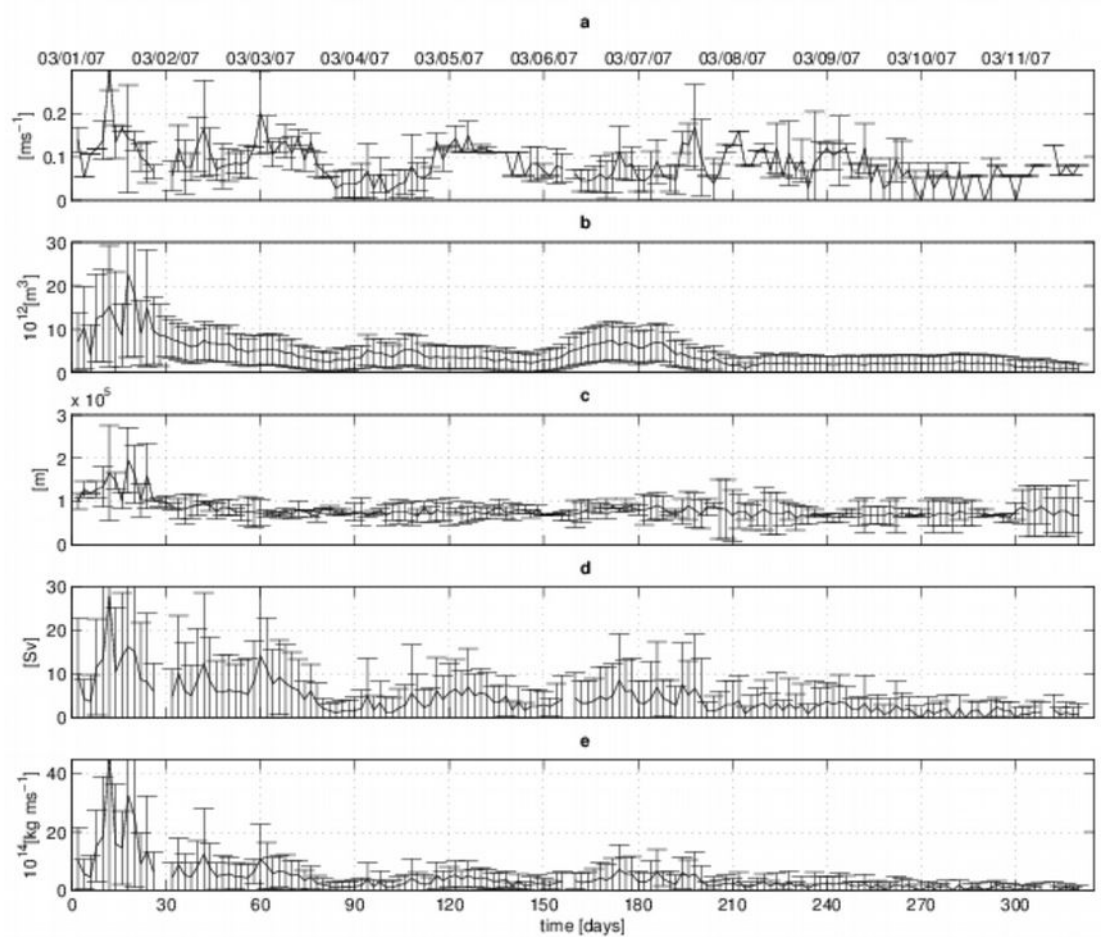


1) Dynamique des tourbillons de mésoéchelle et leur impact sur le transport

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

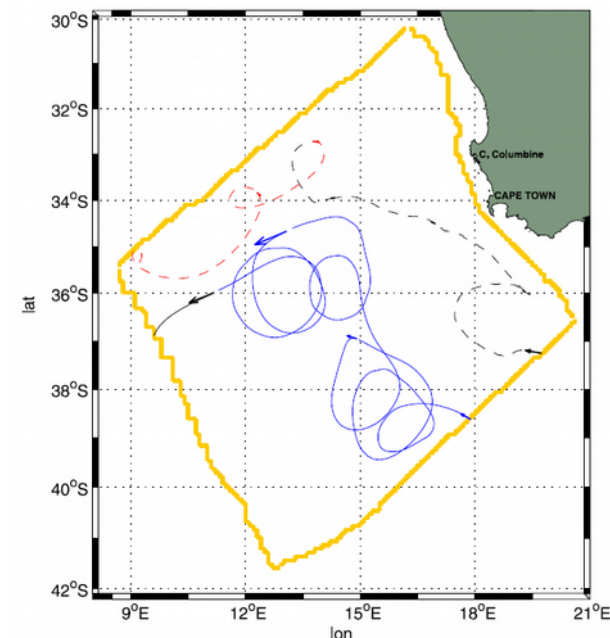
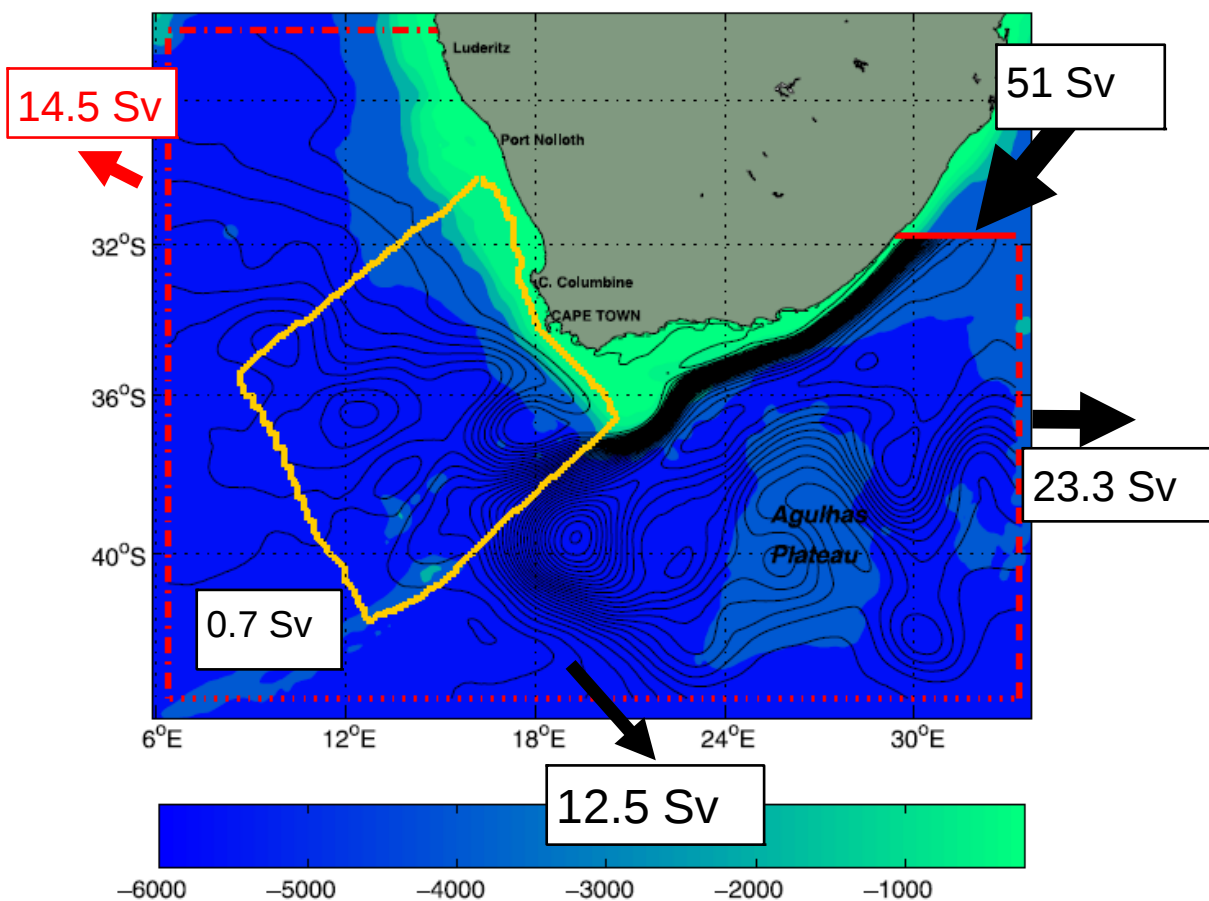


Figure 2. Trajectories of two particles (solid and dotted lines). The color code is based on the chunk regime: non-looper (black), cyclonic (red) and anticyclonic (blue). A velocity vector is reported at the beginning of each chunk.

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

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

Tourbillons: ~30% de la connexion

Anticyclones ~1.9 Sv

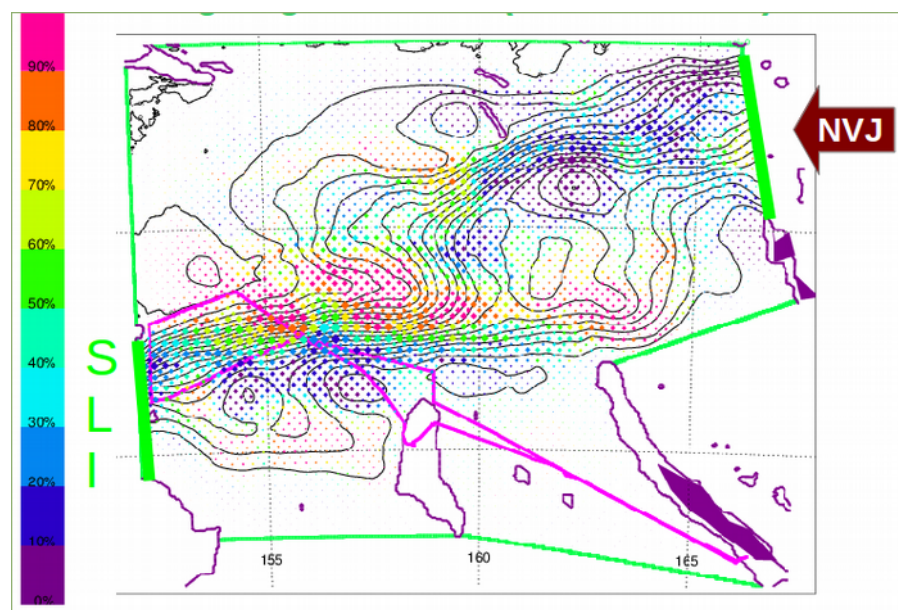
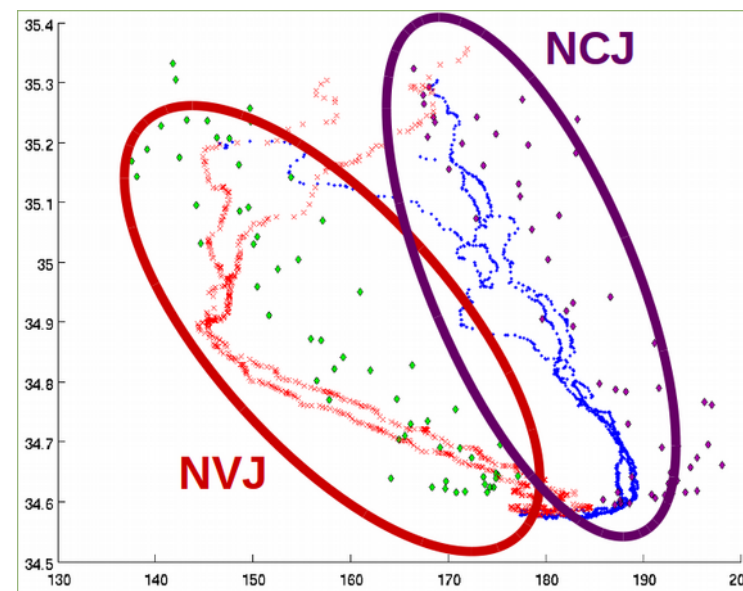
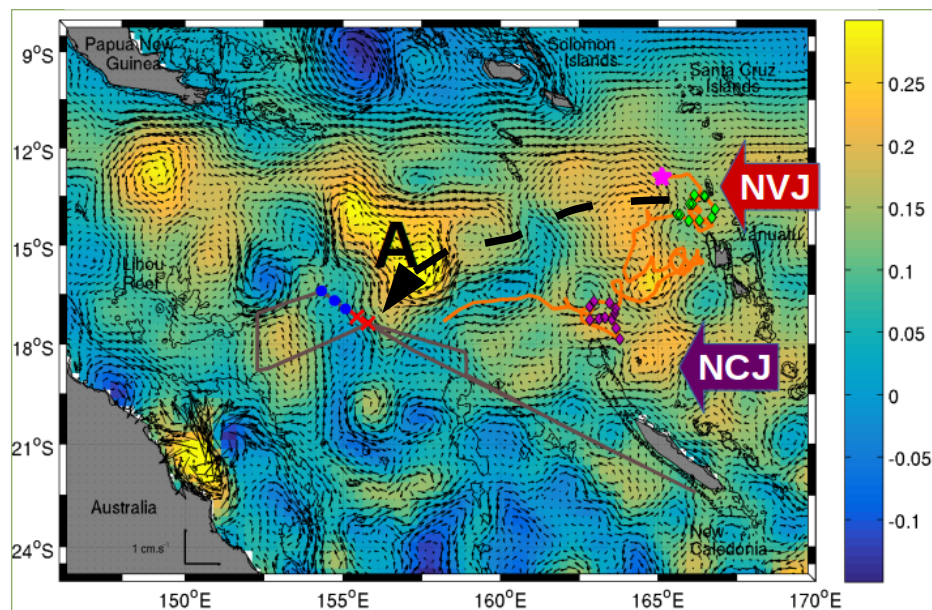
Cyclones ~2.5 Sv

[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:

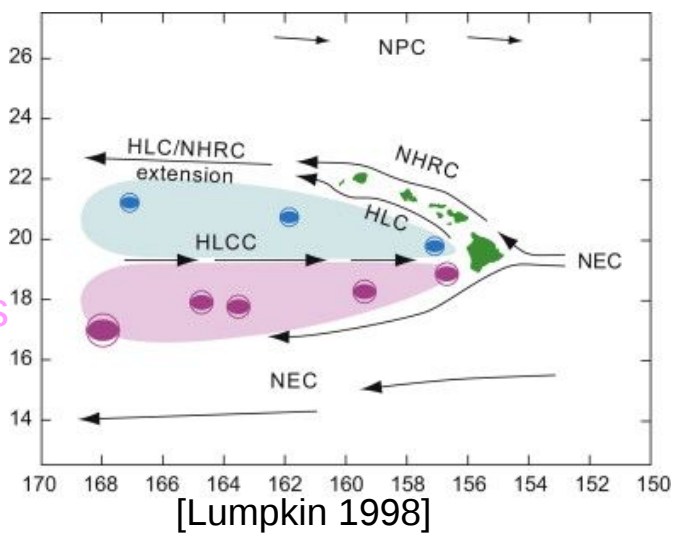
- la connexion existe et
- 70% à 90% est due aux anticyclones

[Rousselet et al, JGR 2016]

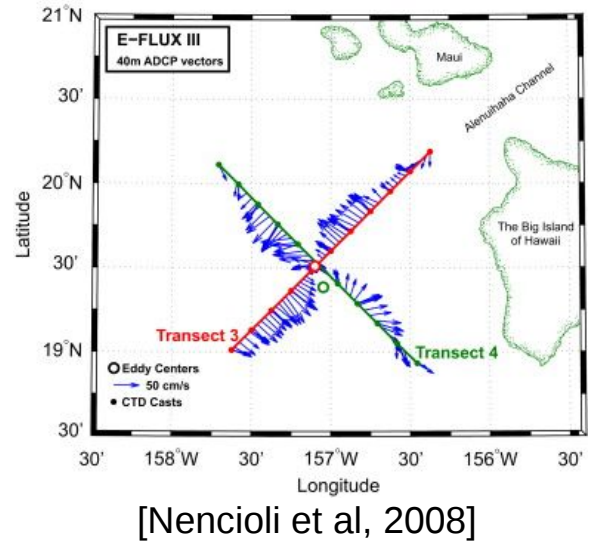
2) Les processus de la circulation à méso et sous-mésoéchelle

Archipel d'Hawaii

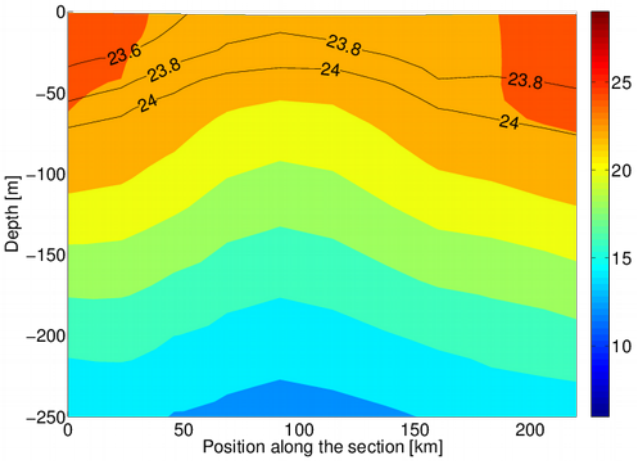
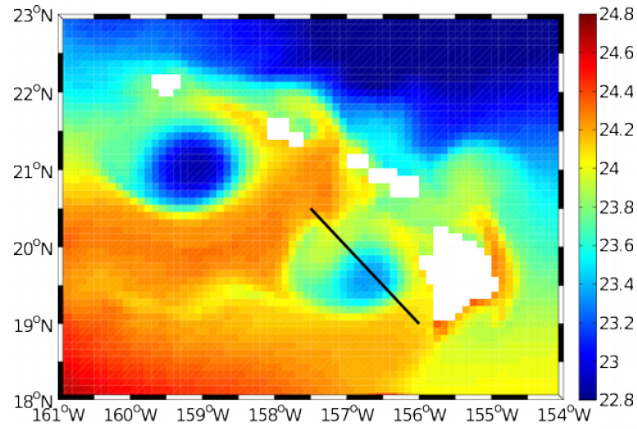
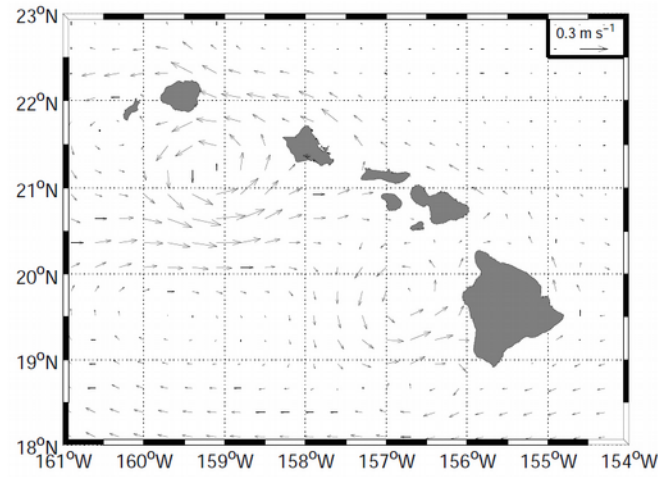
Cyclones
Anticyclones



Campagnes
E-FLUX:
Étude du
cyclone Opal



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



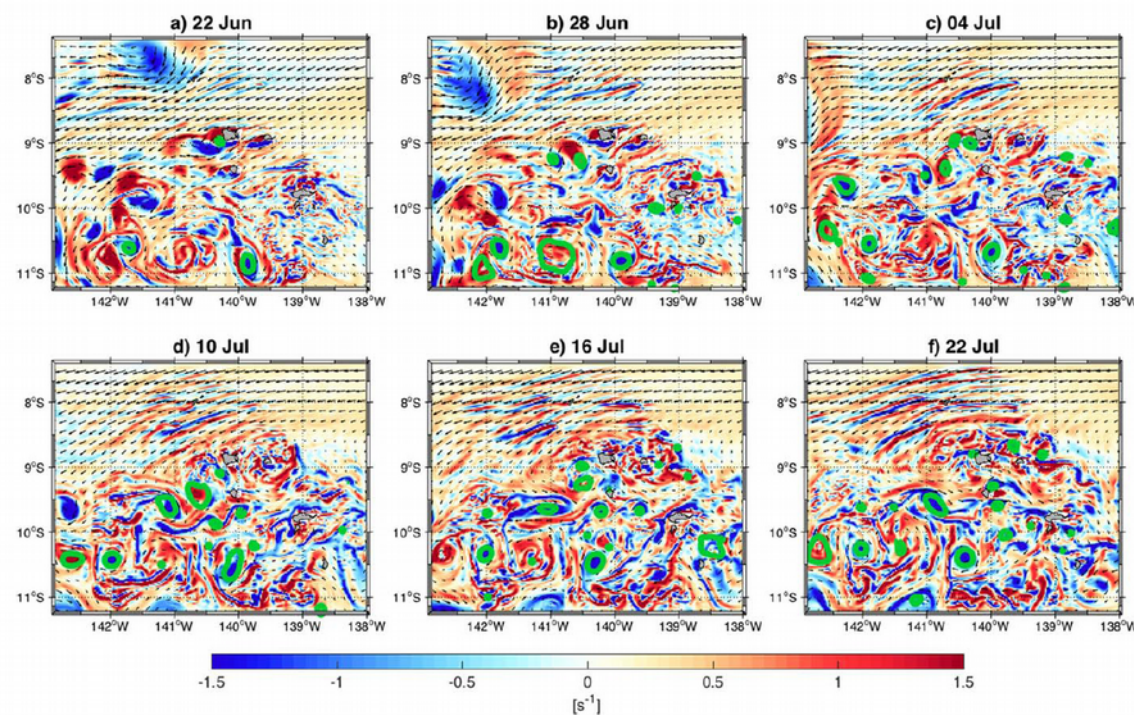
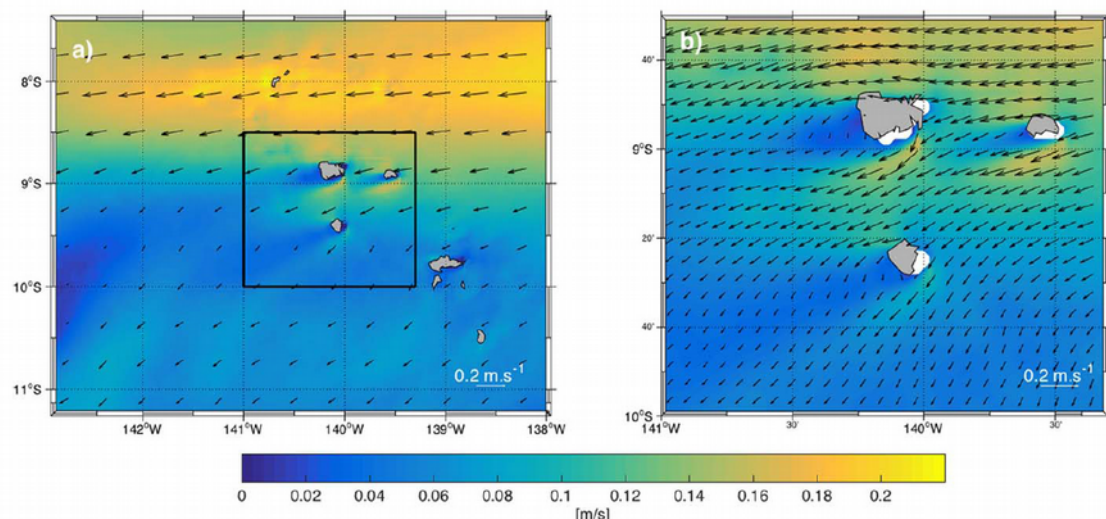
[Kersale et al, OS 2011]

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

Archipel des Marquises

Étude de la génération de cyclones par simulations numériques ROMS:

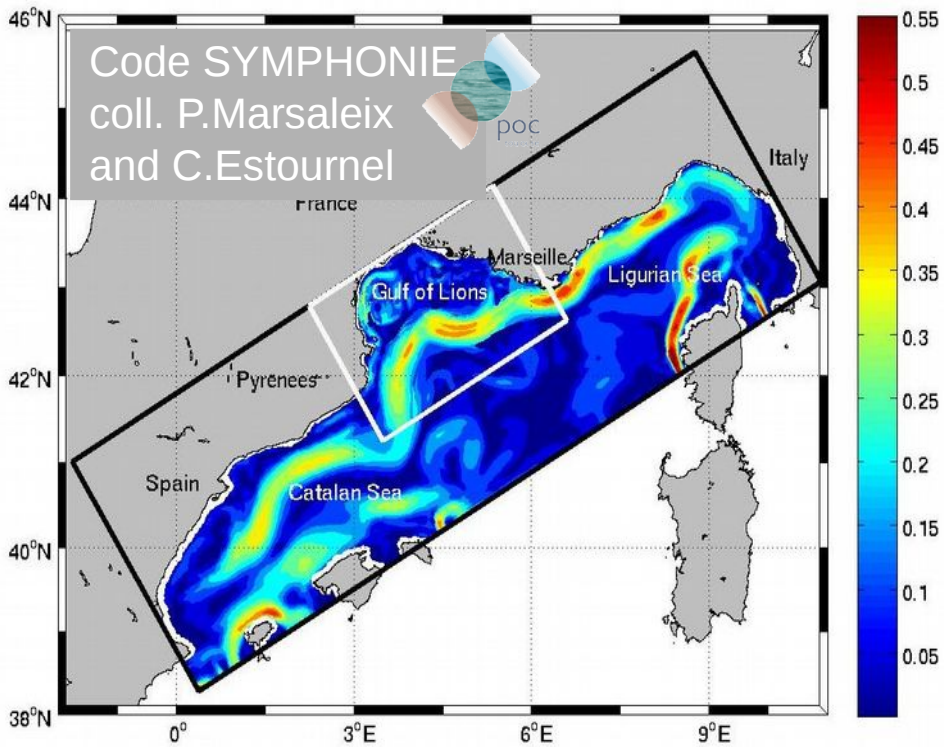
- Max d'activité tourbillonnaire en hiver
- plus de cyclones
- w importantes
- piégeage et advection des eaux côtières



[Raapoto et al, JGR 2018]

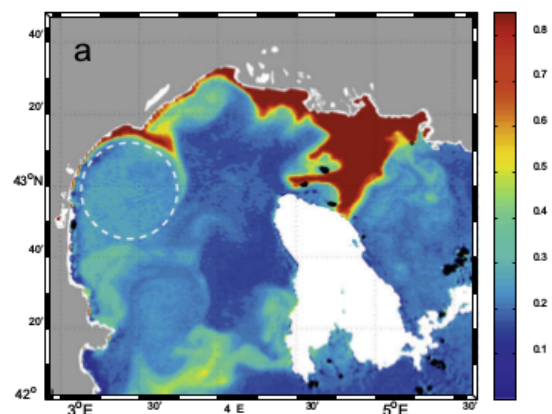
2) Les processus de la circulation à méso et sous-mésoéchelle

Golfe du Lion

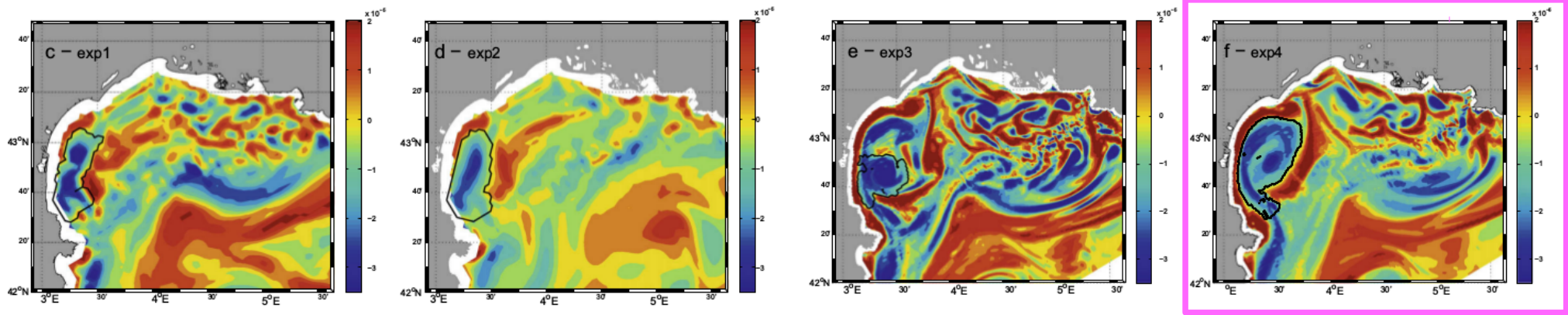


Tests sensibilité sur résolution et diffusivité par schéma *upwind*

Prenant comme référence une image satellite de CHL

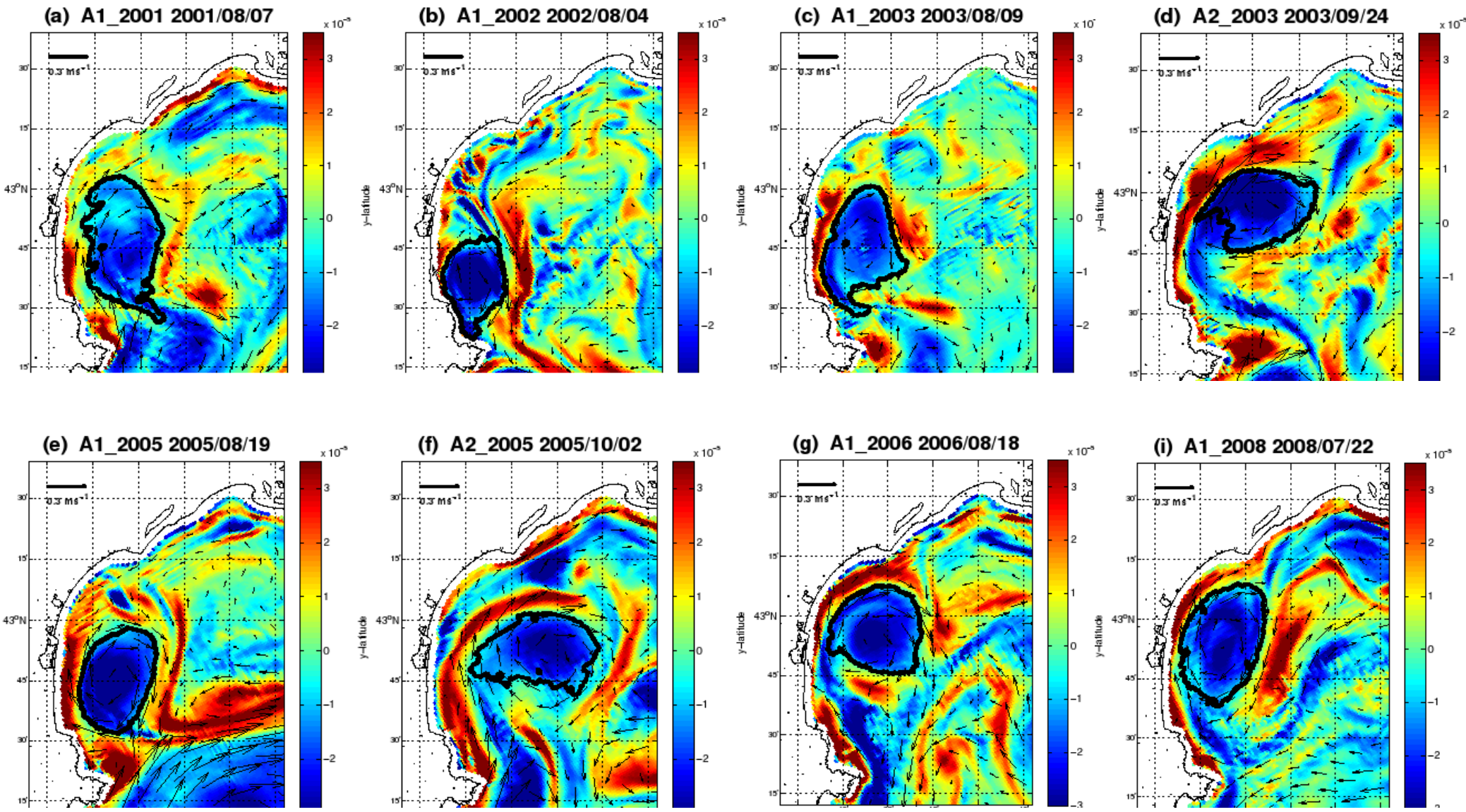


identification de la meilleure configuration



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

«Bestiaire» des tourbillons du GoL



[Hu et al., JGR, 2011]

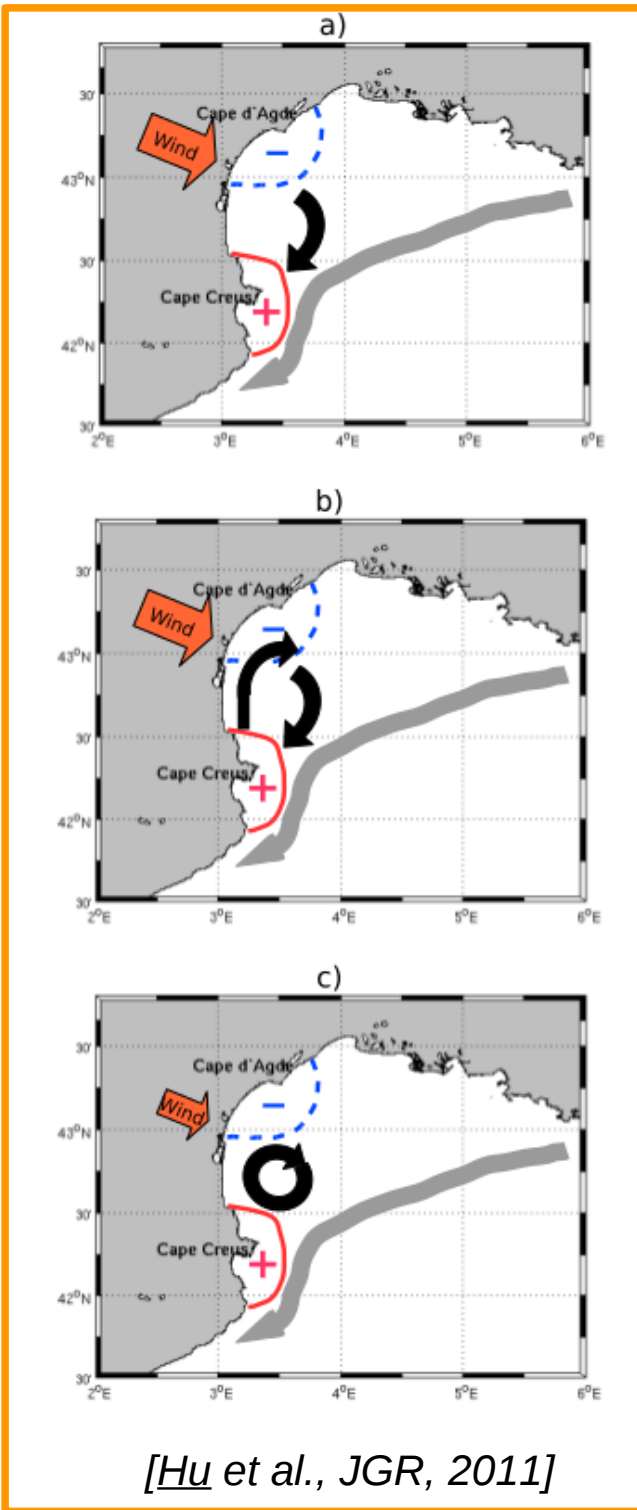
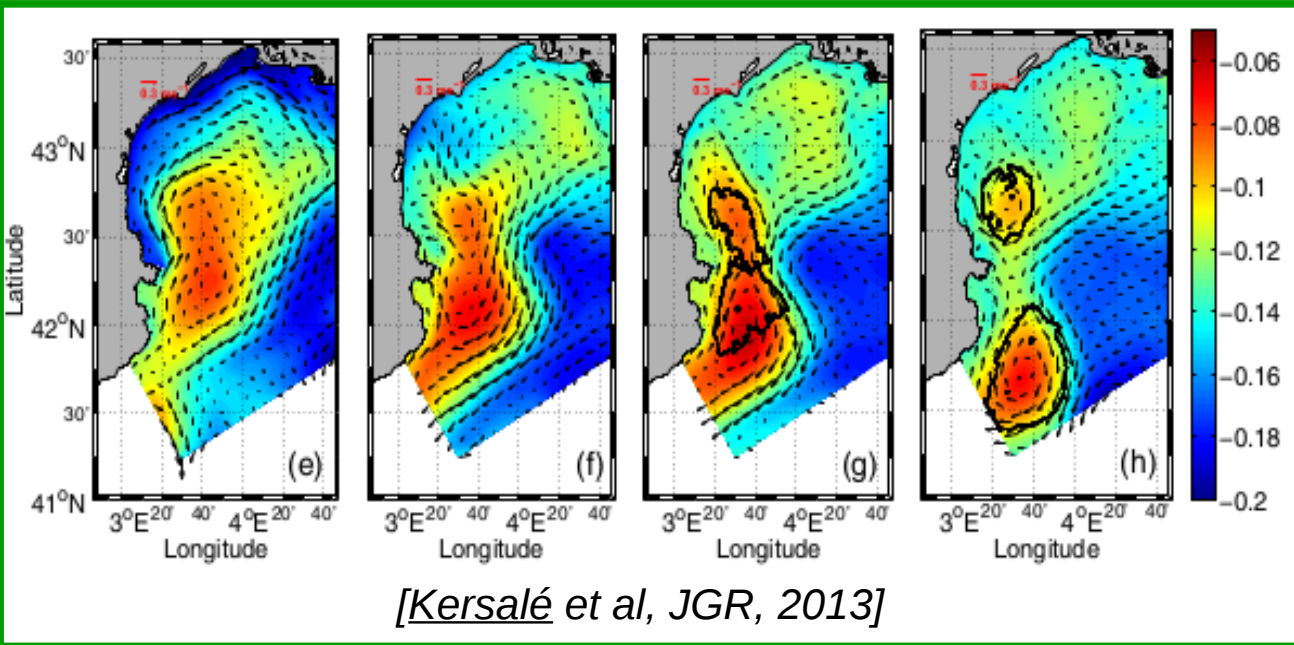
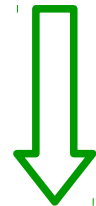
2) Les processus de la circulation à méso et sous-mésoéchelle

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

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



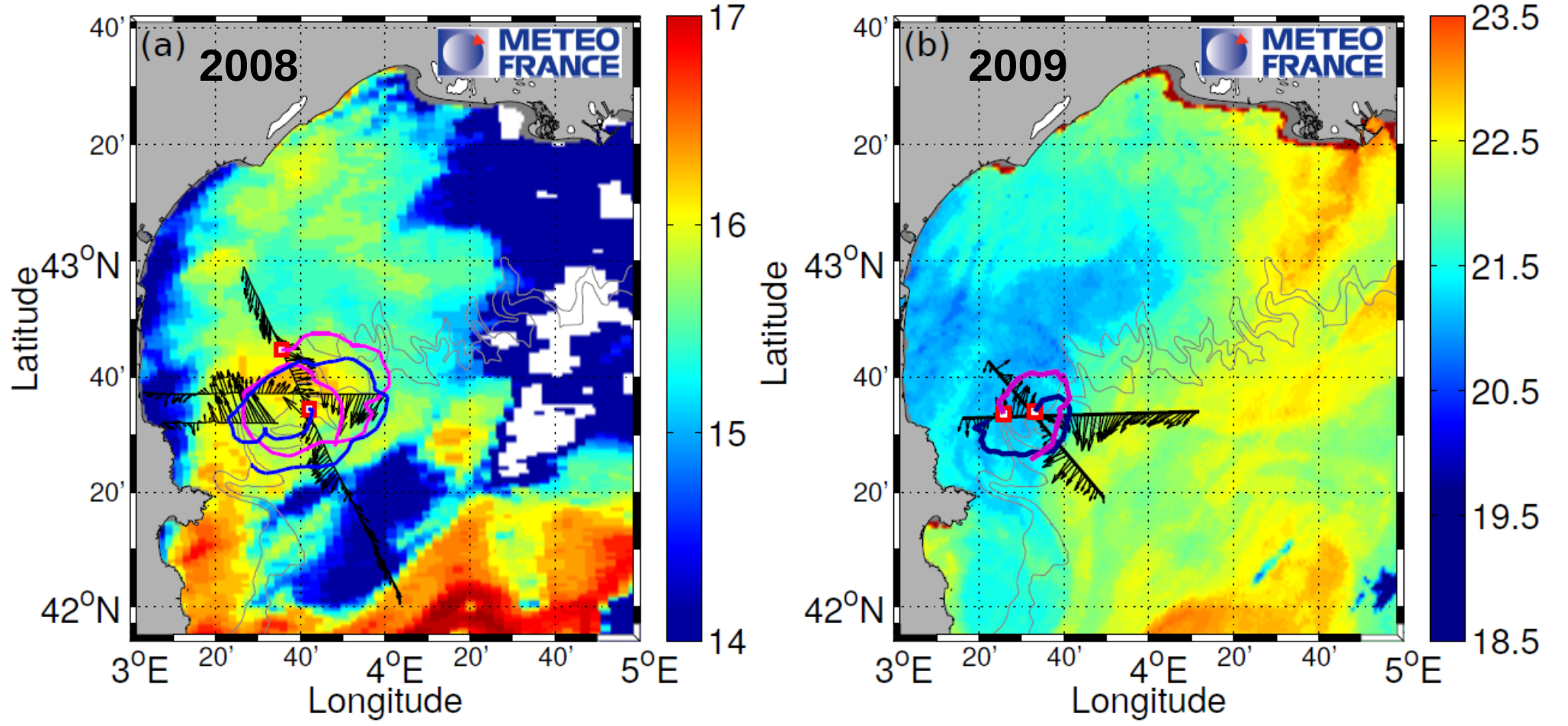
ii) séparation de circulation anticyclonique



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

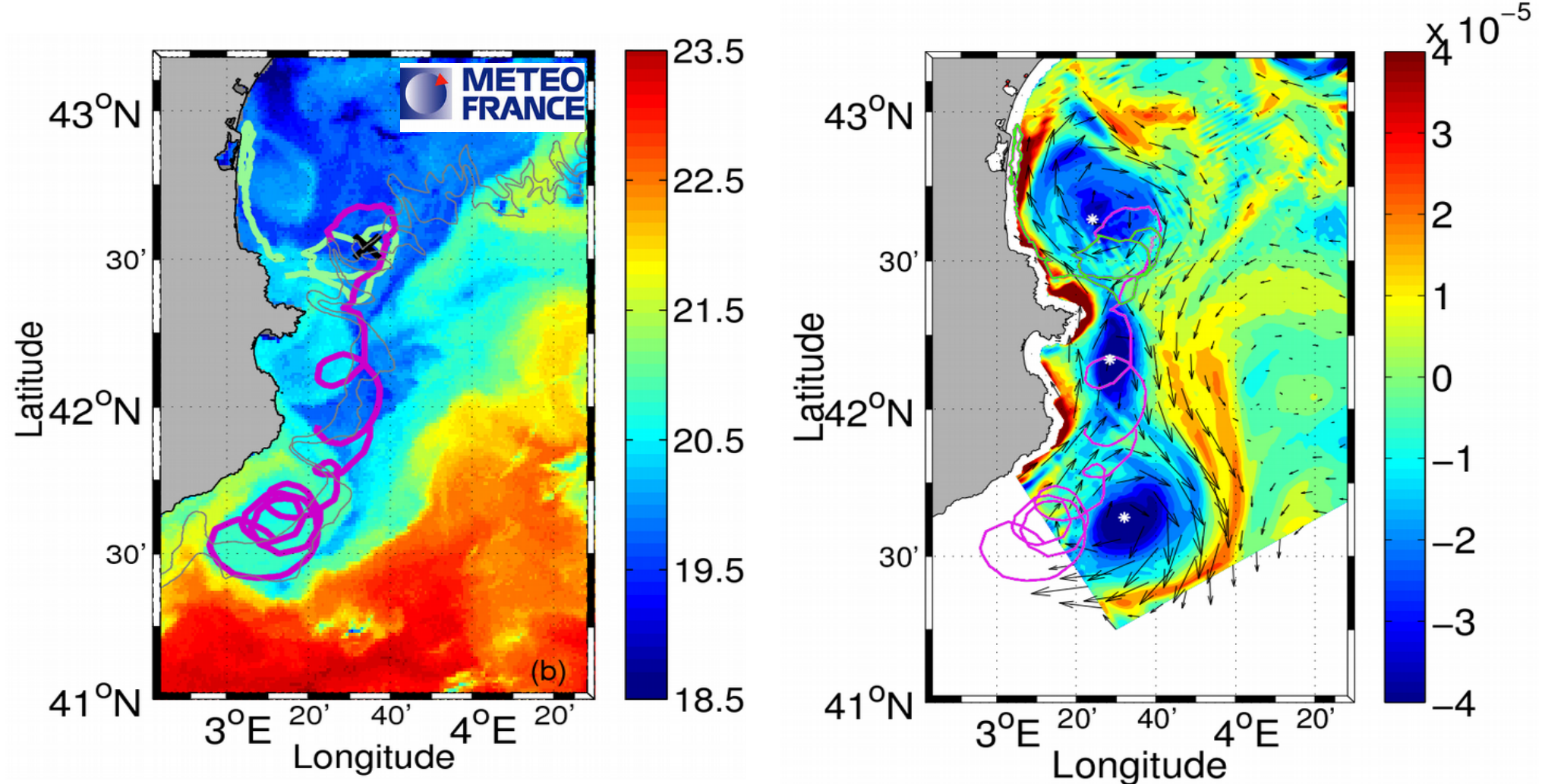


[Hu et al, JMS 2011; Kersalé et al, JGR 2013; Petrenko et al, OD 2017]

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 :

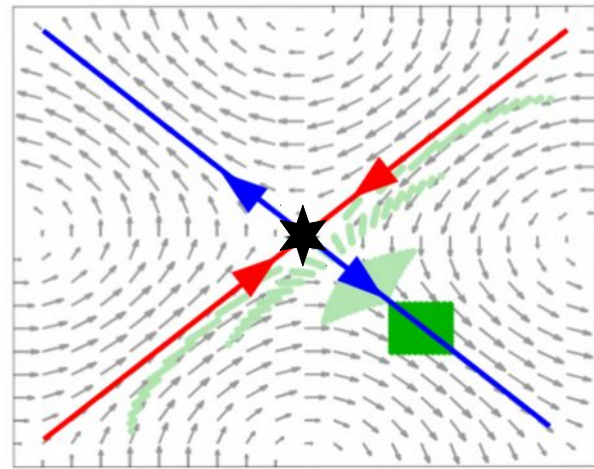
- données in situ (ADCP, bouées, gliders)
- images satellites (SST, couleur, altimétrie)
- modèle numériques et opérationnels

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

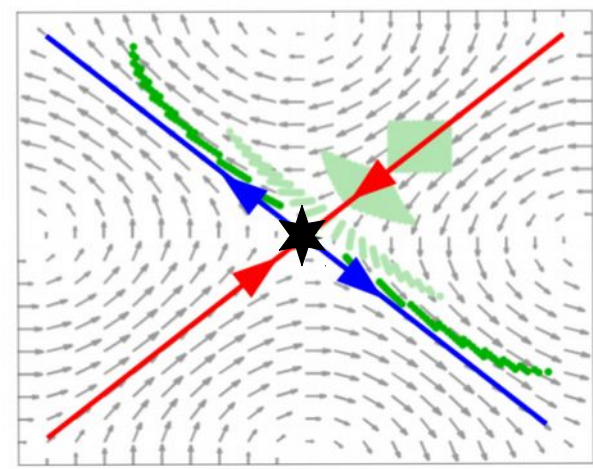
2) Les processus de la circulation à méso et sous-mésoéchelle

Campagne Latex10 [Petrenko 2010] Structure Lagrangiennes Cohérentes

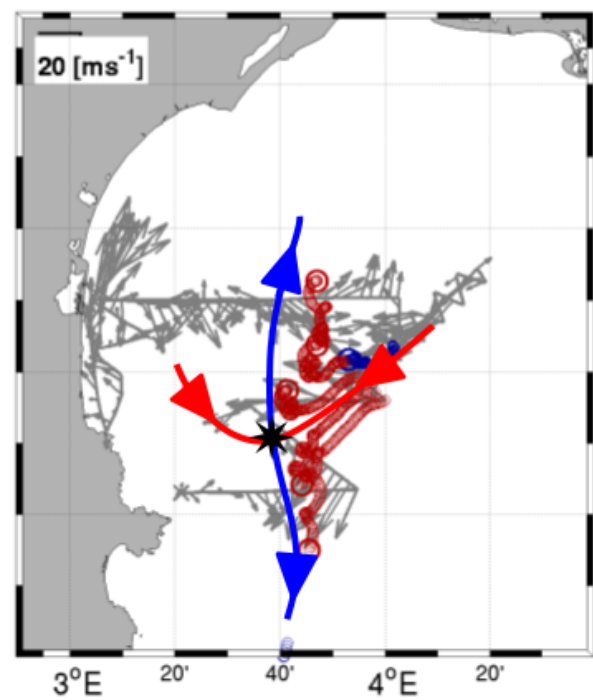
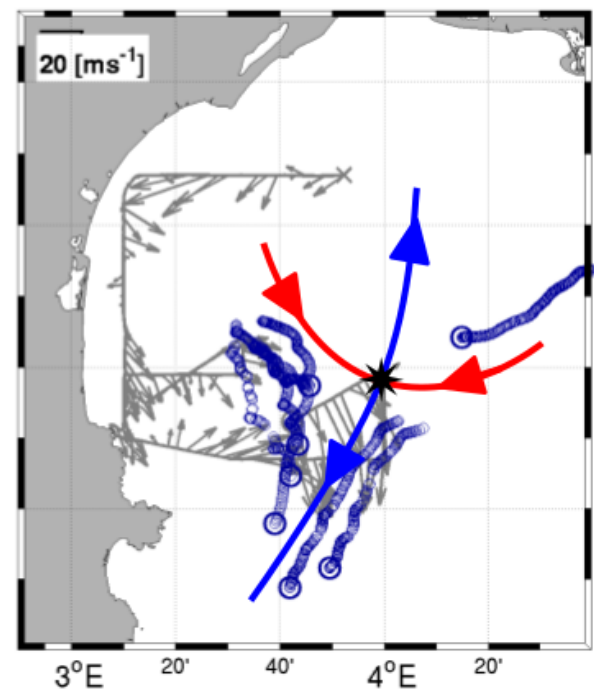
attractive
les particules
s'éloignent du
point
hyperbolique en
convergeant



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

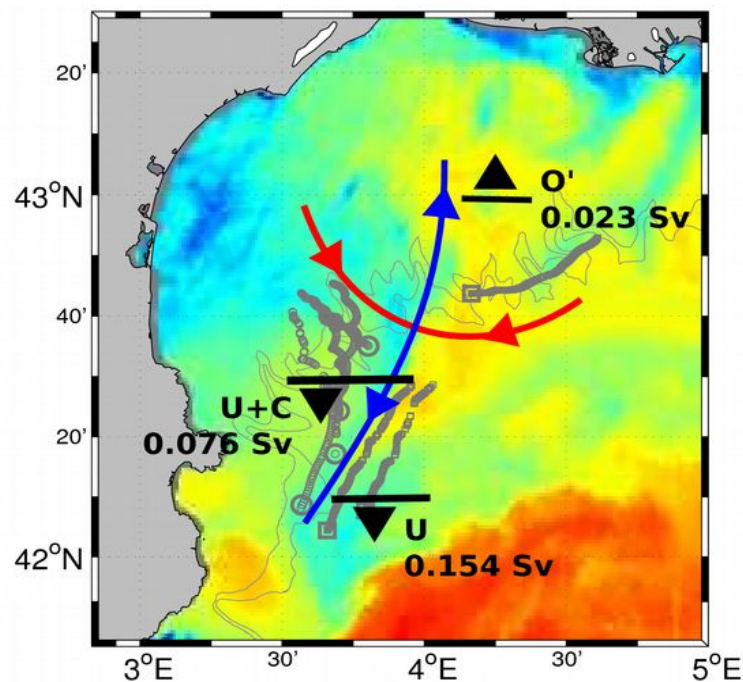
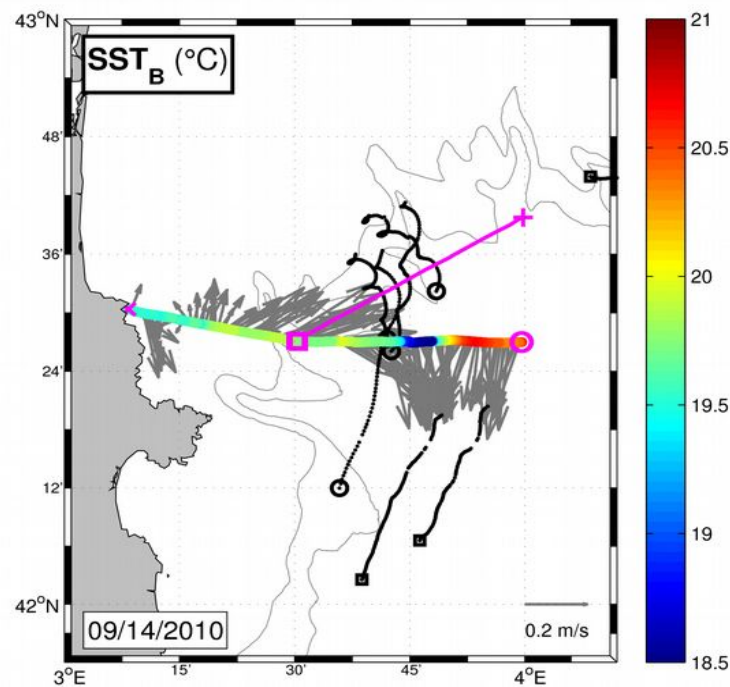
→ condition de
base pour
l'analyse
Lyapunov
satisfaite!

[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

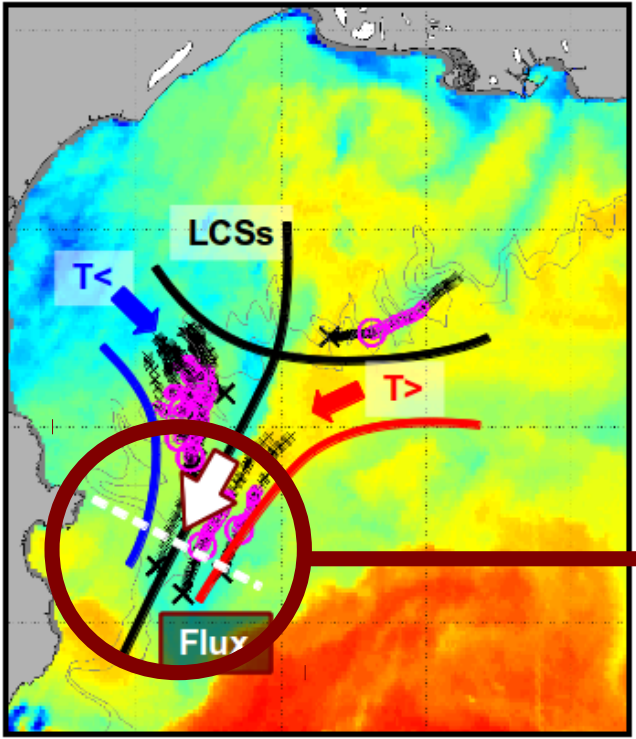


[Nencioli et al., JGR 2016]

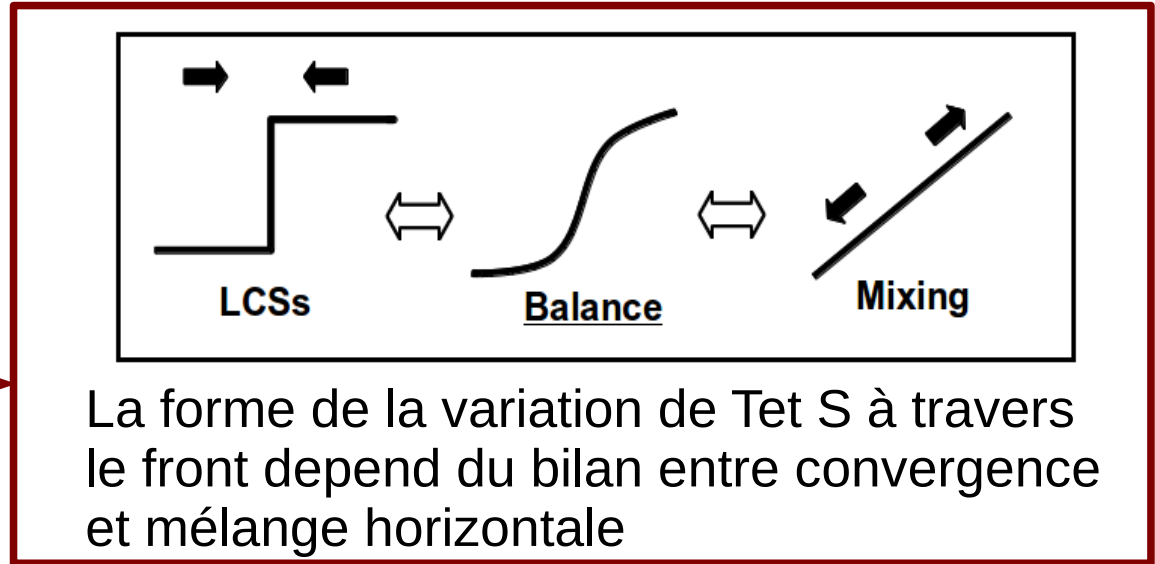
3) Le mélange turbulent sur l'horizontale

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

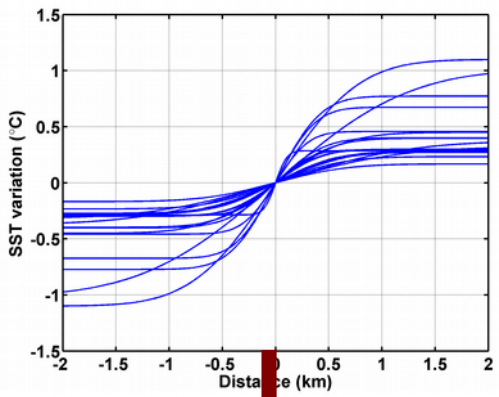


[Nencioli et al., JGR 2013]

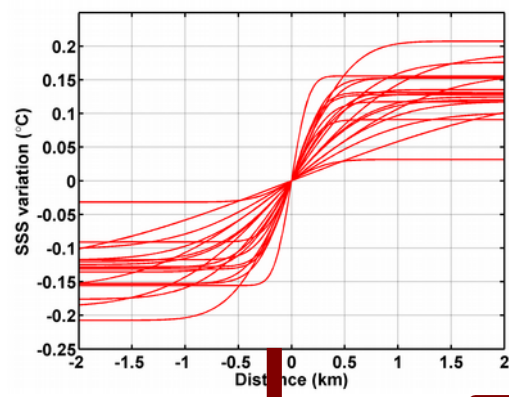
3) Le mélange turbulent sur l'horizontale

Campagne Latex10 [Petrenko 2010]

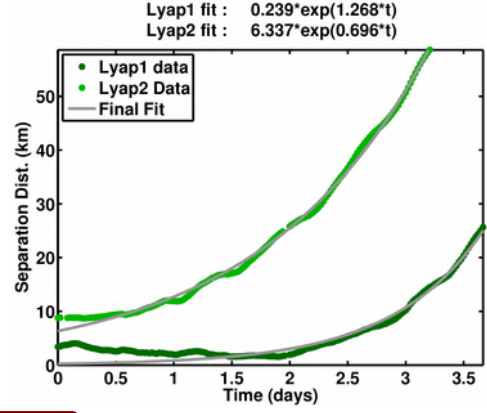
Temperature



Salinité

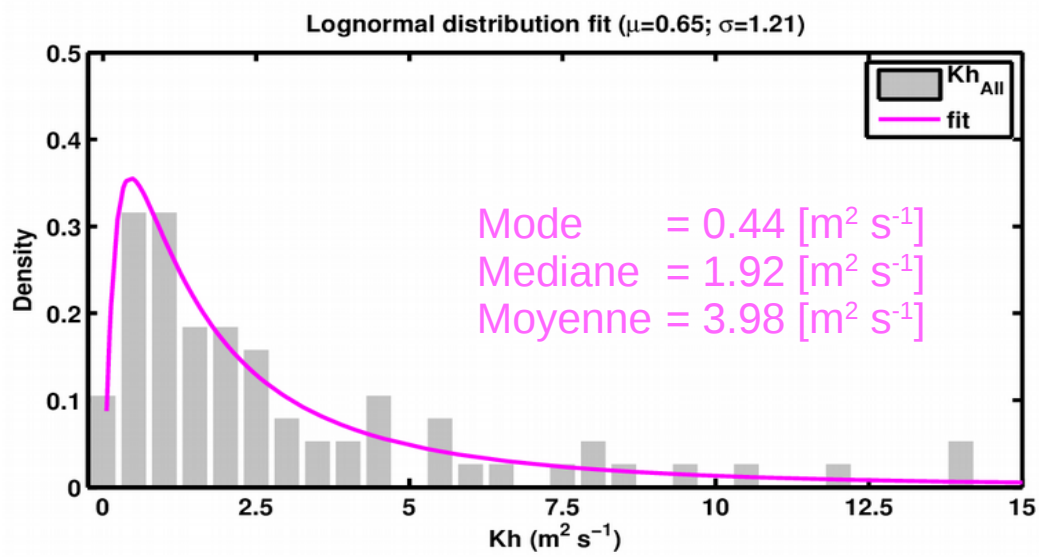


Taux étirement



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

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]

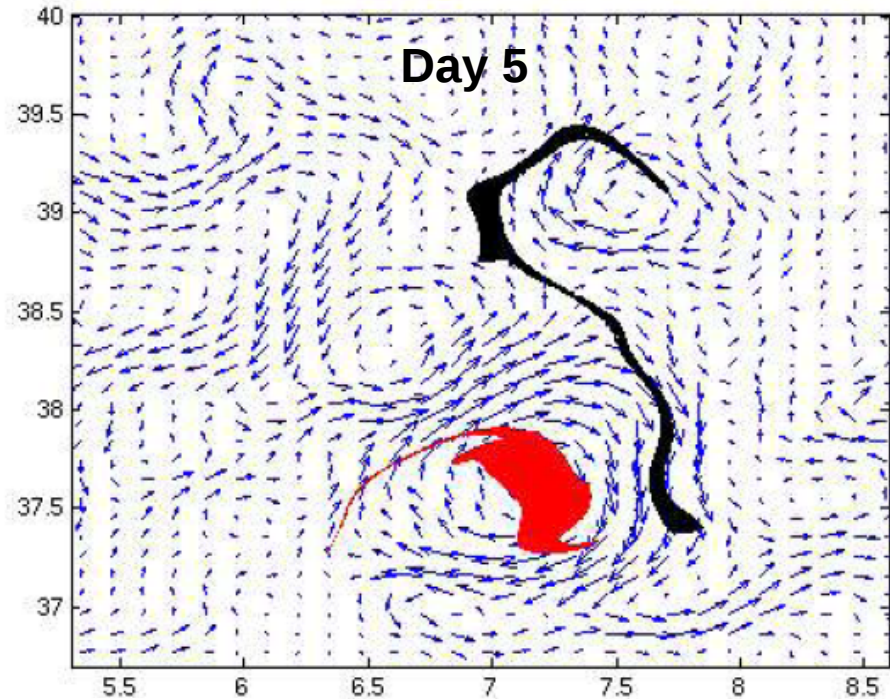
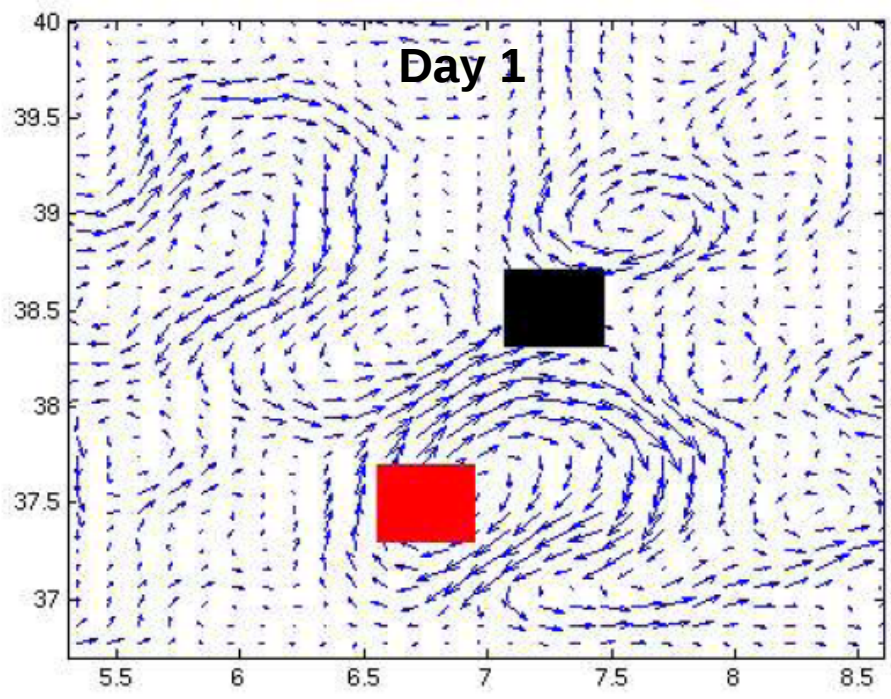
Largage d'un traceur inerte (conservatif) et passif



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

Rotation dominante => dispersion isotropique

Déformation dominante => filamentation



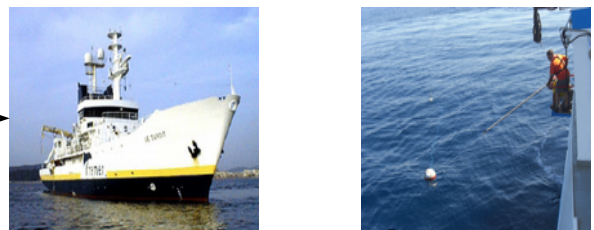
from d'Ovidio et al.

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

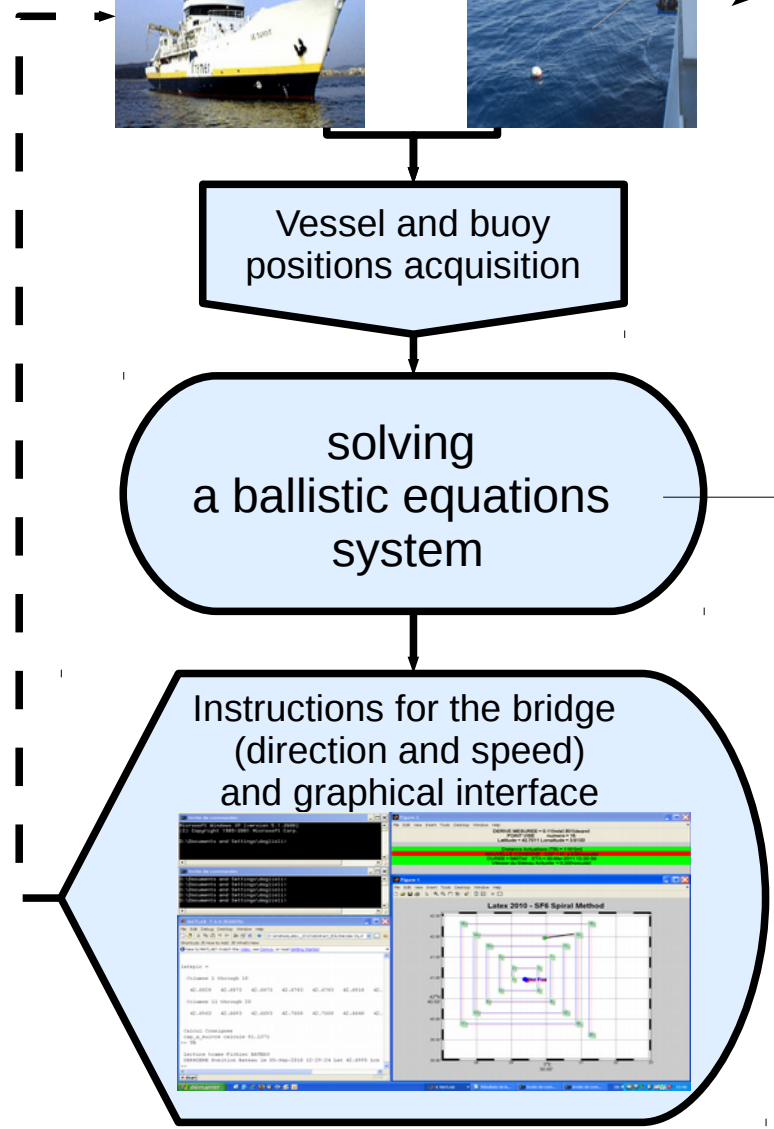
3) Le mélange turbulent sur l'horizontale

Campagnes Latex00, 08, 09, 10

Navigation Lagrangienne (logiciel LATEXtools)



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



Defining

- 1) $\vec{v}_{vessel} \equiv (u_{vessel}, v_{vessel})$ the vessel speed, which modulus during LATEX experiments was fixed $|\vec{v}_{vessel}| = 4 \text{ kn}$ for technical reasons associated to SF6 release system ;
- 2) $\vec{v}_{target} \equiv (u_{target}, v_{target}) = \vec{v}_{buoy}$ 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 »

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

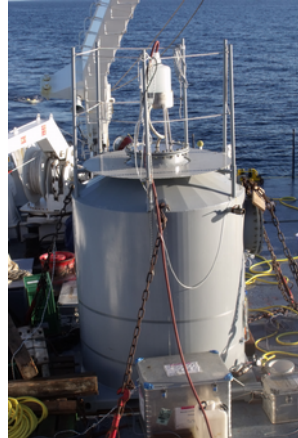
3) Le mélange turbulent sur l'horizontale



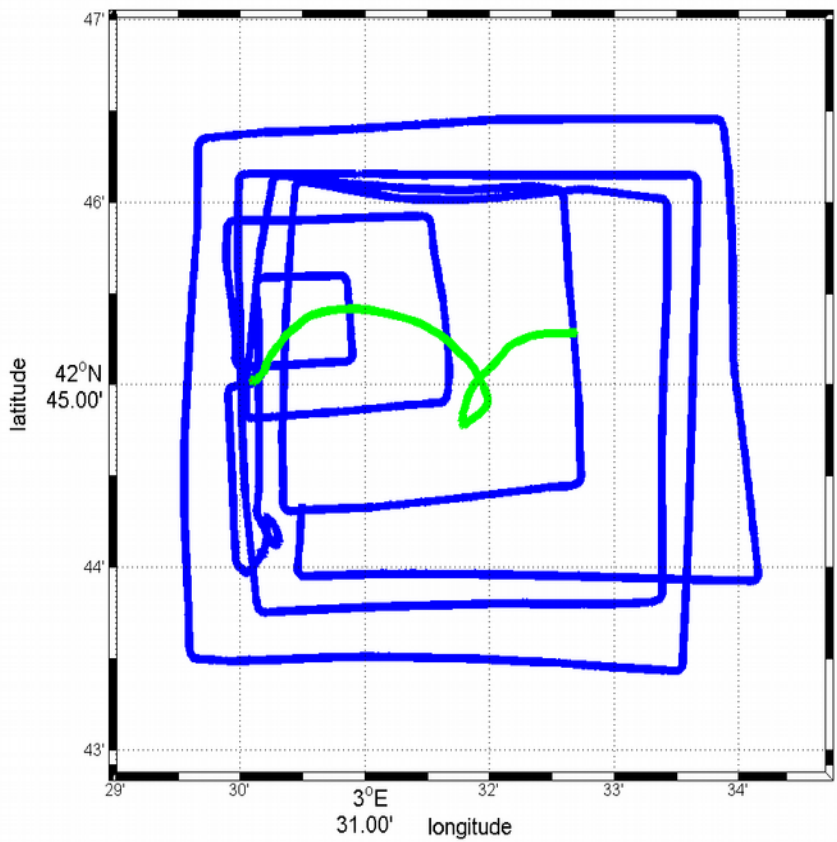
Campagnes Latex00, 08, 09, 10

Navigation Lagrangienne

logiciel LATEXtools

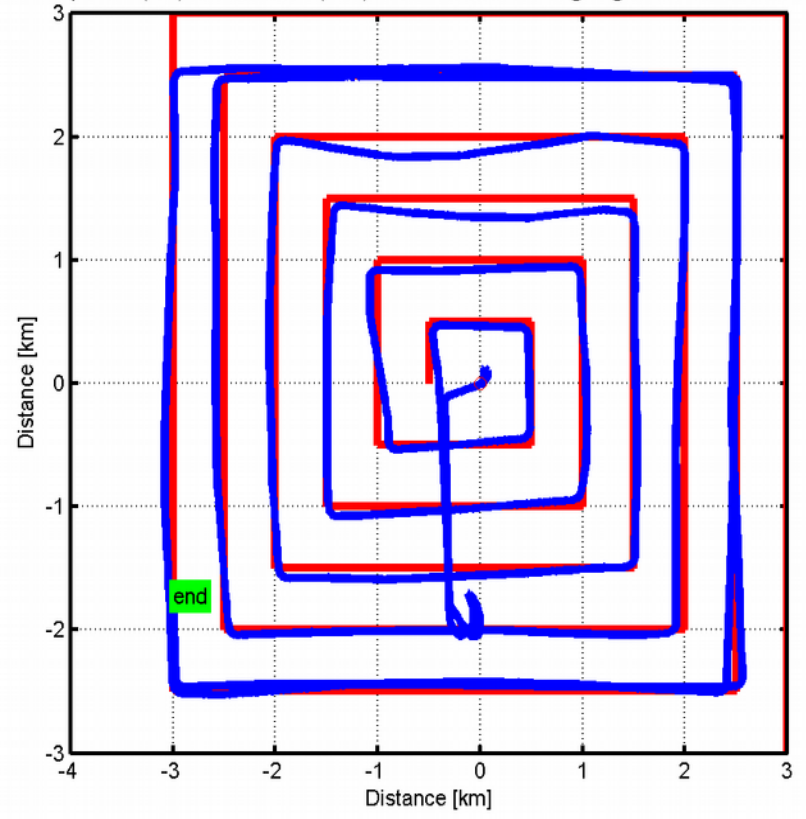


Vessel (blue) - Buoy (green) tracks



Vessel and buoy tracks in geographical coordinates

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



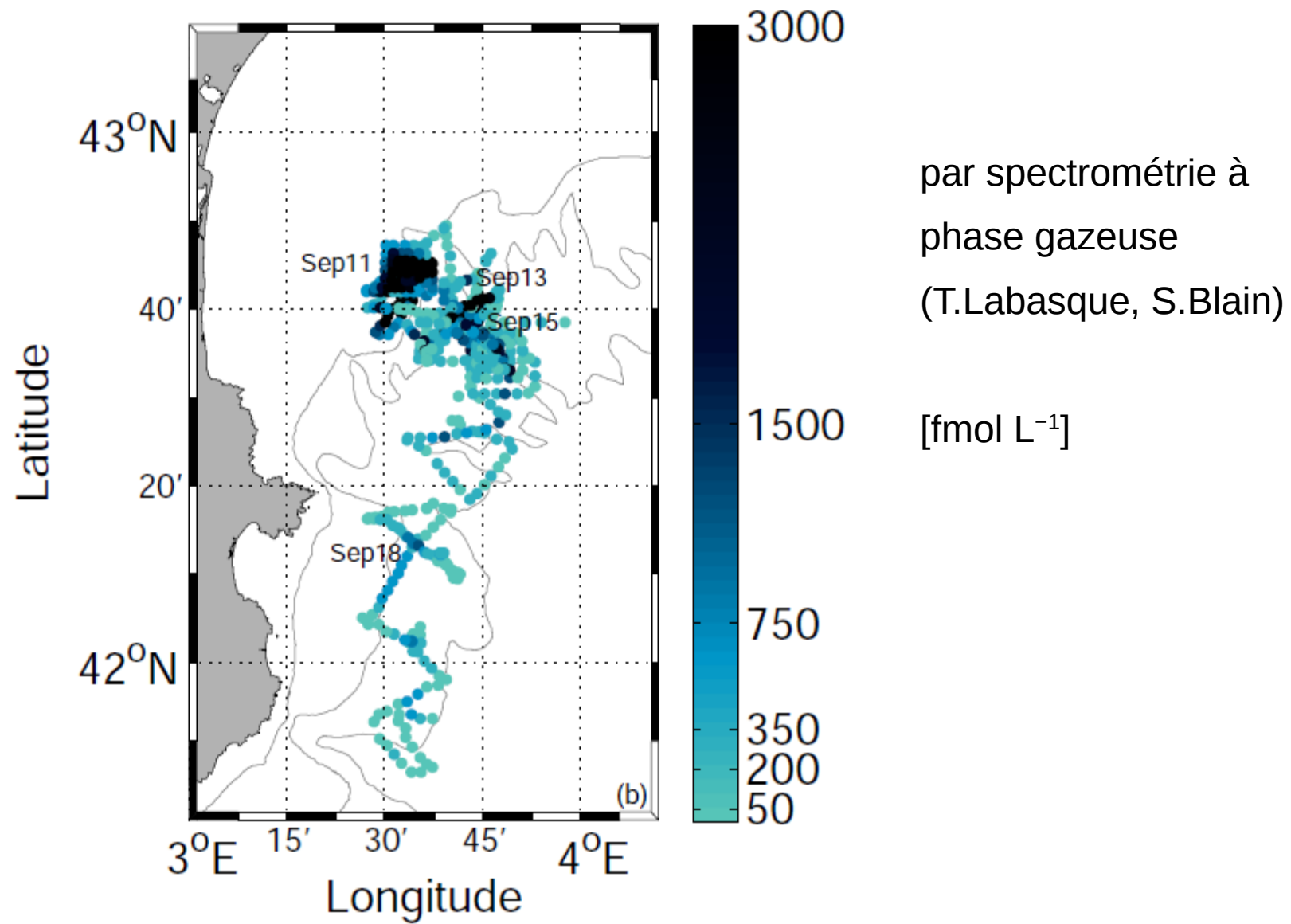
Expected and obtained vessel track in the Lagrangian reference frame

[Doglioli et al, JAOT, 2013]

3) Le mélange turbulent sur l'horizontale

Campagne Latex10 [Quéguiner 2010]

Cartographie de la concentration de SF6

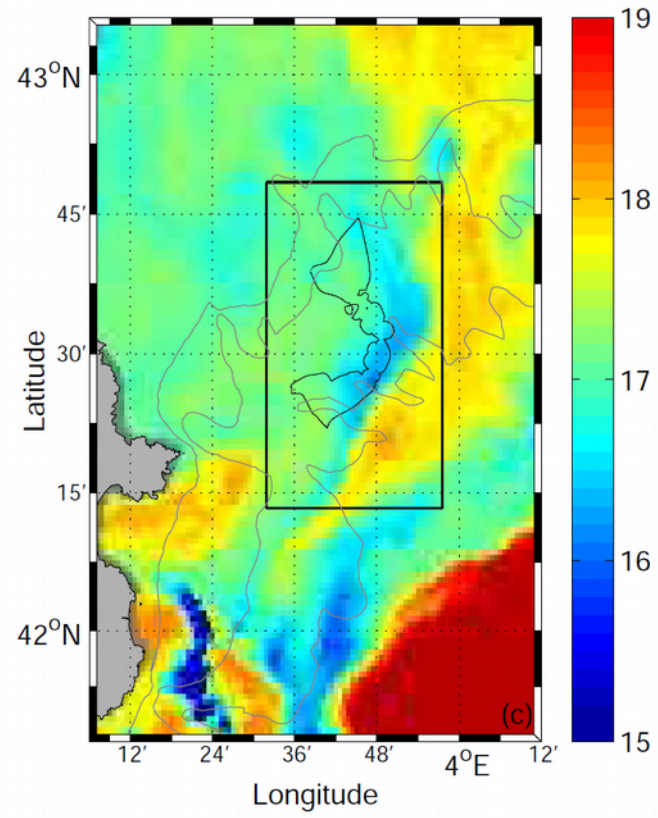


3) Le mélange turbulent sur l'horizontale

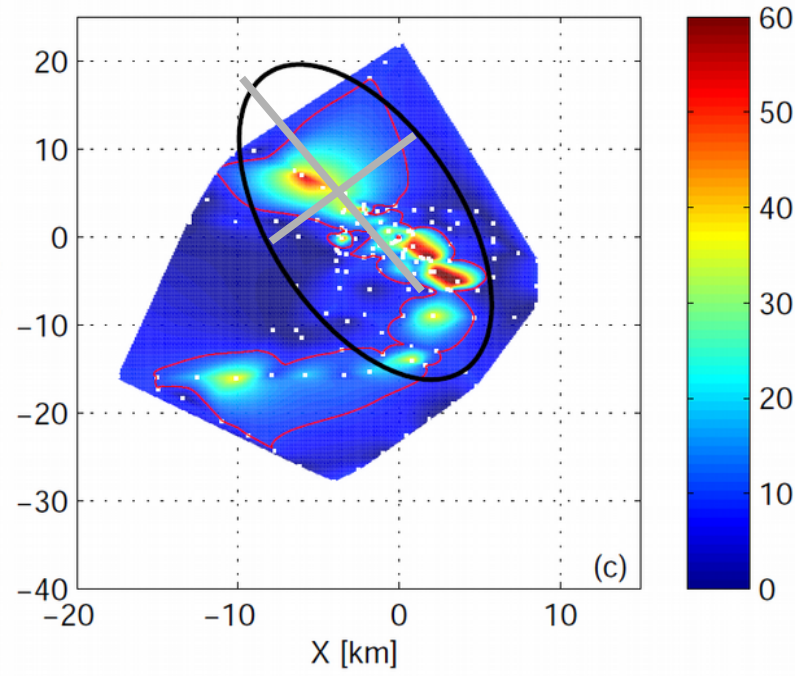
Campagne Latex10 [Quéguiner 2010]

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]

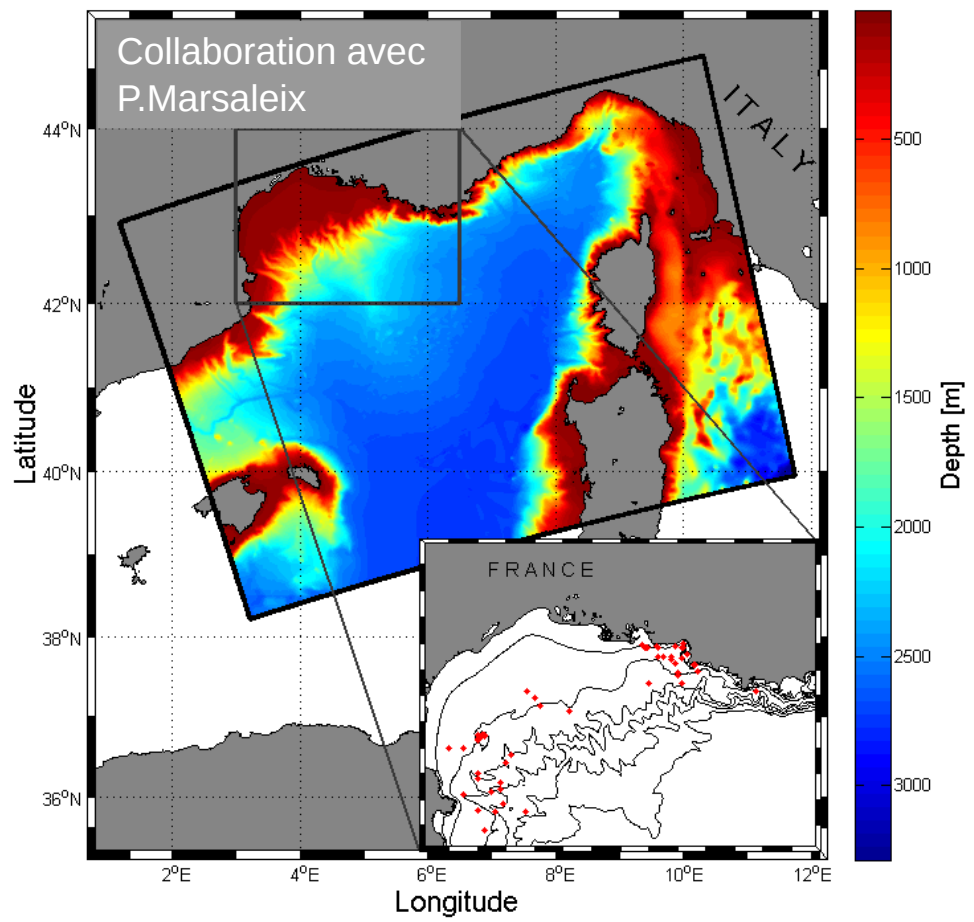
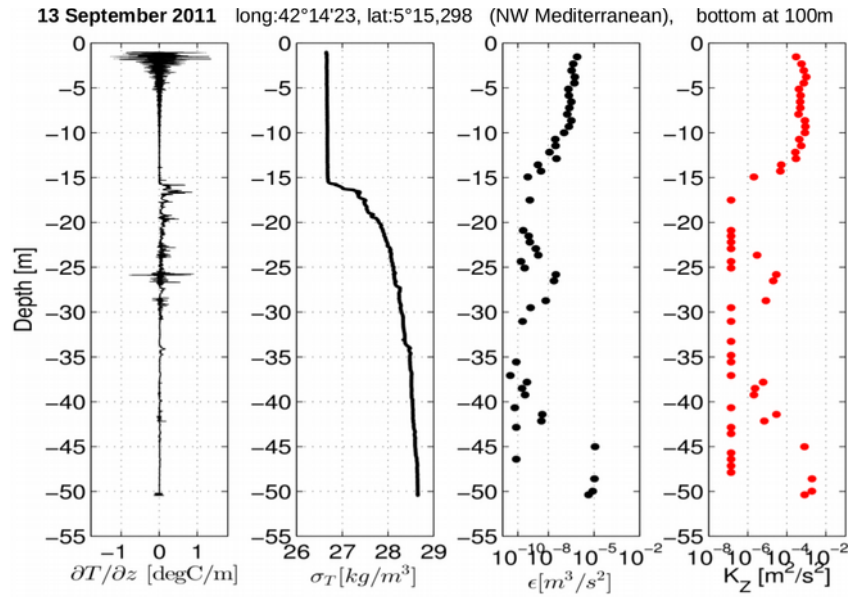
3) Le mélange turbulent sur la verticale

Mesures in situ et schémas de fermeture de la turbulence

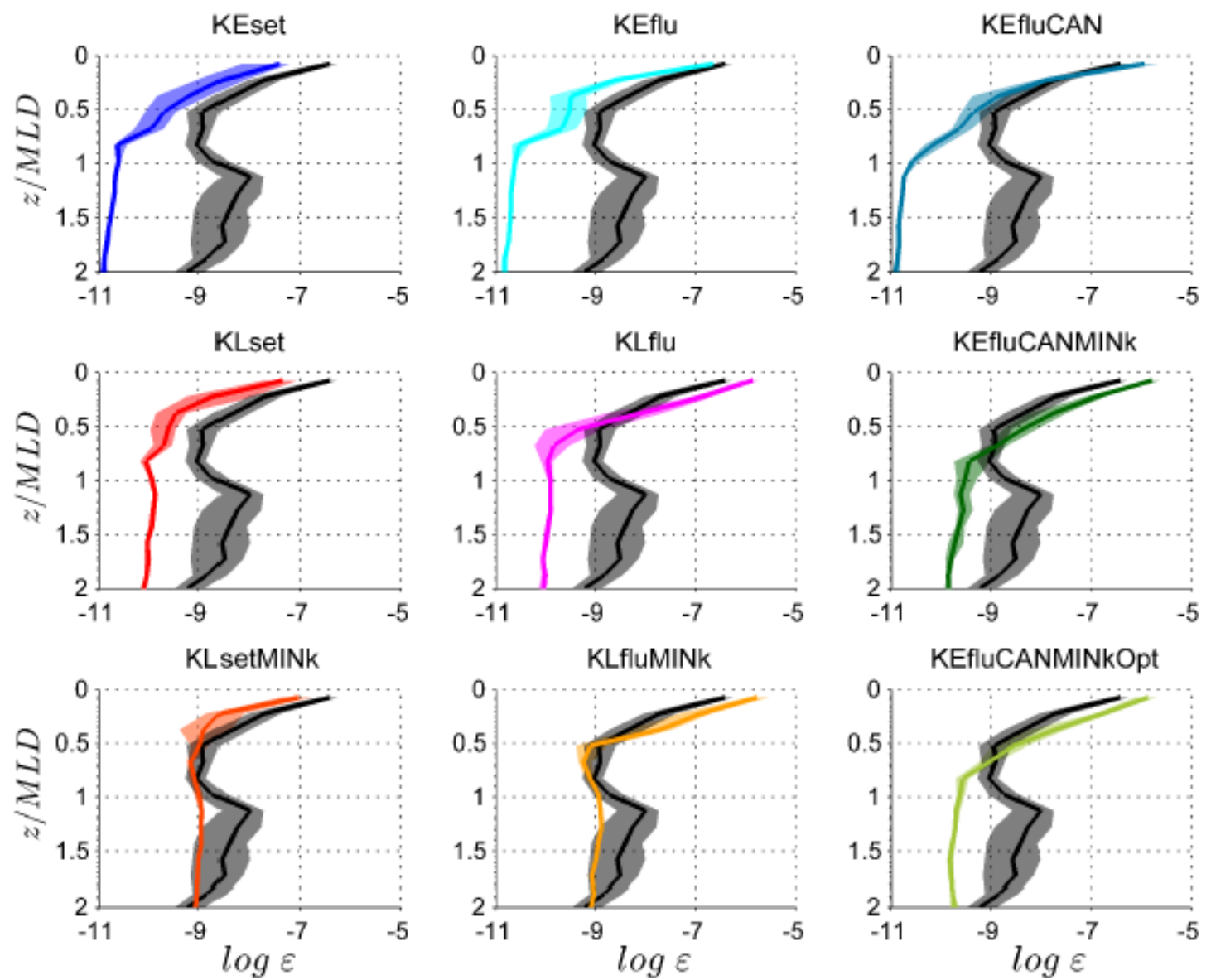
Mesures
avec le
microprofileur
SCAMP



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



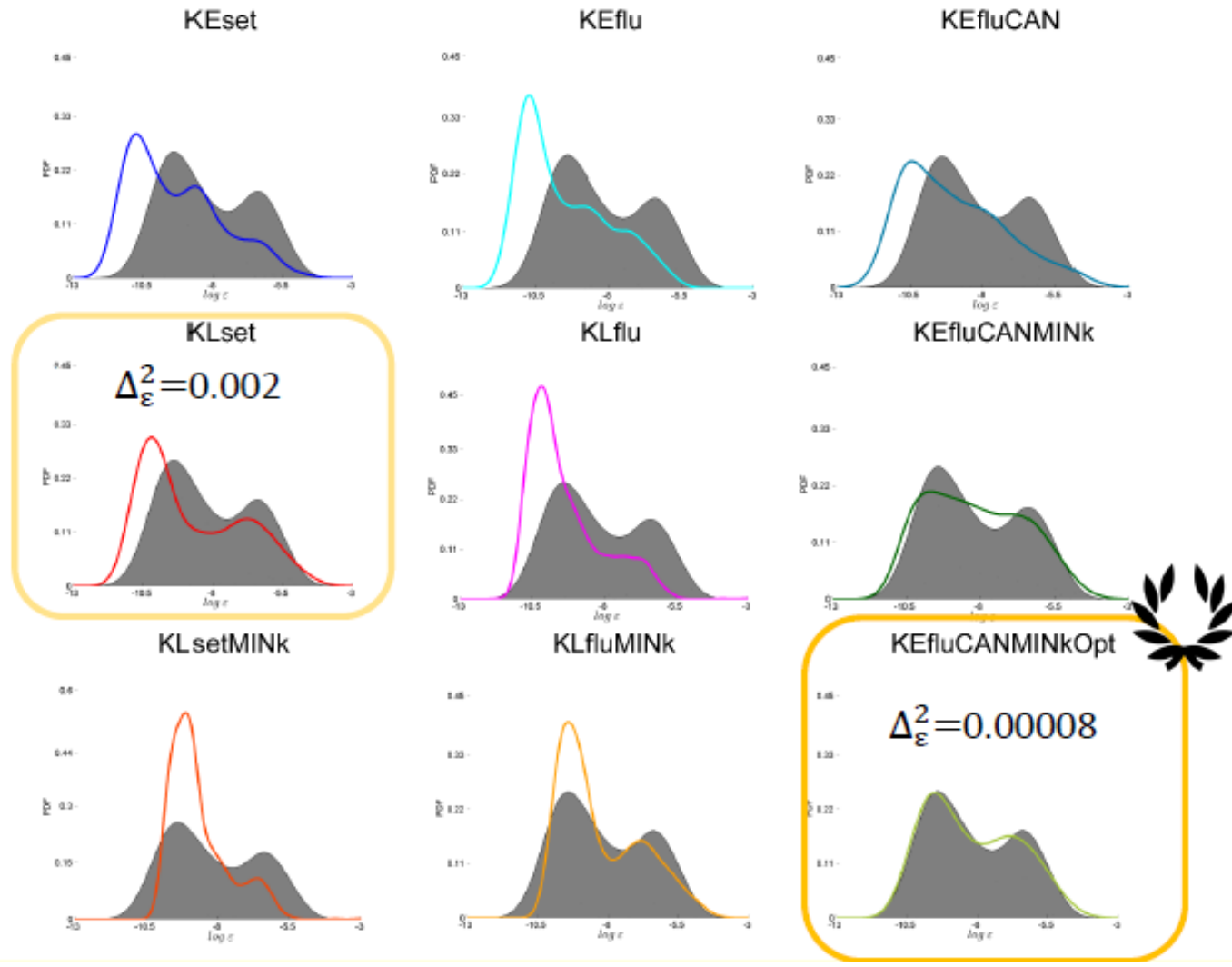
Mesures in situ et schémas de fermeture de la turbulence



[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

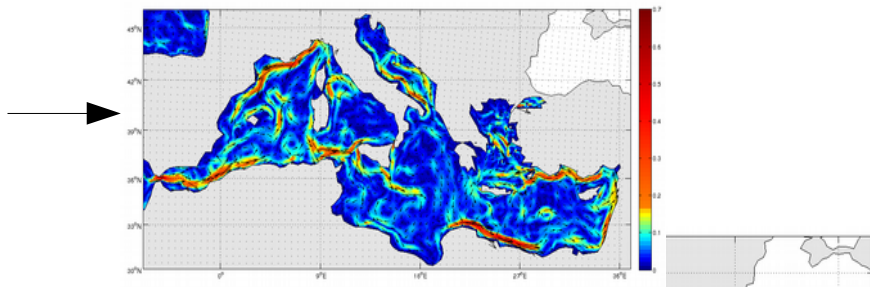
Couplage Physique-Biogéochimie-Biologie

- 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

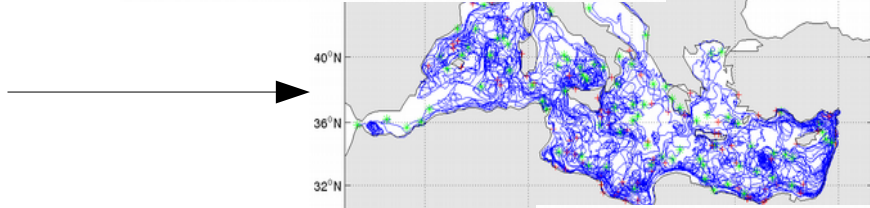
1) Le transport du plancton et la connectivité larvaire

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

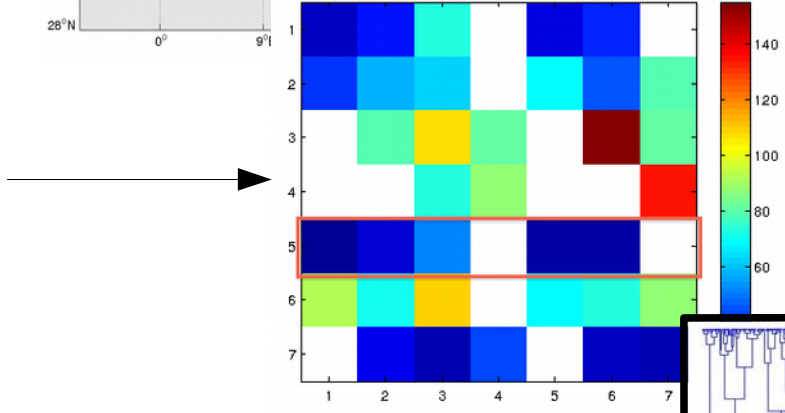
Champ de courant Eulérien



Module Lagrangien



Matrice de connectivité



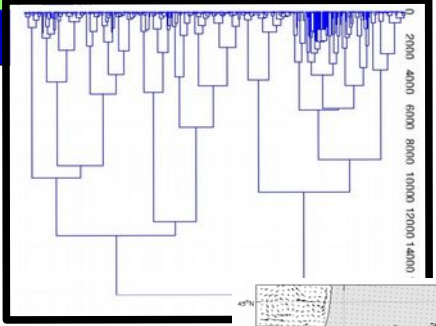
Mean Connection Time

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

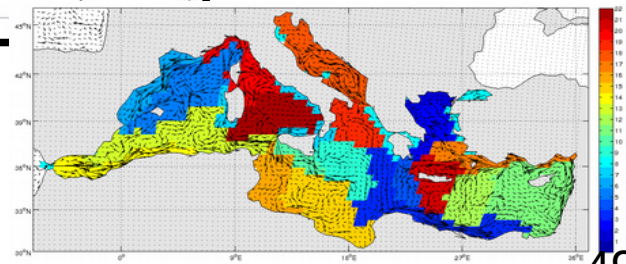
Oceanographic Distance

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

Classification hiérarchique



Identifications des régions

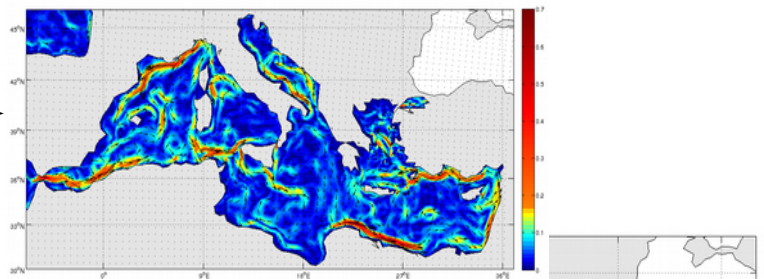


[Berline et al, PlosOne 2014]

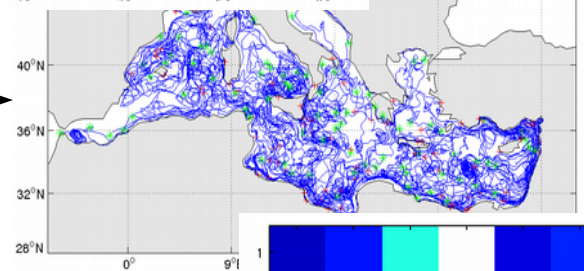
1) Le transport du plancton et la connectivité larvaire

... et perspective sur l'étude des réseaux

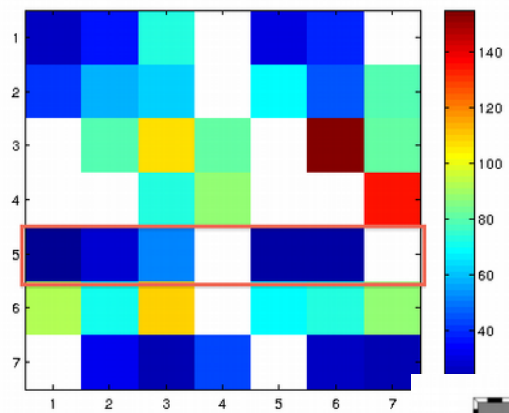
Champ de courant Eulérien



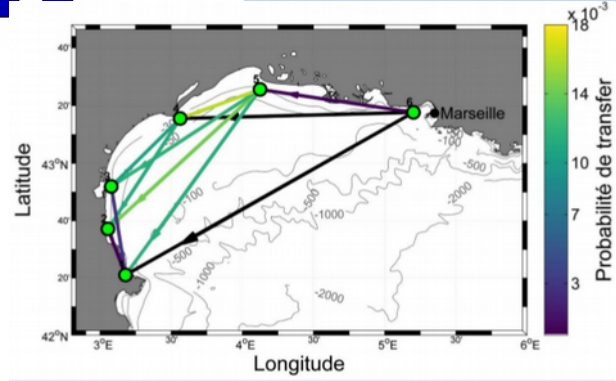
Module Lagrangien



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]

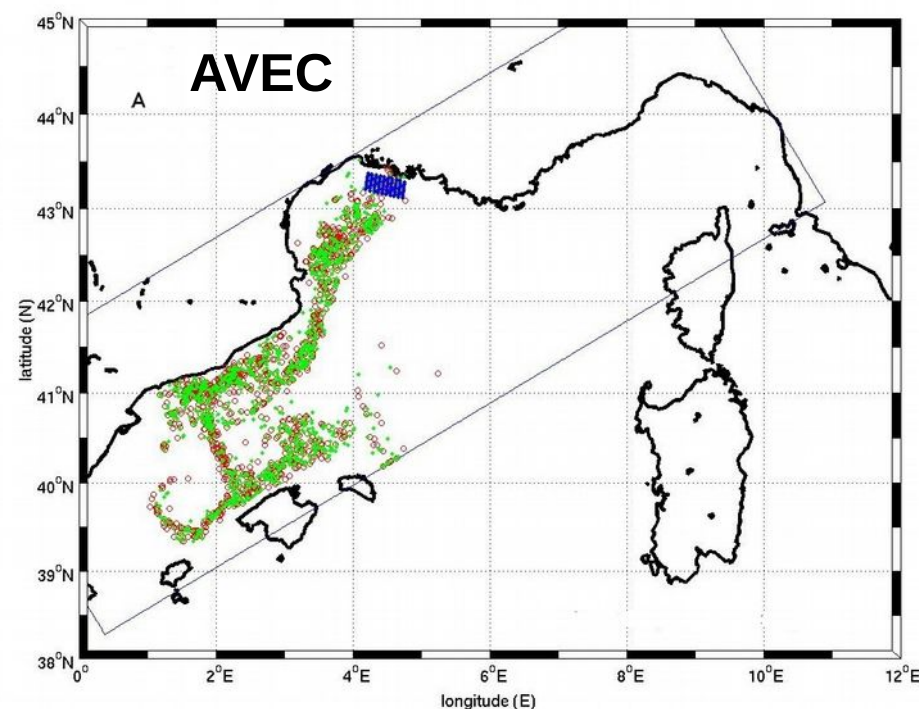
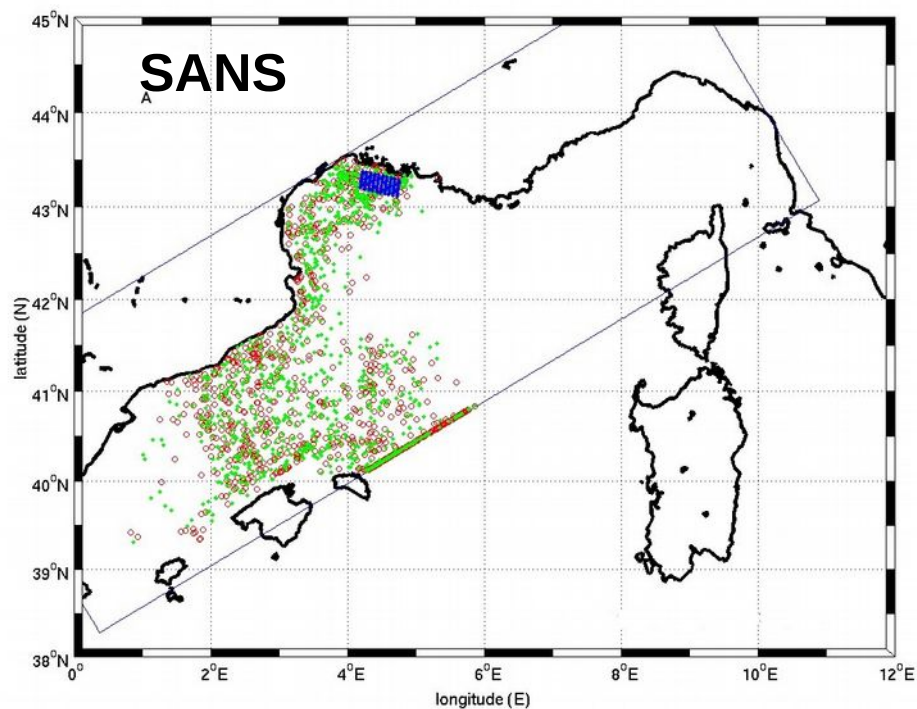
E.G. Identifications des noeuds clés pour la persistance

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

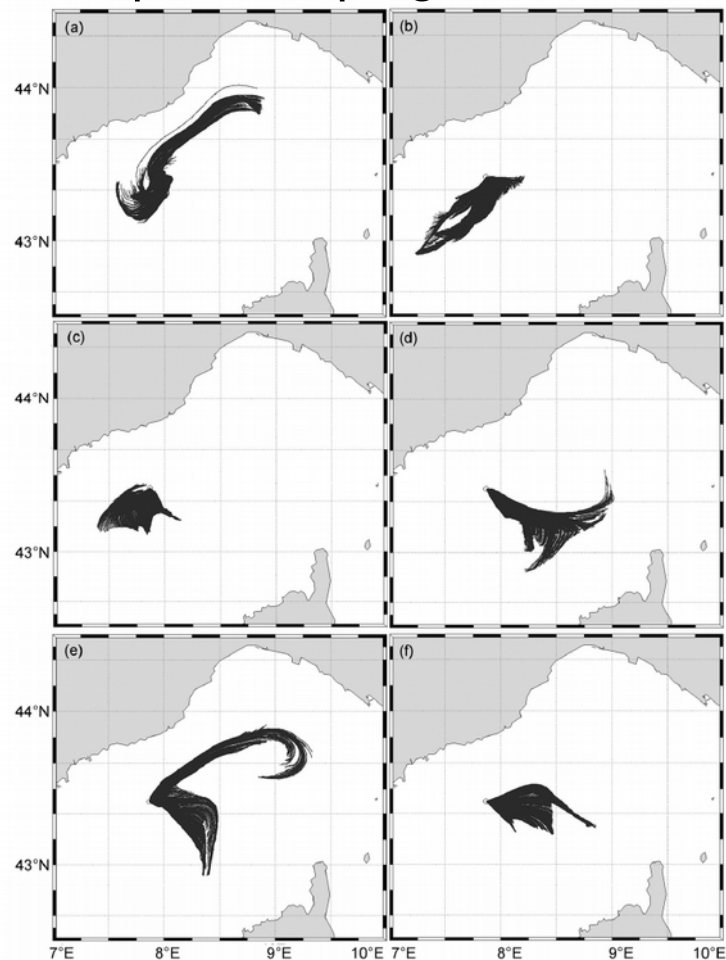
[Qiu et al., EM 2010]

1) Le transport du plancton et la connectivité larvaire

Interaction entre courants et comportement

Simulation numériques de dispersion des particules 100 [μm]

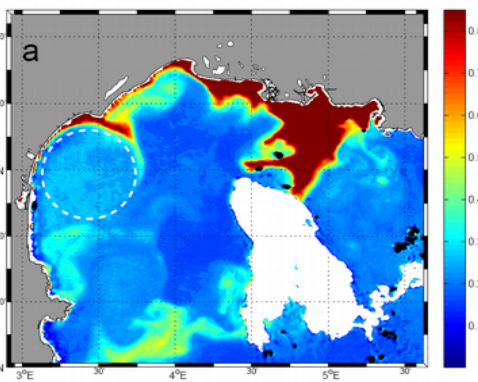
Quelles sources pour les pièges DYFMED à 200 [m]?



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

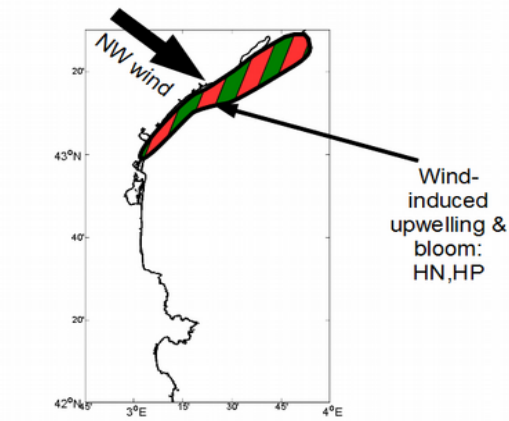
2) Impact de la (sous)mésoéchelle sur les blooms

Réponse biogéochimie en présence de tourbillon côtier

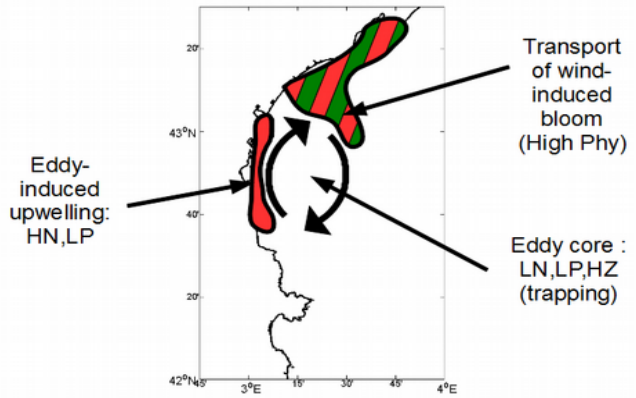


Modèle Symphonie
+
ECO3M
[Baklouti et al., 2006]

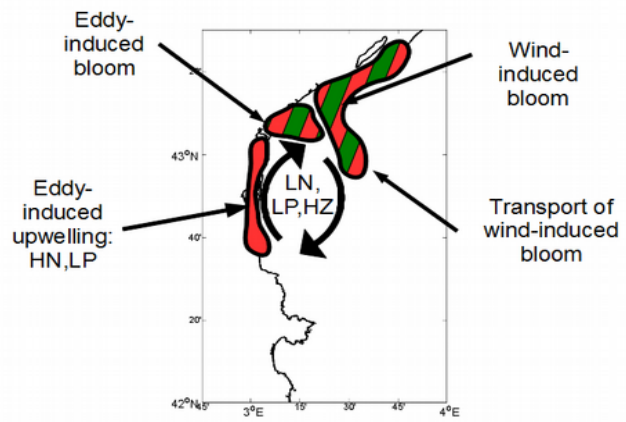
collaboration avec
F.Diaz



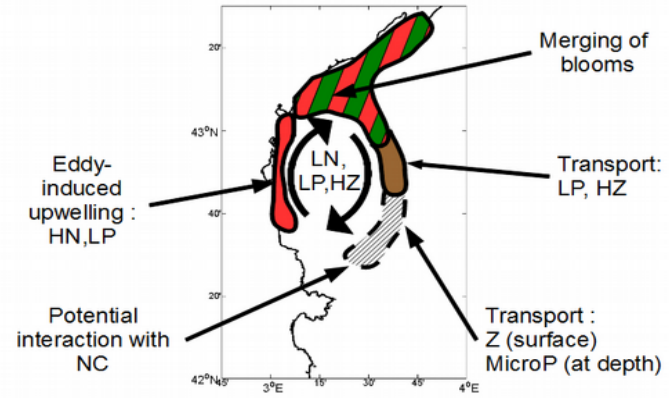
1 Eddy generation



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

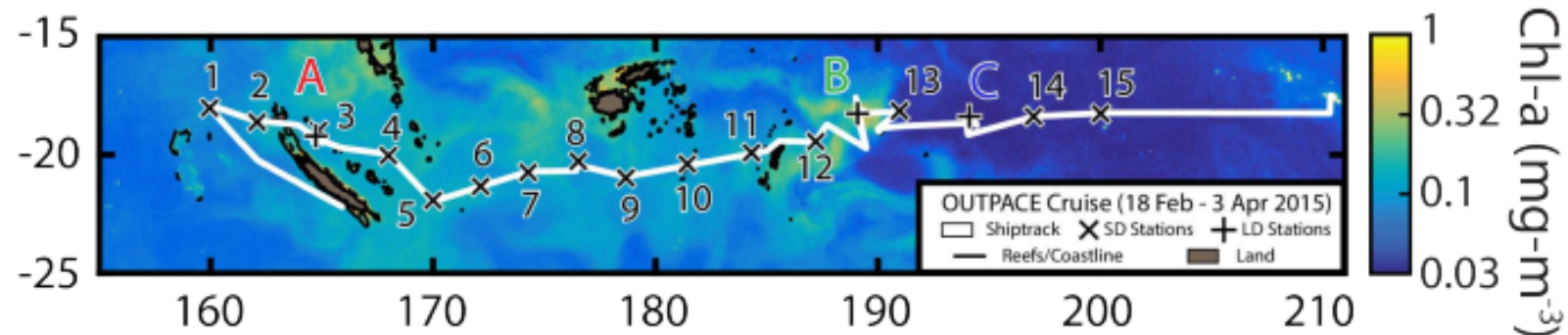
H(L)Z
High(Low)
Zooplankton

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

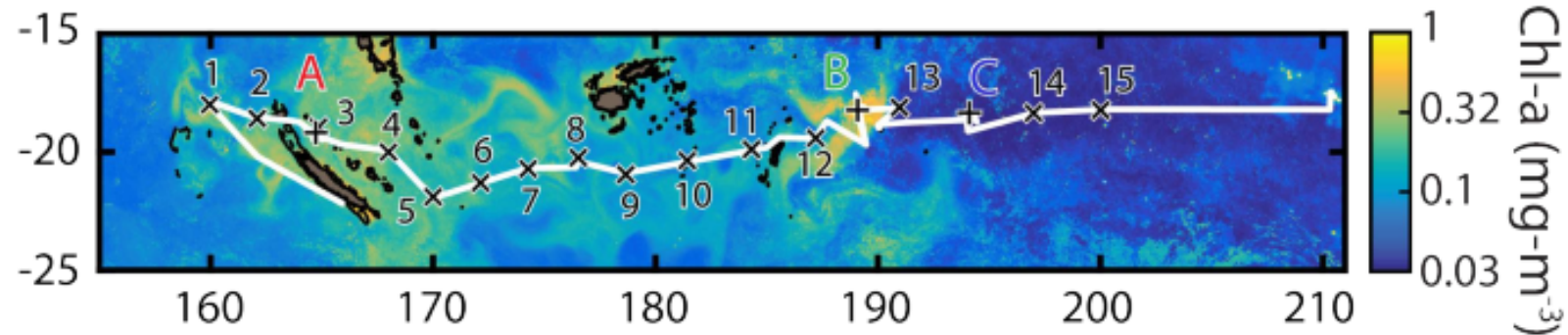
2) Impact de la (sous)mésoéchelle sur les blooms

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]

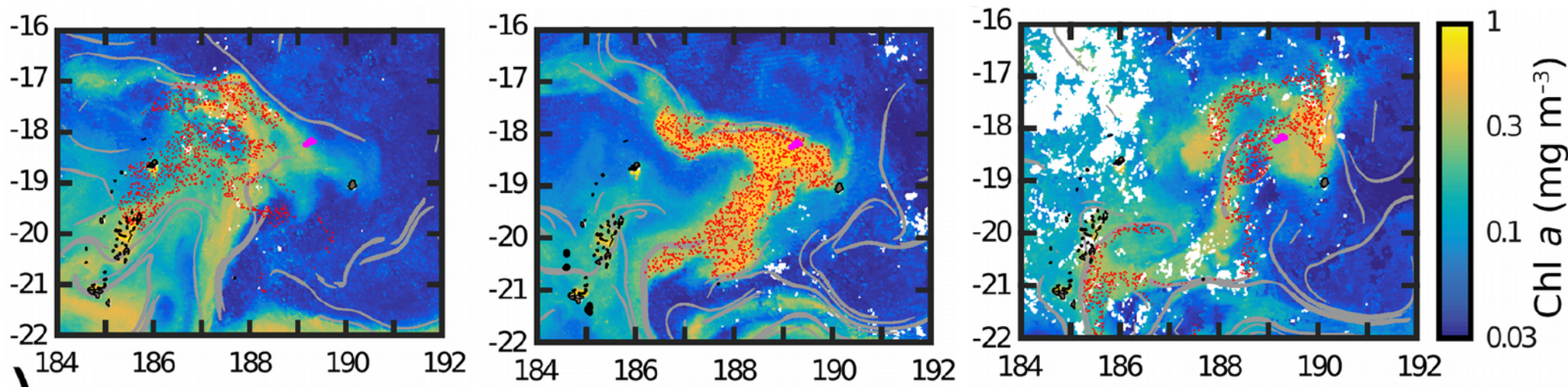
2) Impact de la (sous)mésoéchelle sur les blooms

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)



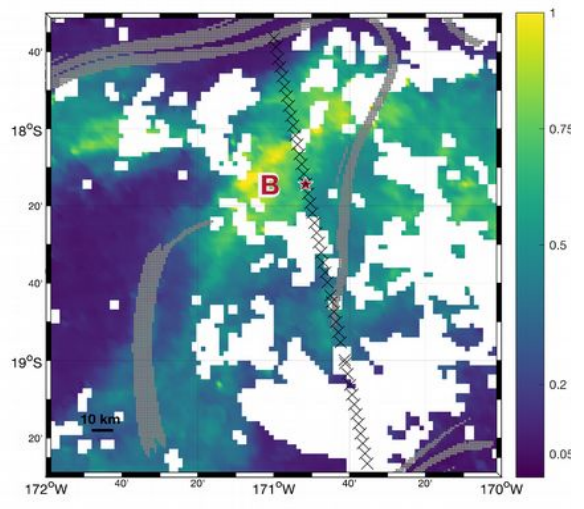
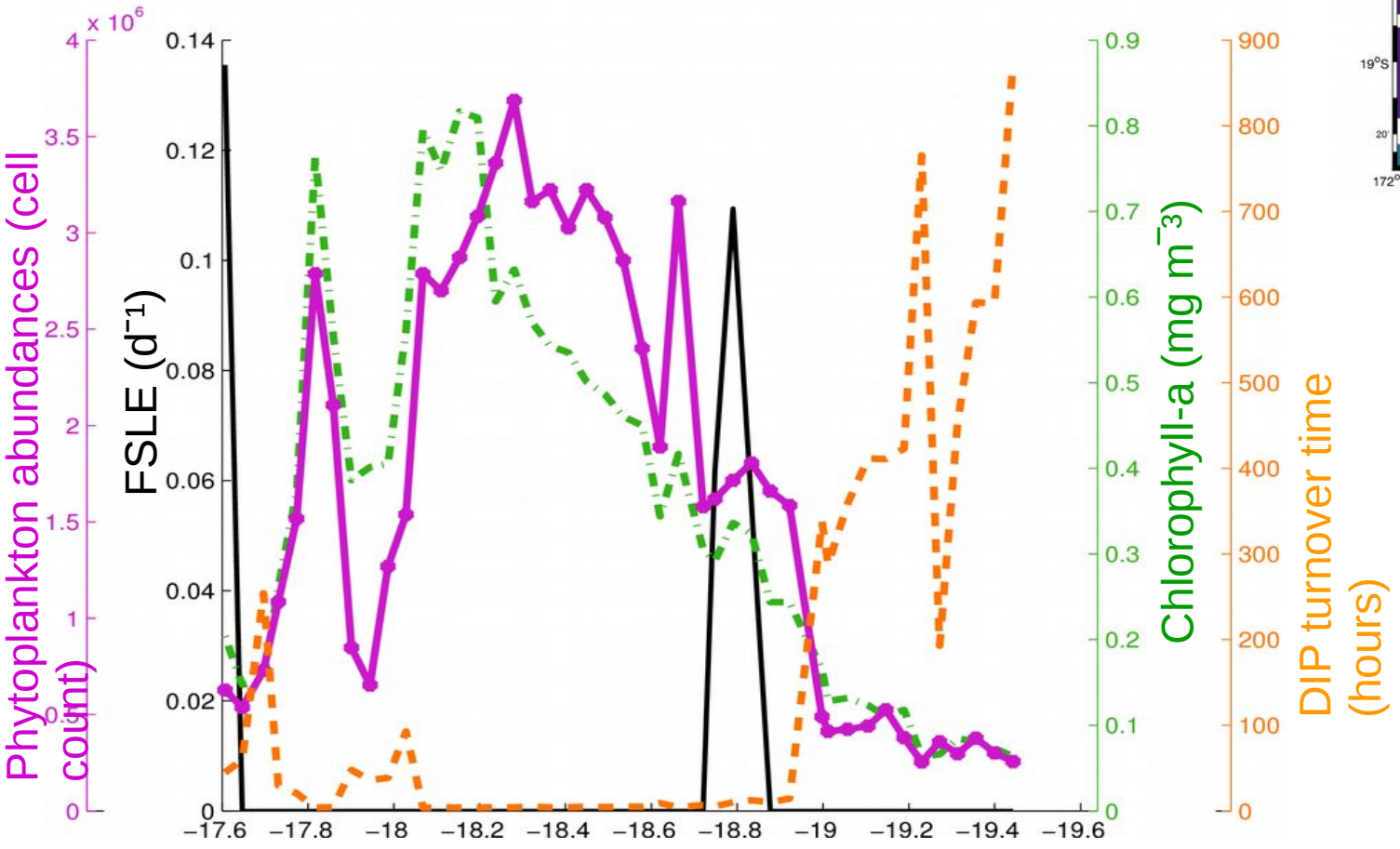
Eaux de surface enrichies étirées par la circulation de mésoéchelle

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

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

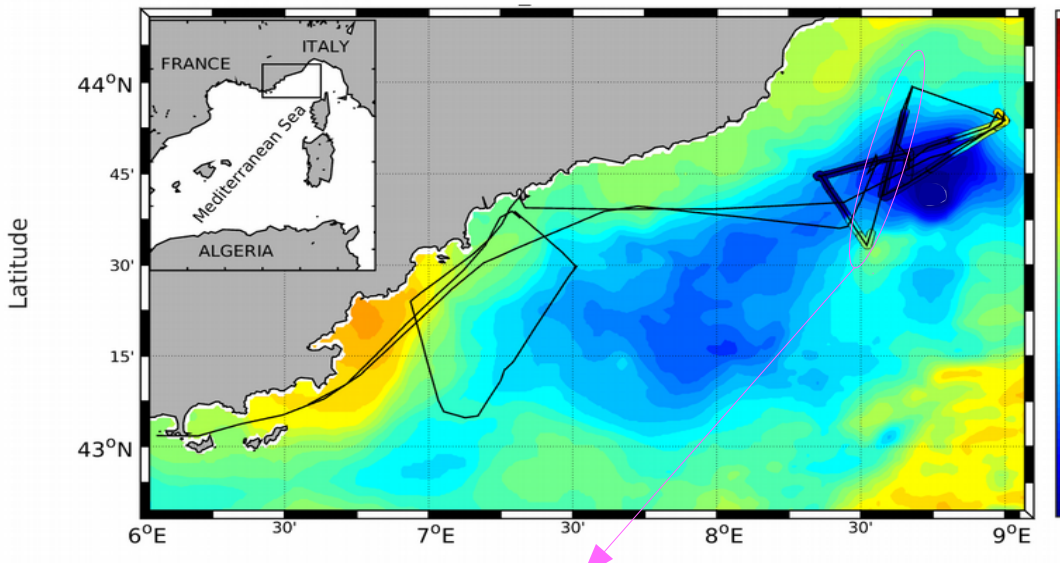


[Rousselet et al., 2018]

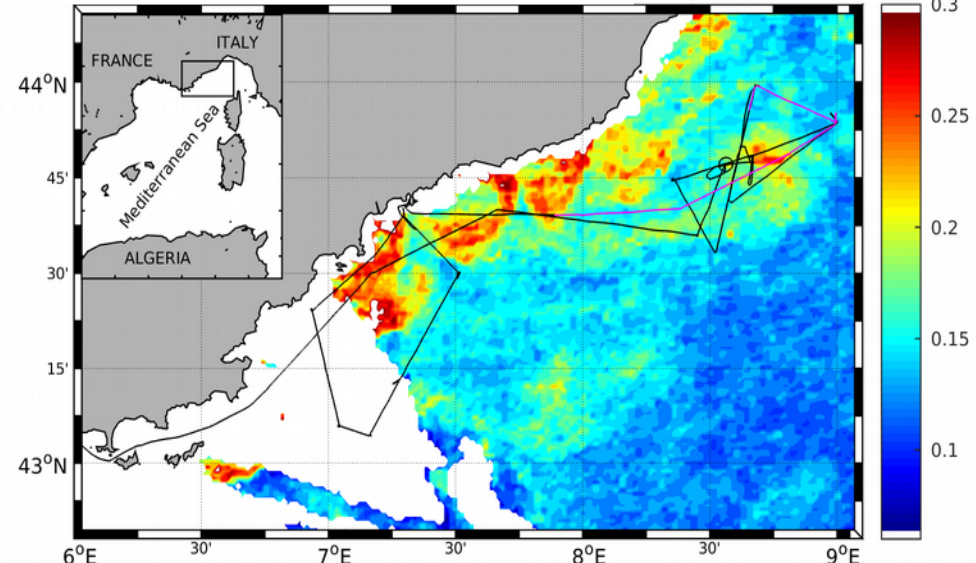
2) Impact de la (sous)mésoéchelle sur les blooms

Campagne OSCAHR [Doglioli, 2015]

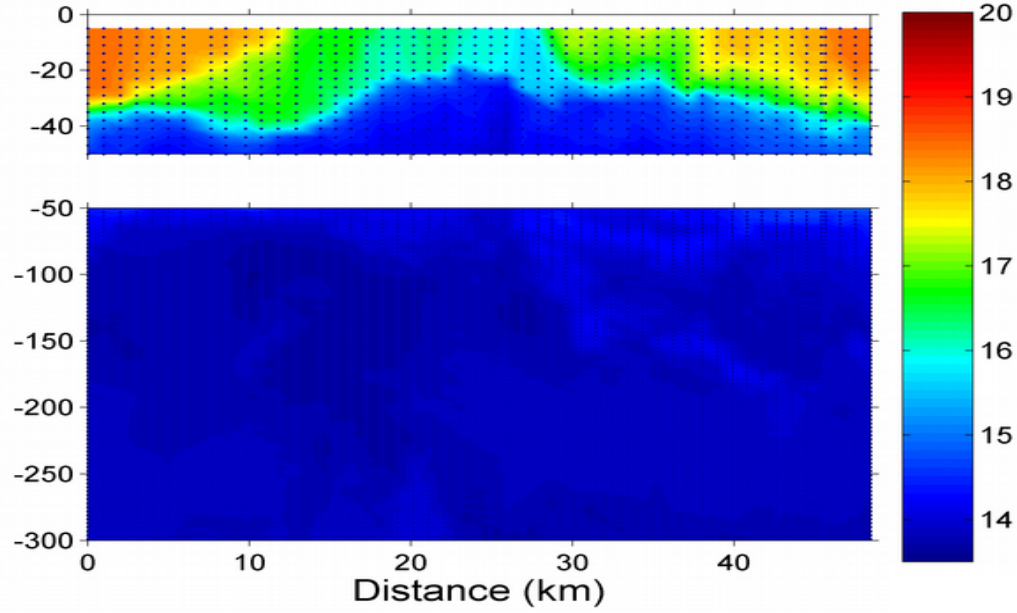
SST satellite et TSG



CHL satellite



Profils MVP

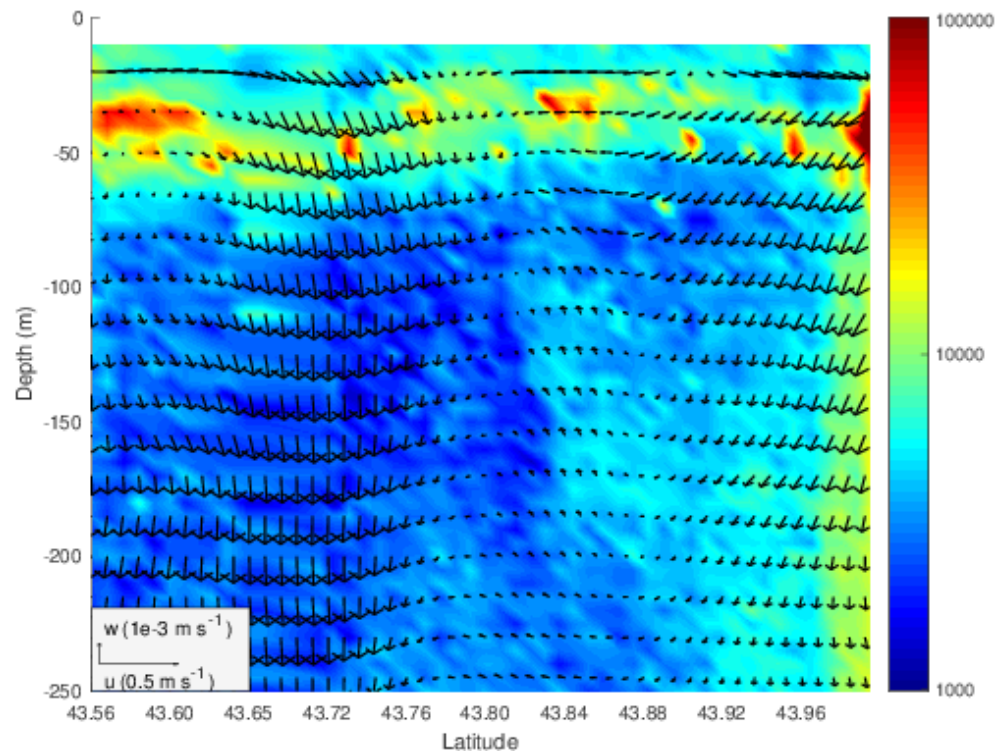


Minimum local de SST
&
Maximum local de CHL
associés à une remontée
des isothermes

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

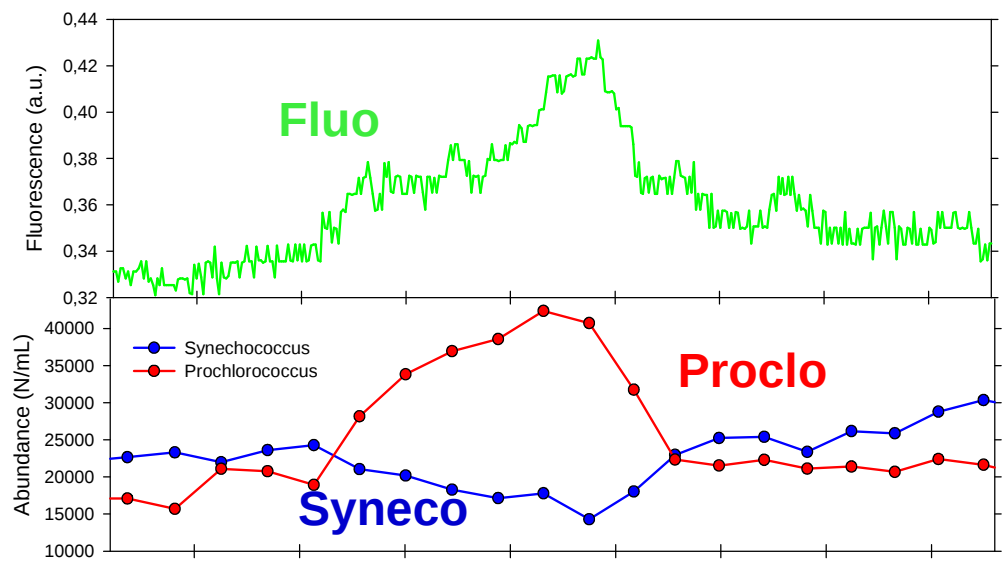
Campagne OSCAHR [Doglioli, 2015]

Profils MVP-LOPC et ADCP
et reconstruction des w



*Recirculation verticale
qui redistribue les particules*

Mesures de cytométrie
de surface



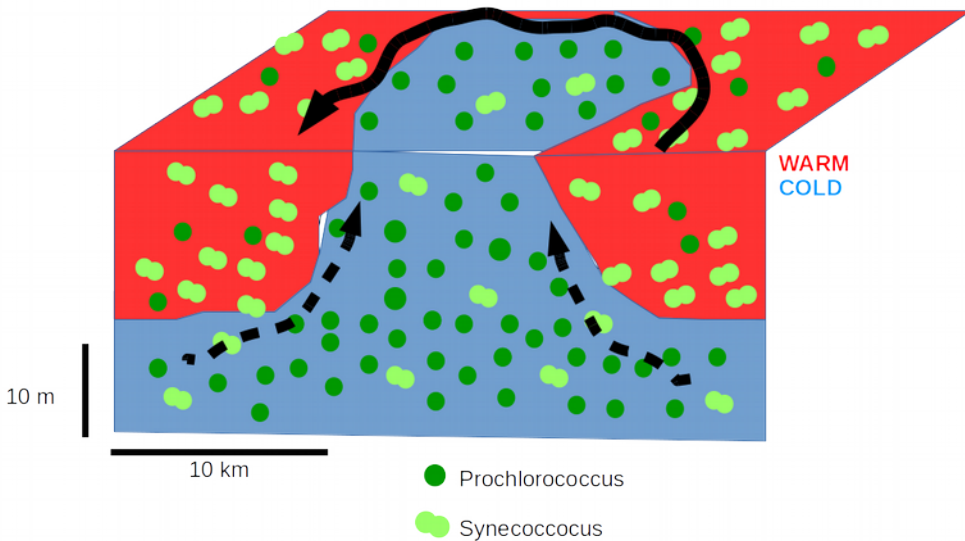
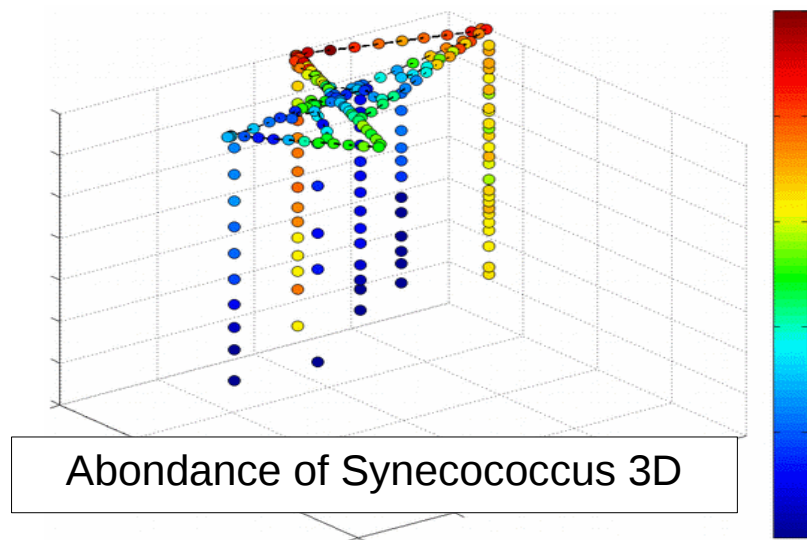
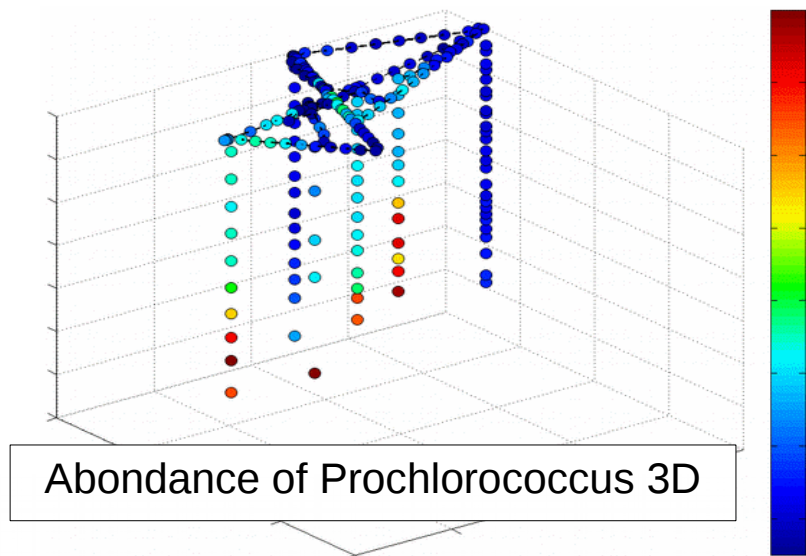
*Changement de structure de
la communauté*

[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*

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/

une "École Méditerranéenne d'Océanologie" ?



Perspectives de recherche

Court
Term

Effet d'îles

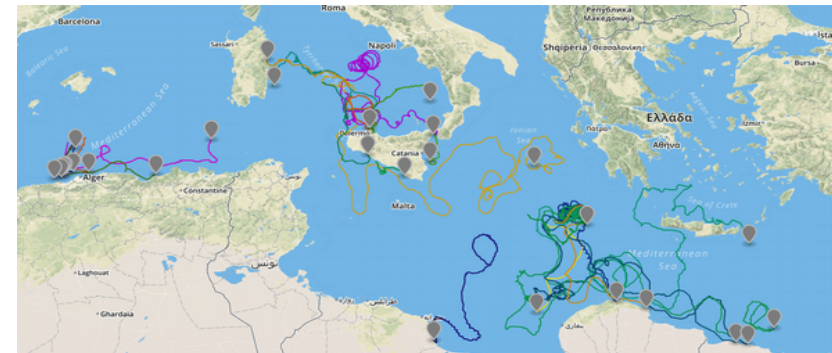
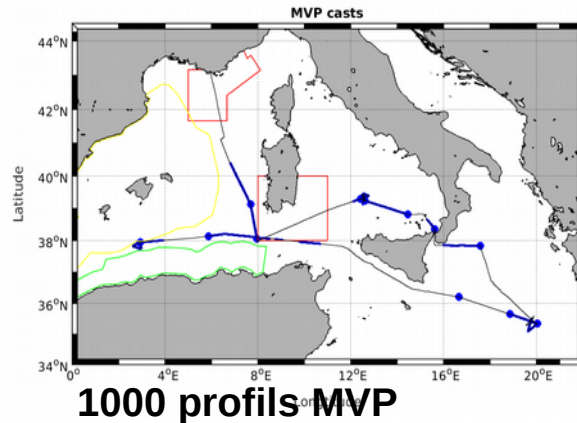
Finalisation de la valorisation des données OUTPACE et Satellite

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]



Moyen
Term

Circulation fine-échelle et biodiversité

Projet BIOSWOT

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

Projet Marbless

Long
Term

Temps

Perspectives de recherche

BIOSWOT

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

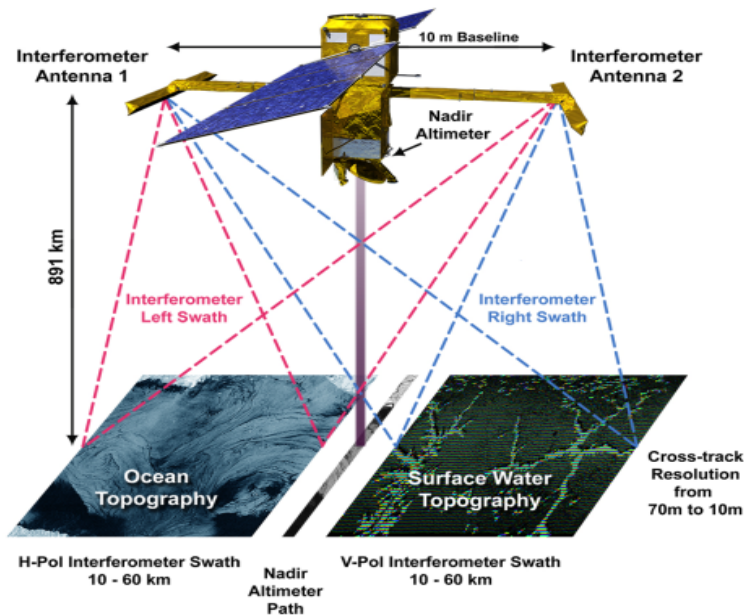
PI: F.d'Ovidio CoI: X.Capet, M.Levy, C.Cotté, A.Doglioli

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

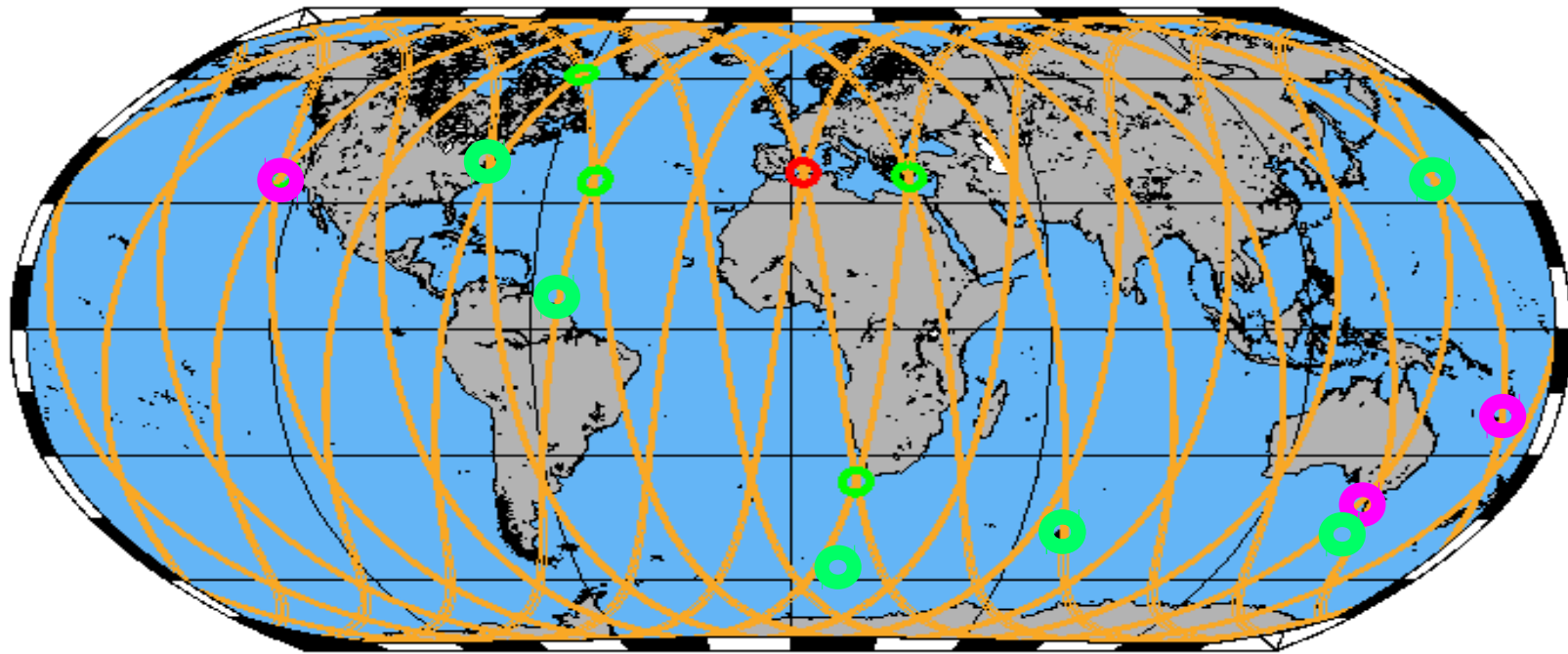
Perspectives de recherche

BIOSWOT

Fine-scale biophysical applications of SWOT

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

“Adopt a crossover” initiative

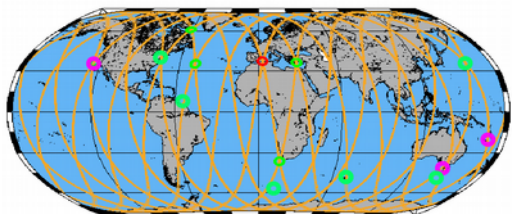


● Formally adopted (CalVal plan): 4

● Proposed adoption: 10

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

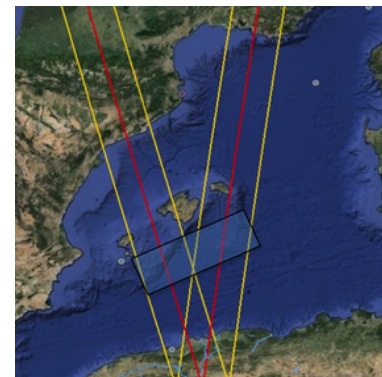
Perspectives de recherche



● 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)

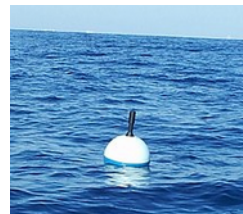


5-17 May 2018

Gliders
(MIO & SOCIB)



Drifters
(CSIC, SOCIB,
SHOM)

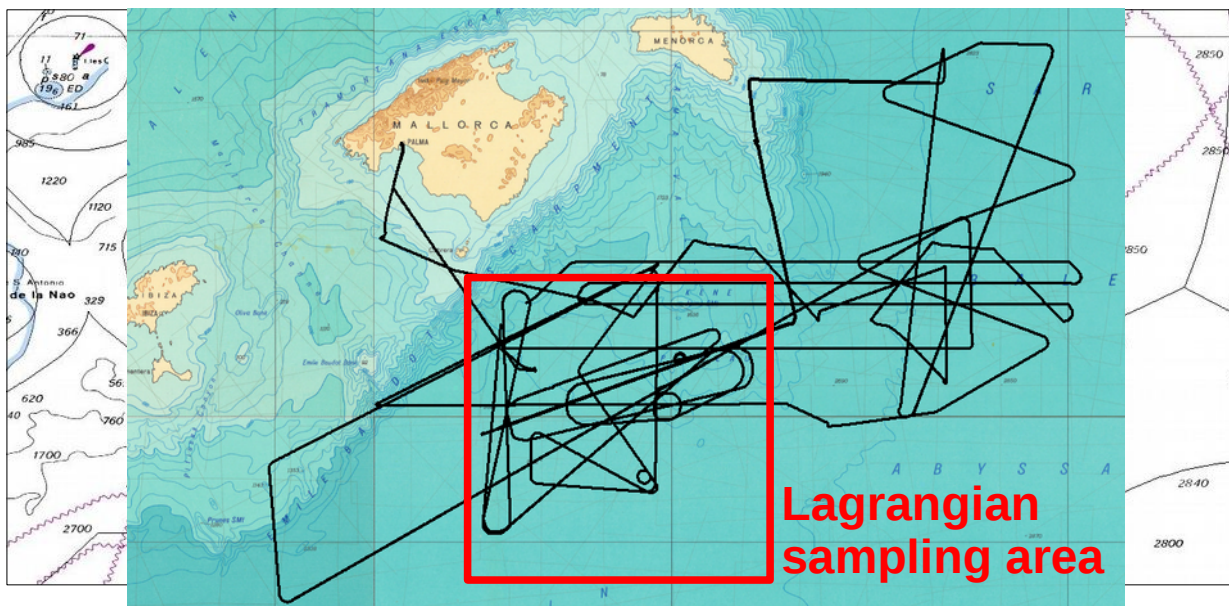


Airplane
with Lidar & Hyperspectral
Cameras (univ. Caen)

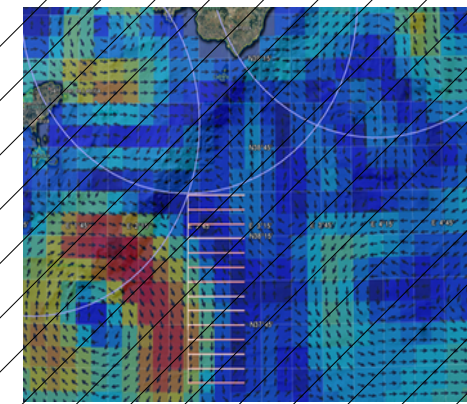
**MAUVAISE
METEO**



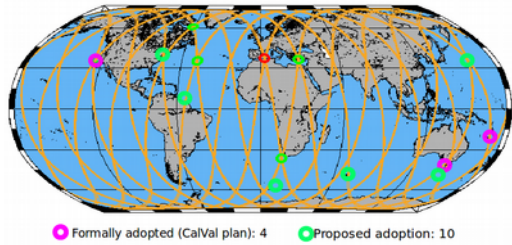
**PRÉVU
2019**



**Lagrangian
sampling area**

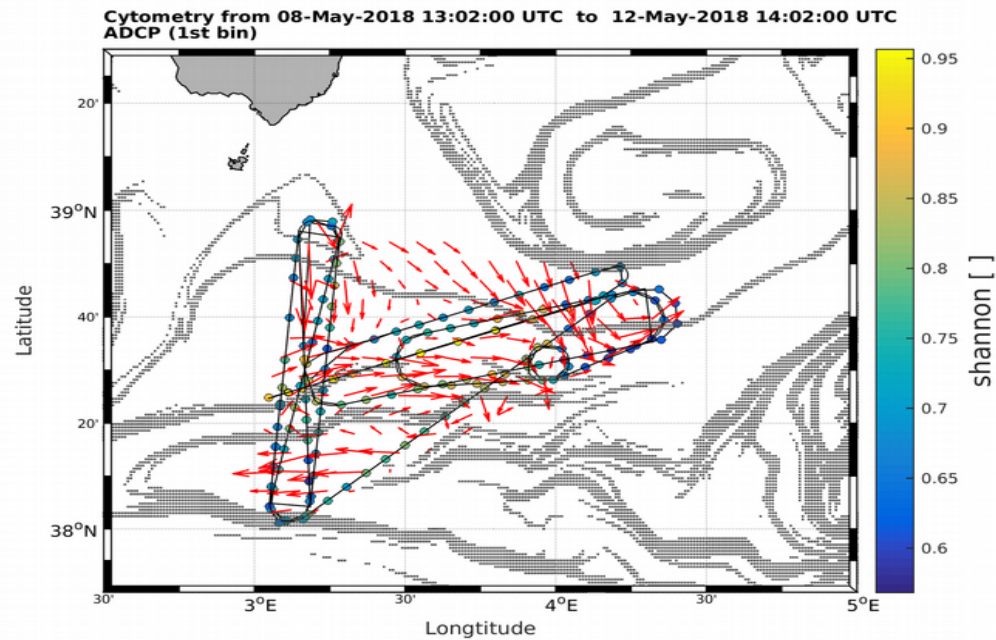
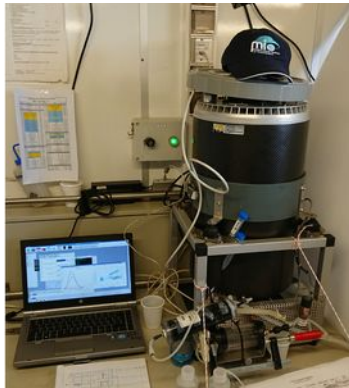
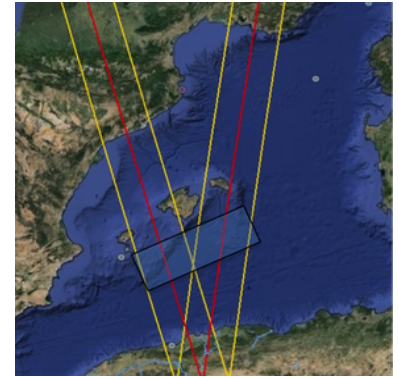


Perspectives de recherche



Première campagne

mai 2018



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!