

Structures tourbillonnaires à l'ouest du Golfe du Lion: Modélisation numérique et mesures en mer

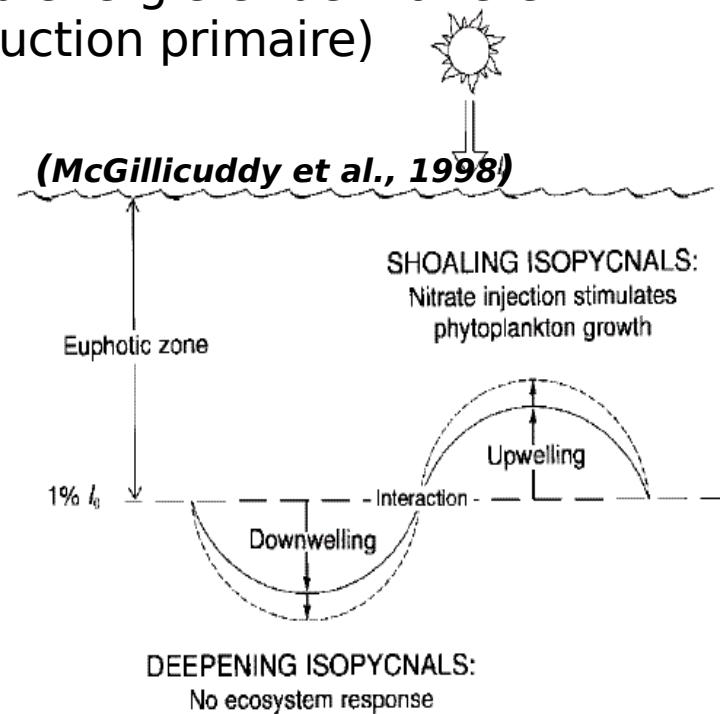
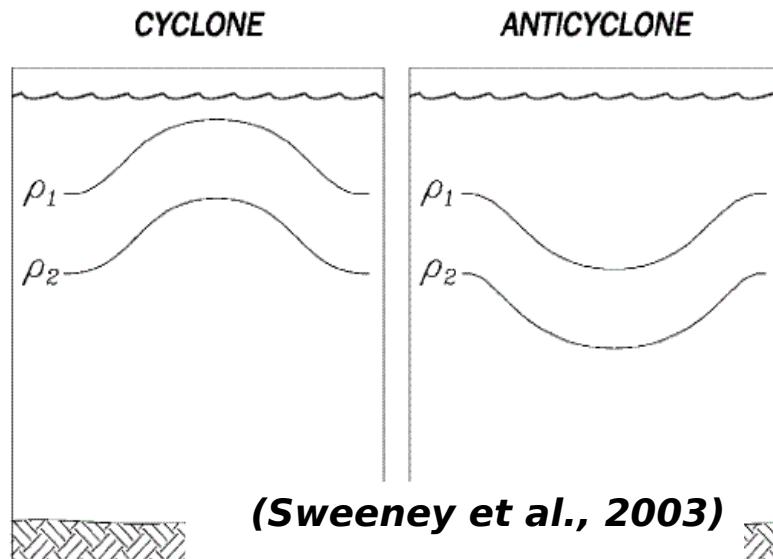
Ziyuan HU

Directeur de thèse: Ivan Dekeyser
Co-directeurs : Anne Petrenko, Andrea Doglioli

Soutenance de thèse – 24 février 2011

Motivations

Une influence importante sur les flux d'énergie et de matière
(e.g. nutriment, budgets production primaire)



Dans la zone hauturière
[Benitez-Nelson et al. 2007, McGillicuddy et al. 2007, Dickey et al 2008]

Dans la zone côtière
comme le Golfe du Lion
Peu d'études
Beaucoup de questions ouvertes

Résumé

I. Introduction:

- Tourbillons à l'ouest du Golfe du Lion et le projet Latex

II. Modélisation numérique:

- Études de la sensibilité – configuration optimisée
- caractéristiques des tourbillons simulés

III. Mesures en mer:

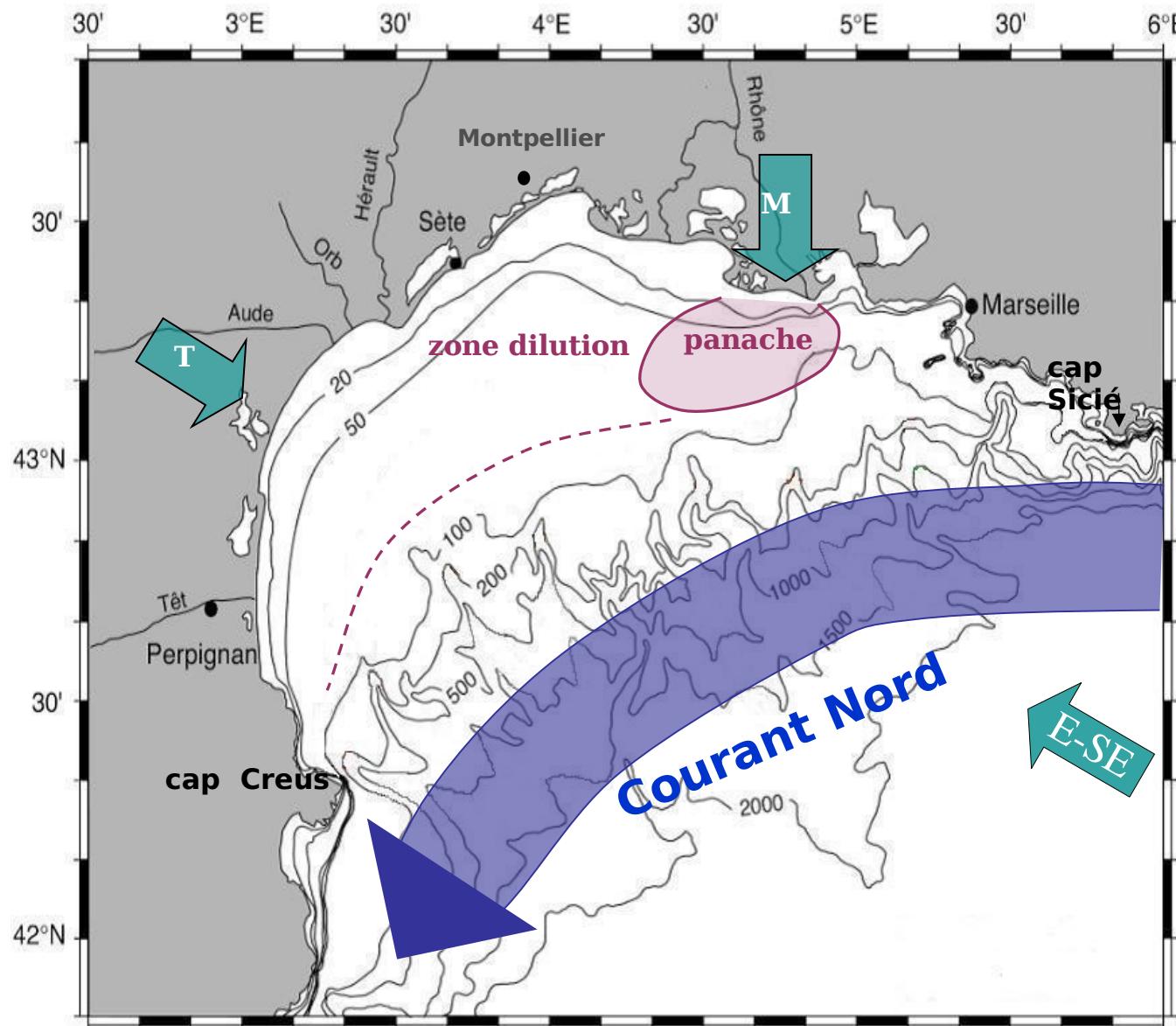
- Les campagnes en mer: Latex08 et Latex09

IV. Génération des tourbillons:

- Influence du vent
- Influence de stratification

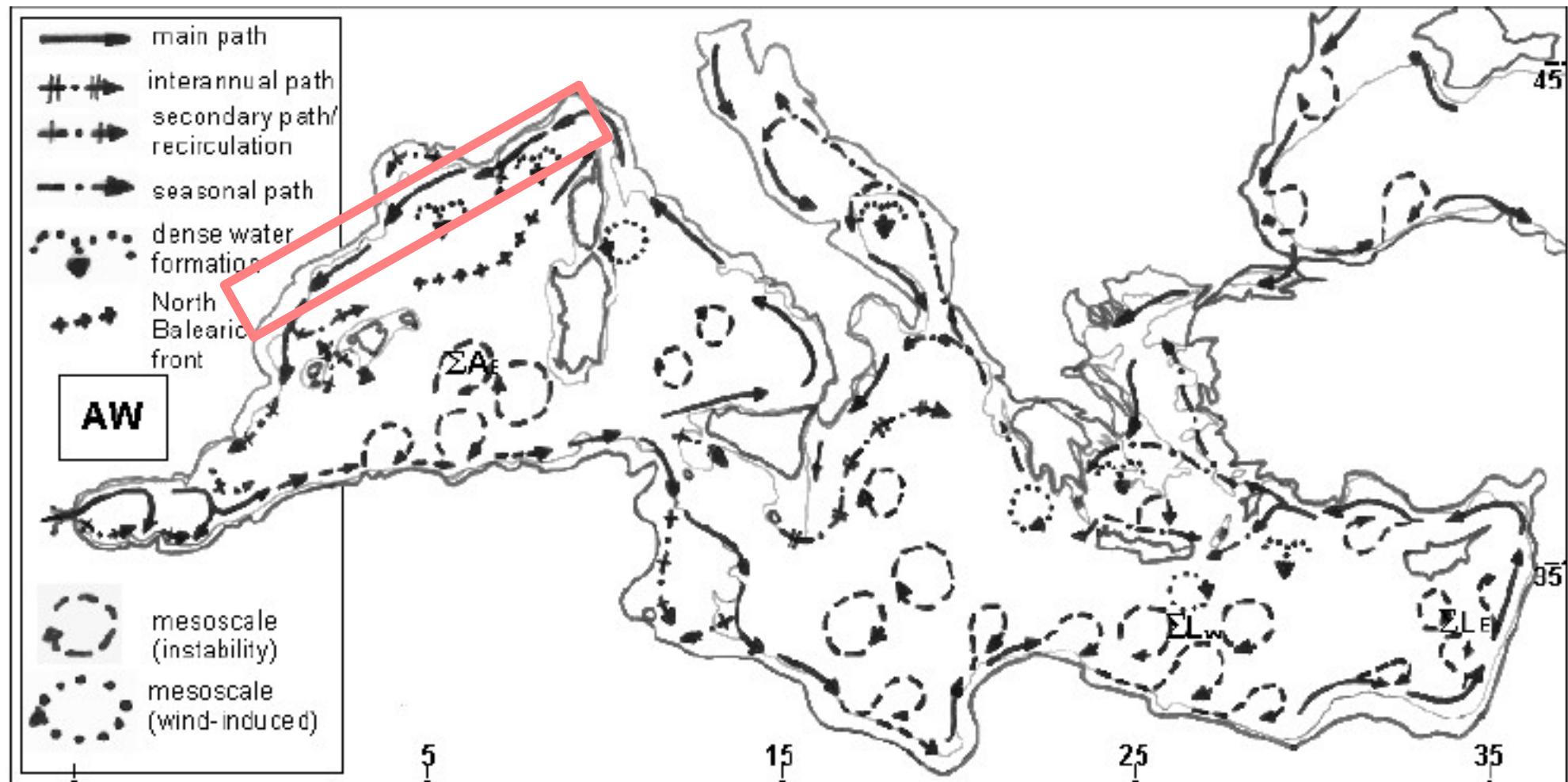
V. Conclusion et perspectives

Golfe du Lion (GoL)



- Description :
 - surface $\sim 11\,000 \text{ km}^2$
 - profondeur moyenne $\sim 80 \text{ m}$
 - nombreux canyons
- 1- Vents : Tramontane, Mistral.
- 2- Panache du Rhône
- 3- Courant Nord (CN)

Golfe du Lion (GoL)



Postulat d'une circulation anticyclonique à l'ouest du Golfe du Lion

[Millot 1979]

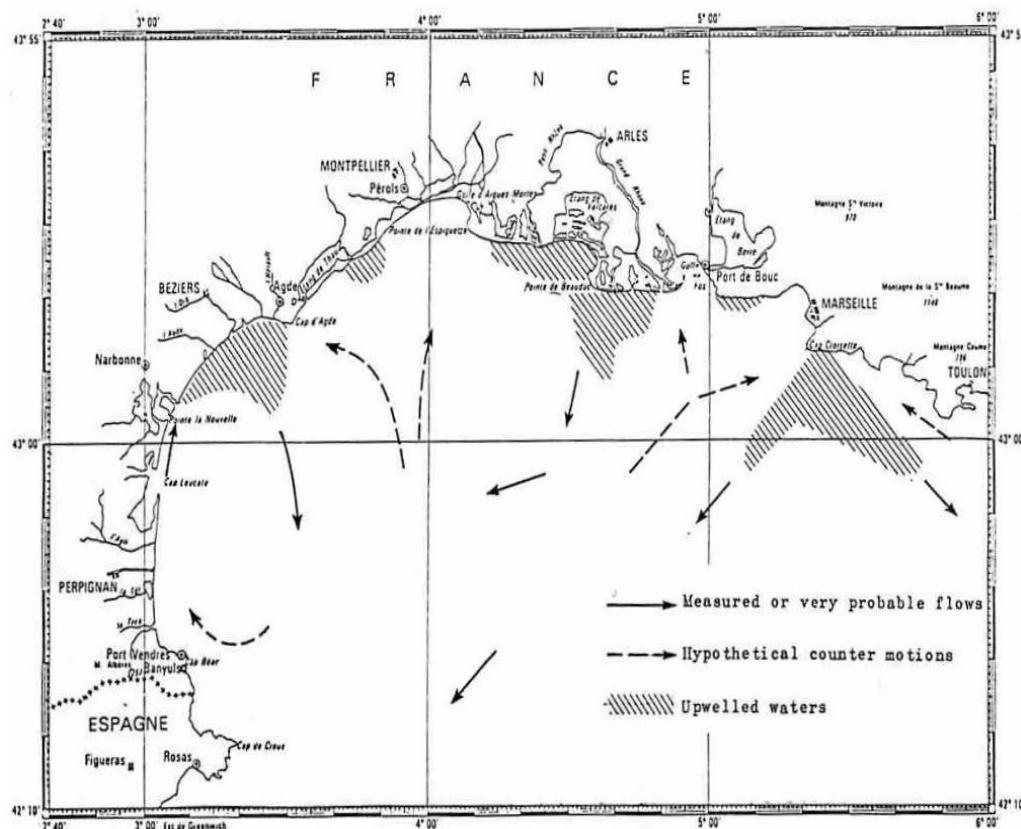


Schéma de circulation issue de mesures avec mouillages fixes

[Millot 1982]

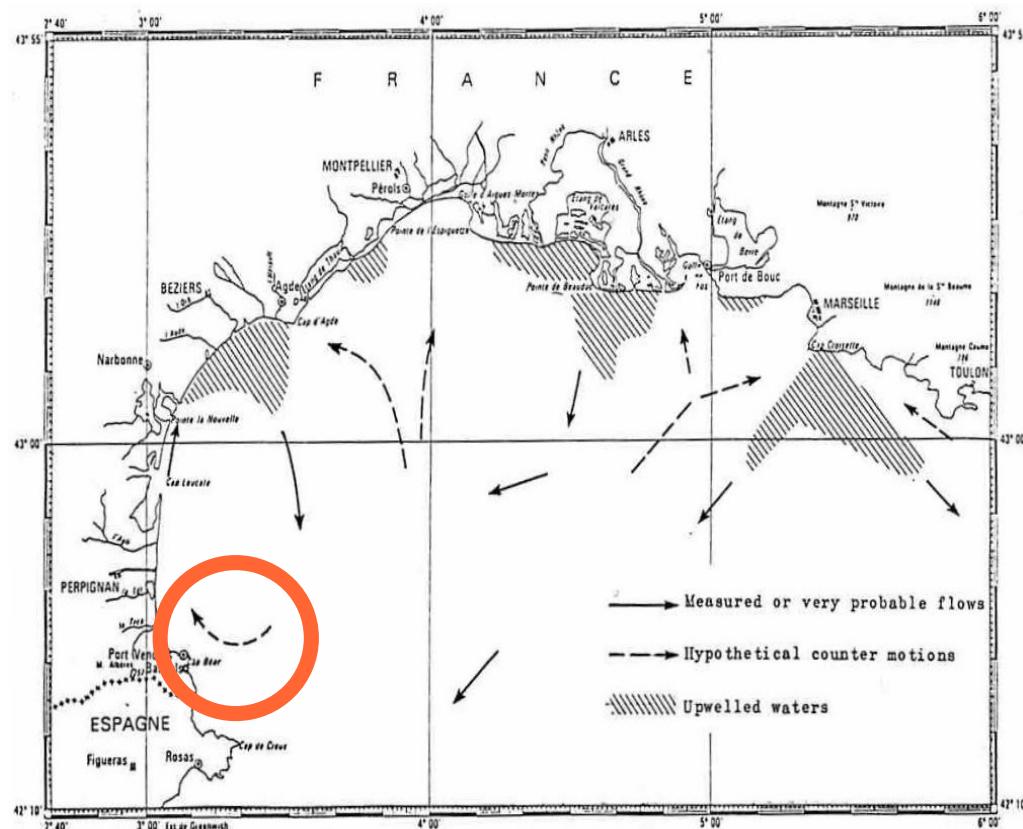
SEA SURFACE TEMPERATURE DISTRIBUTION on 08/01/77,
about one day after the onset of a NW storm. Isotherm interval is 0.5°C and grey interval is 1°C



Température de surface de la mer (SST),
09 00 TU, 1 août, 1977

Postulat d'une circulation anticyclonique à l'ouest du Golfe du Lion

[Millot 1979]



[Millot 1982]

SEA SURFACE TEMPERATURE DISTRIBUTION on 08/01/77,
about one day after the onset of a NW storm. Isotherm interval is 0.5°C and grey interval is 1°C



Schéma de circulation issue de mesures
avec mouillages fixes

Température de surface de la mer (SST),
09 00 TU, 1 août, 1977

Postulat d'une circulation anticyclonique à l'ouest du Golfe du Lion

[Millot 1979]

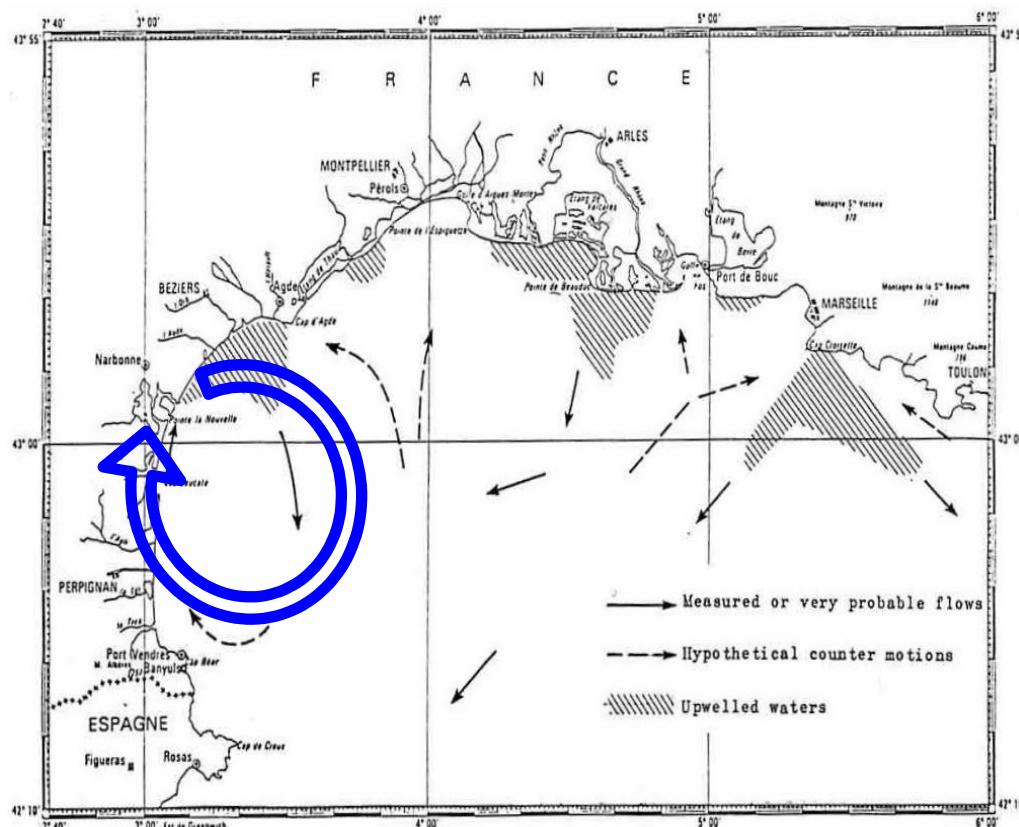
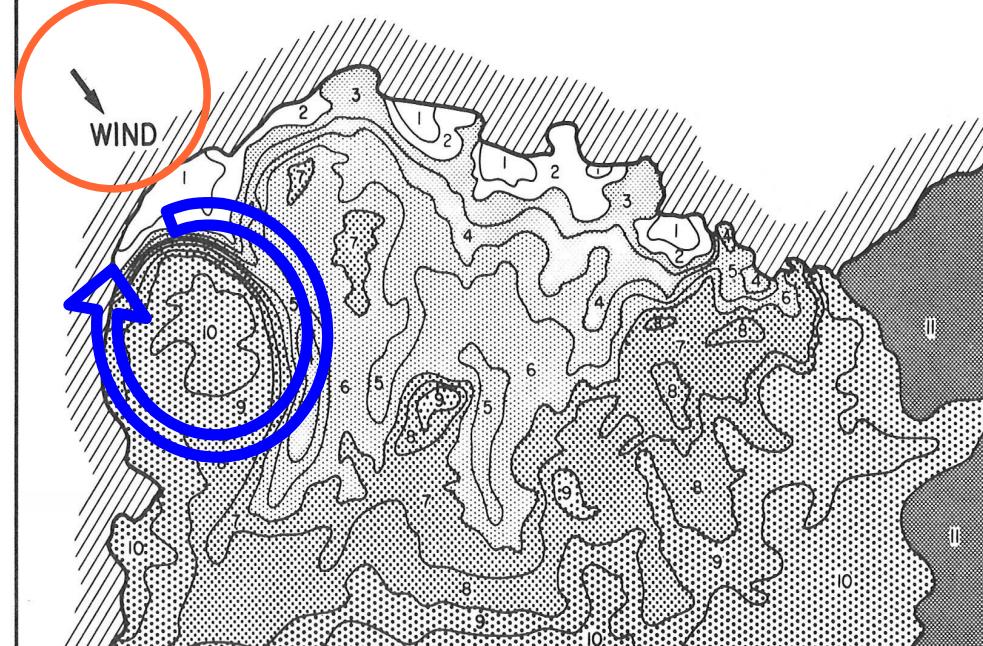


Schéma de circulation issue de mesures avec mouillages fixes

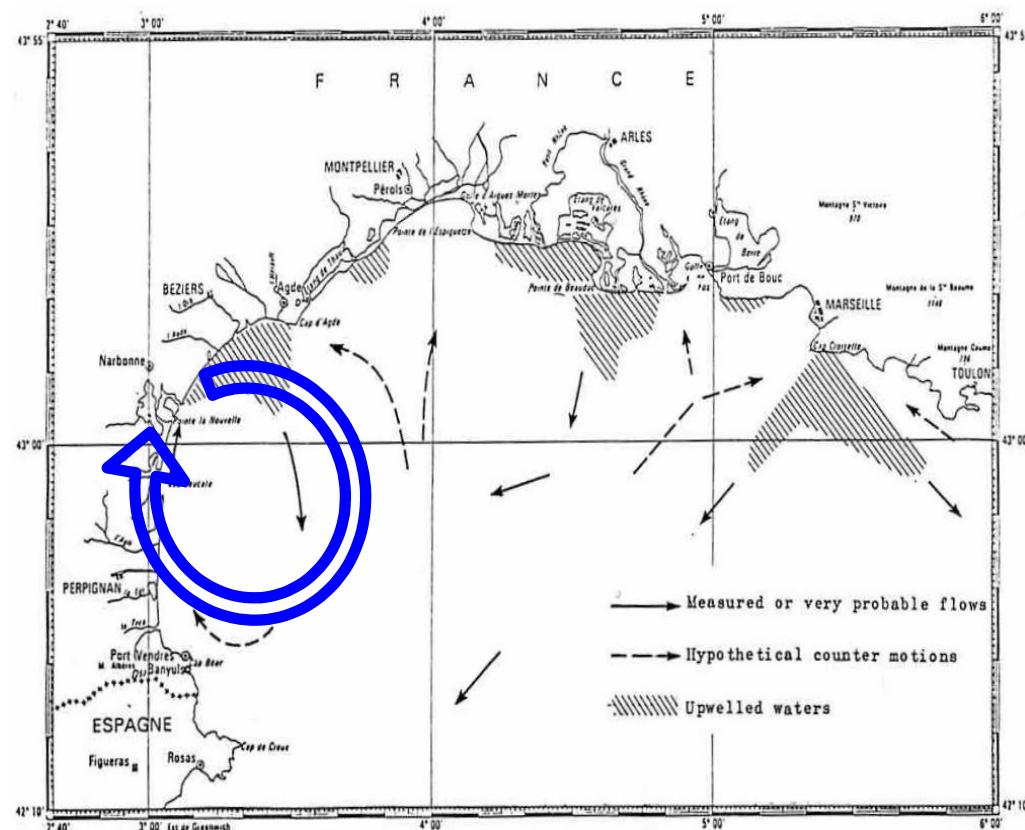
[Millot 1982]

SEA SURFACE TEMPERATURE DISTRIBUTION on 08/01/77,
about one day after the onset of a NW storm. Isotherm interval is 0.5°C and grey interval is 1°C



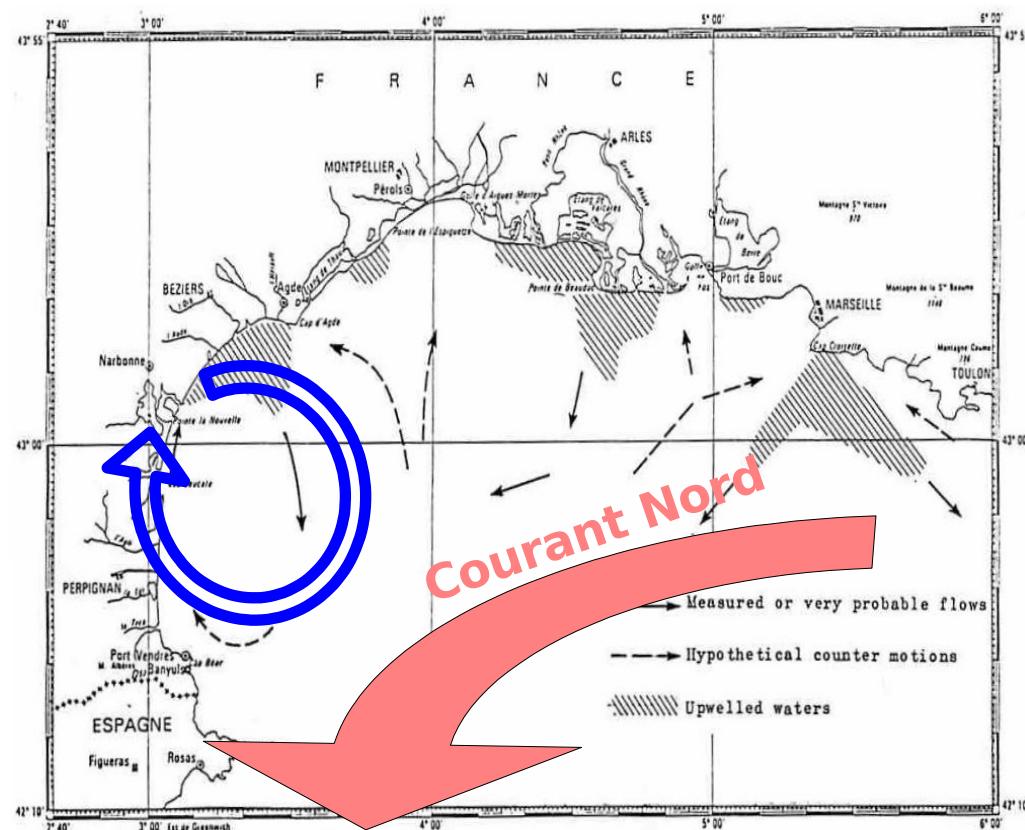
Température de surface de la mer (SST),
09 00 TU, 1 août, 1977

Postulat d'une circulation anticyclonique à l'ouest du Golfe du Lion



- Probabilité d'existence?
- Reproductibilité?
- Caractéristiques?
- Processus de leur génération?

Postulat d'une circulation anticyclonique à l'ouest du Golfe du Lion



- Probabilité d'existence?
- Reproductibilité?
- Caractéristiques?
- Processus de leur génération?

Projet **LATEX** (LAgrangian Transport Experiment),
2008 – 2011

PIs: A. Petrenko and F. Diaz

OBJECTIF

Étudier l'influence des structures (sub) mésoéchelle sur les échanges côte-large dans le Golfe du Lion

Numérique



Expérimentale

II. Modélisation Numérique

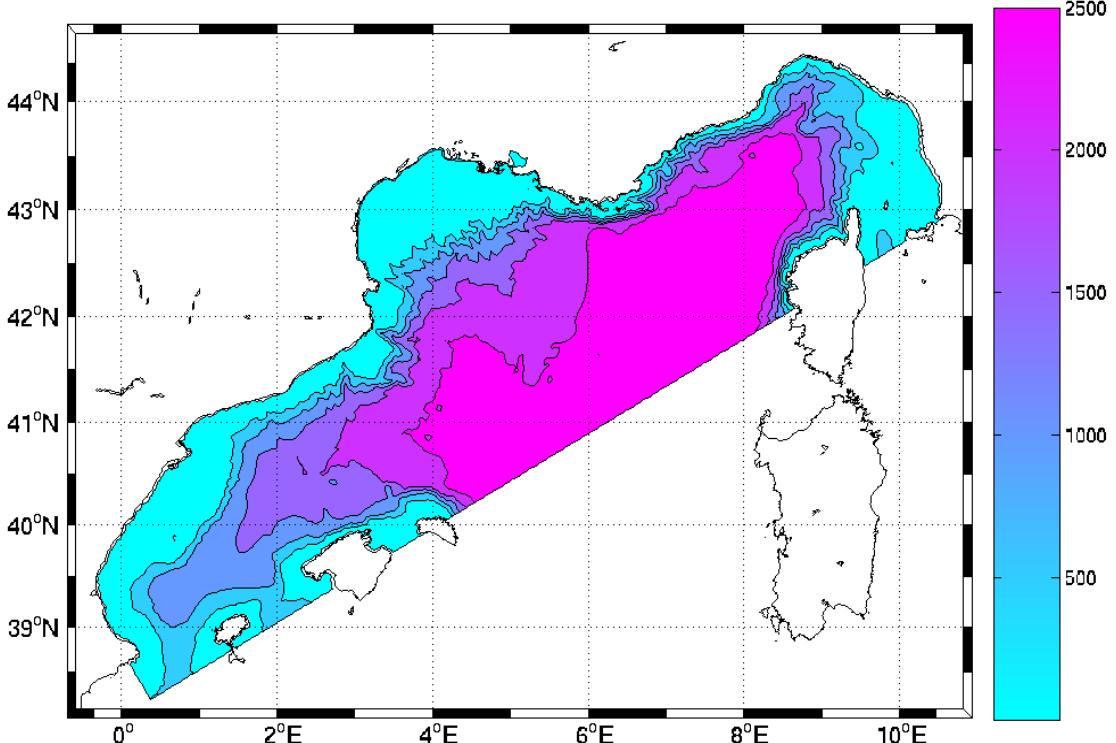


Modèle numérique: **SYMPHONIE**

Laboratoire d'Aérologie de Toulouse, France [P. Marsaleix and C. Estournel]

Domaine + Bathymétrie

$$\Delta x = \Delta y = 3 \text{ km}$$



3D; Equations primitives

Grille horizontale : Arakawa C

Vertical: 40 sigma-z hybrid

Schéma fermeture: [Caspar et al., 1990]

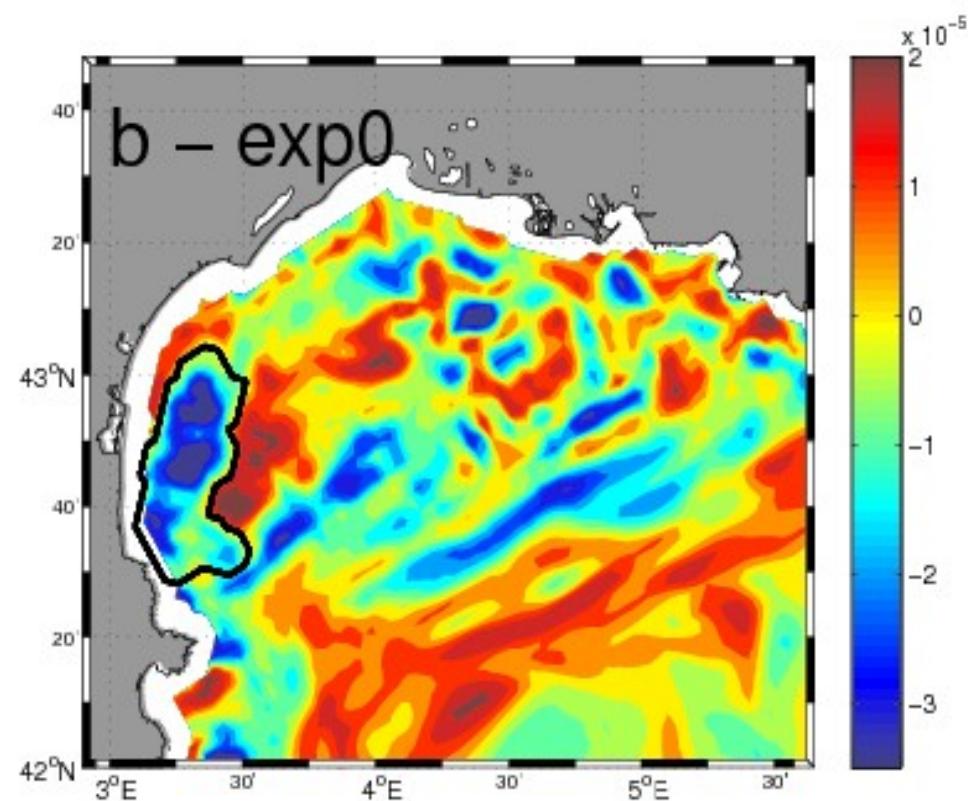
Coordonée vertical: 40 sigma-z hybrid
horizontal: $\Delta X = \Delta Y$

Forçages atmosphériques: Modèle Aladin
de Météo-France

Conditions aux frontières: Sorties du
modèle OPA par MFSTEP

Initialisation: [Estournel et al., 2003]

Vorticité relative [s^{-1}] (20m)
2001, 07/25



$$\zeta = \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y}$$



Anticyclonique



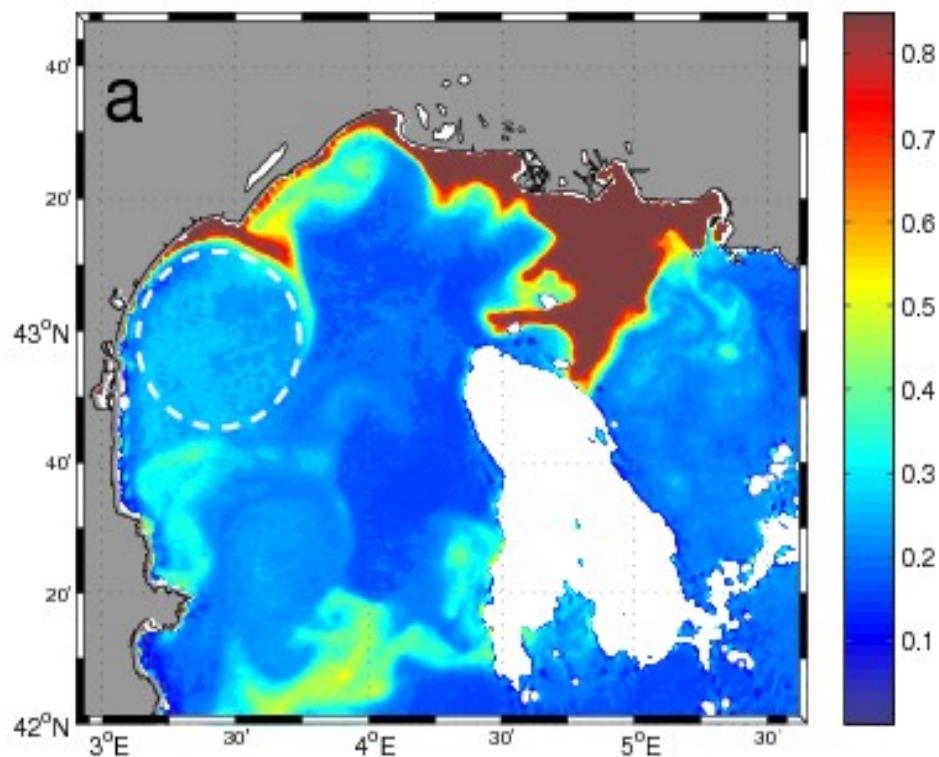
Cyclonique

Hémisphère Nord

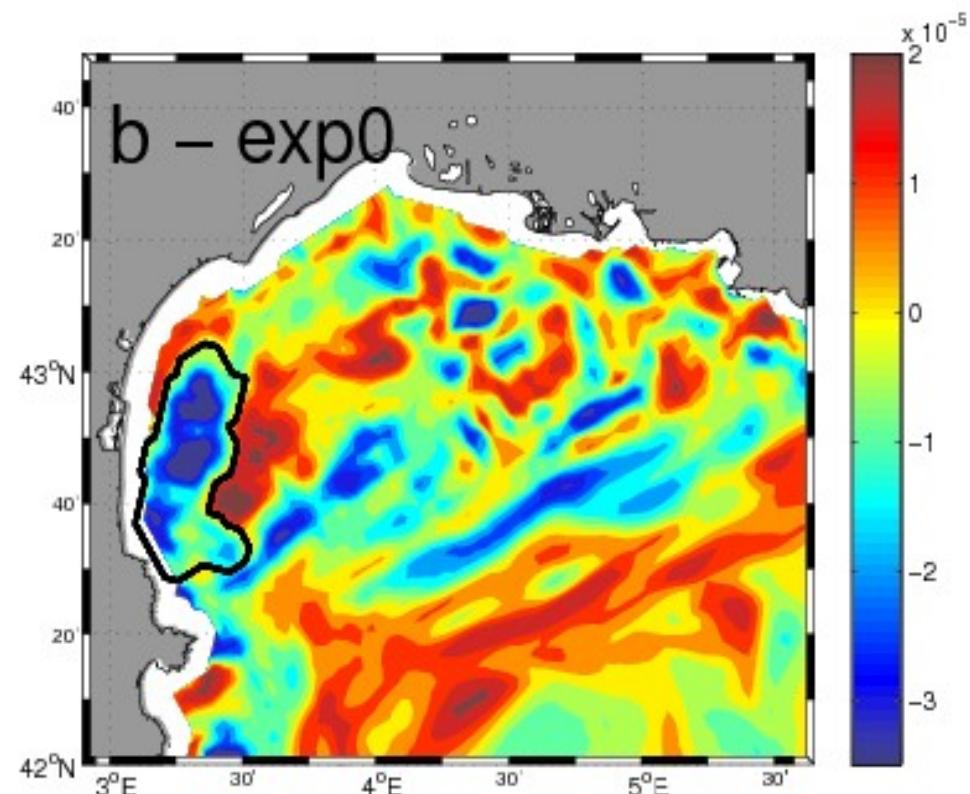
Résolution: **3km**
Coefficient de viscosité $A=15 \text{ m}^2/\text{s}$
[Dufau-Julliand, 2004]

Identification du tourbillon – Analyse en ondelettes
[Doglioli et al., 2007]

SeaWiFS [mg·m⁻³]
2001, 07/25



Vorticité relative [s⁻¹] (20m)
2001, 07/25



Concentration chlorophyll a [mg·m⁻³]
25 juillet, 2001 (E. Bosc)

Résolution: **3km**
Coefficient de viscosité $A=15$ m²/s
[Dufau-Julliand, 2004]

Identification du tourbillon – Analyse en ondelettes
[Doglioli et al., 2007]

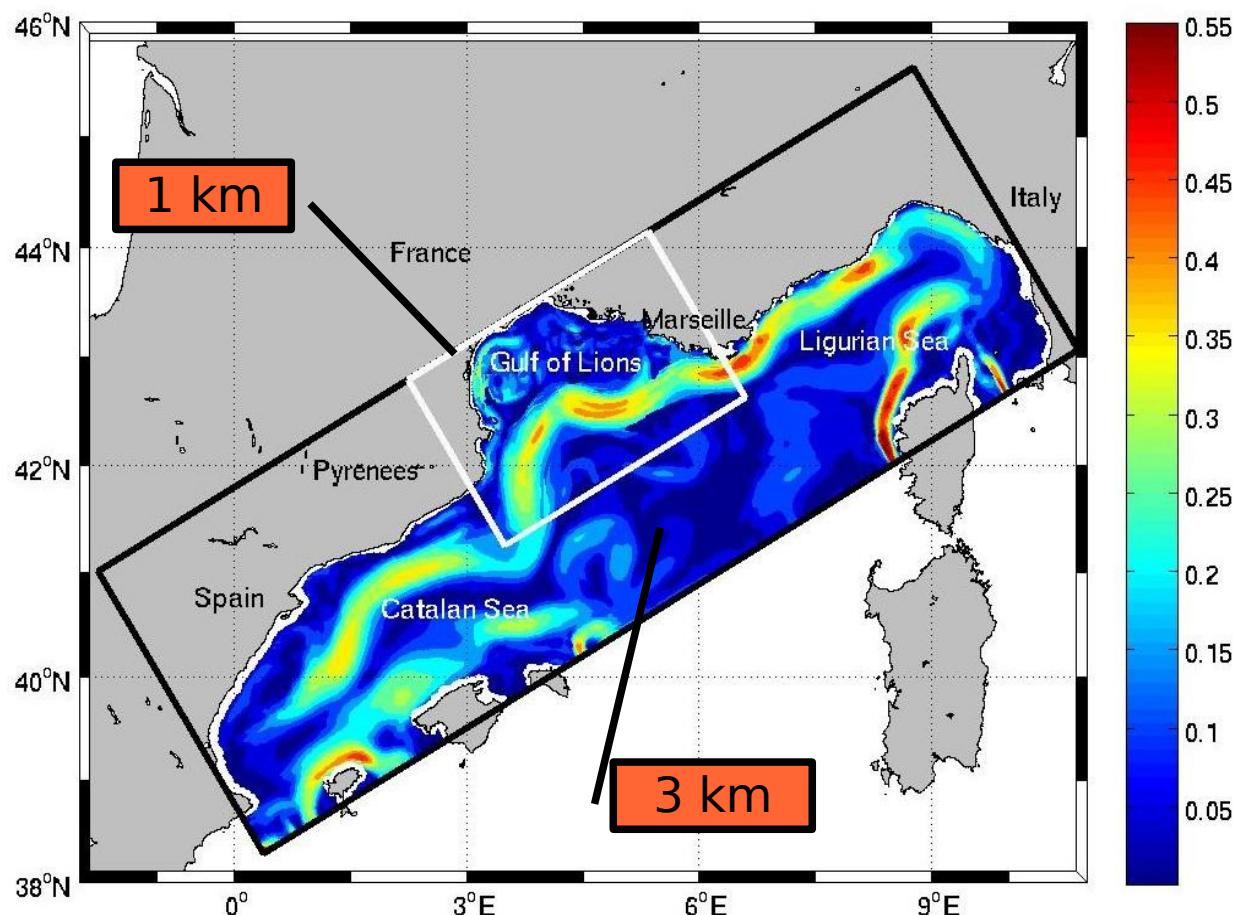
Etude de sensibilité

Objectif: Trouver une configuration optimisée du modèle afin de simuler les tourbillons de façon plus réaliste.

- Résolution spatiale horizontale
3km → 1 km
- Le terme de diffusion horizontale:
diffusion numérique

Étude de sensibilité: imbrication

Intensité du courant [m/s] (20m)



[Hu et al., Ocean Model., 2009]

- Résolution: 3km → 1km [Spall et Holland, 1991]
- Zoom sur le GoL
- One – Way nesting

Étude de sensibilité: Diffusion horizontale

Upwind = Advection + Diffusion

Discrétisation temporelle-schéma 'Leapfrog' dans la direction OX:

$$\frac{\phi_i^{t+\Delta t} - \phi_i^{t-\Delta t}}{2\Delta t} = - \frac{u_{i+1/2} \frac{\phi_i^t + \phi_{i+1}^t}{2} + u_{i-1/2} \frac{\phi_i^t + \phi_{i-1}^t}{2}}{\Delta x} + \frac{A_{i+1/2} \frac{\phi_{i+1}^{t-\Delta t} - \phi_i^{t-\Delta t}}{\Delta x} - A_{i-1/2} \frac{\phi_i^{t-\Delta t} - \phi_{i-1}^{t-\Delta t}}{\Delta x}}{\Delta x}$$

Advection

Diffusion
numérique

[James, 1996]

Étude de sensibilité: Diffusion horizontale

Upwind = Advection + Diffusion

Discrétisation temporelle-schéma 'Leapfrog' dans la direction OX:

$$\frac{\phi_i^{t+\Delta t} - \phi_i^{t-\Delta t}}{2\Delta t} = - \frac{u_{i+1/2} \frac{\phi_i^t + \phi_{i+1}^t}{2} + u_{i-1/2} \frac{\phi_i^t + \phi_{i-1}^t}{2}}{\Delta x} + \frac{A_{i+1/2} \frac{\phi_{i+1}^{t-\Delta t} - \phi_i^{t-\Delta t}}{\Delta x} - A_{i-1/2} \frac{\phi_i^{t-\Delta t} - \phi_{i-1}^{t-\Delta t}}{\Delta x}}{\Delta x}$$

[James, 1996]

Advection

Diffusion
numérique

Schéma conservant l'énergie,
[Marsaleix et al., 2008]

Coefficient de viscosité: $A = \text{Constant}$ $\rightarrow A = |u| \frac{\Delta x}{2}$
($15 \text{m}^2/\text{s}$)

Étude de sensibilité: Diffusion horizontale

Upwind = Advection + Diffusion

Discrétisation temporelle-schéma 'Leapfrog' dans la direction OX:

$$\frac{\phi_i^{t+\Delta t} - \phi_i^{t-\Delta t}}{2\Delta t} = -\frac{u_{i+1/2} \frac{\phi_i^t + \phi_{i+1}^t}{2} + u_{i-1/2} \frac{\phi_i^t + \phi_{i-1}^t}{2}}{\Delta x} + \frac{A_{i+1/2} \frac{\phi_{i+1}^{t-\Delta t} - \phi_i^{t-\Delta t}}{\Delta x} - A_{i-1/2} \frac{\phi_i^{t-\Delta t} - \phi_{i-1}^{t-\Delta t}}{\Delta x}}{\Delta x}$$

[James, 1996]

Advection

Diffusion
numérique

Schéma conservant l'énergie,
[Marsaleix et al., 2008]

Coefficient de viscosité: $A = \text{Constant}$ $\rightarrow A = |u| \frac{\Delta x}{2}$ $\rightarrow \tilde{A} = \delta \cdot |u| \frac{\Delta x}{2}$

$(15 \text{m}^2/\text{s})$

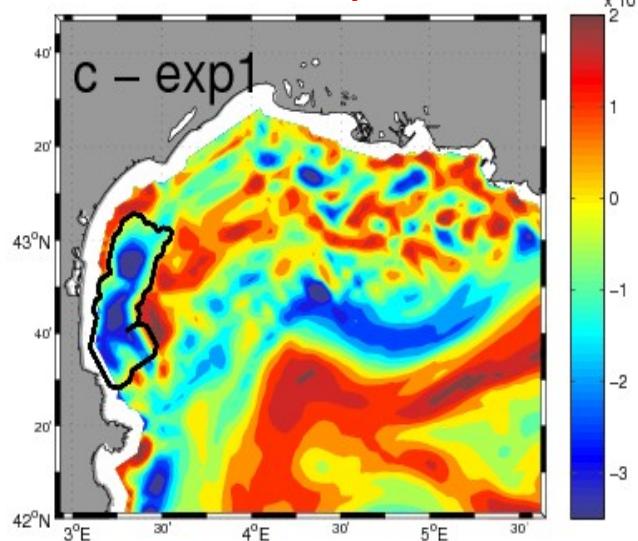
Coefficient d'atténuation: $\delta = 0$ Non diffusion
 $\delta = 1$ 100% diffusion

Étude de sensibilité: Résolution + Diffusion horizontale

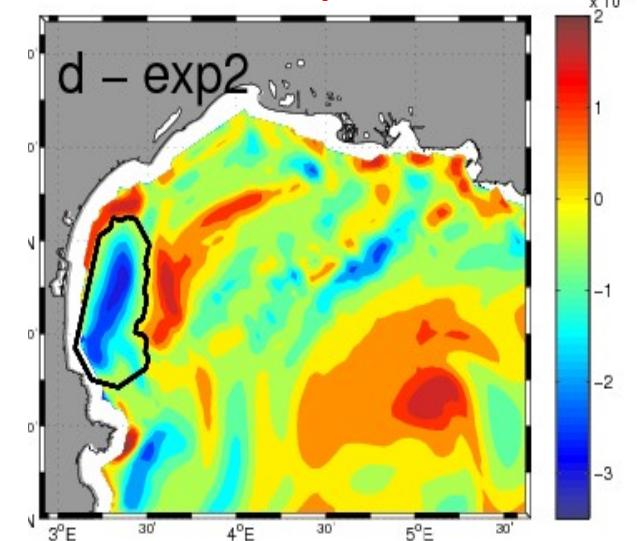
Vorticité relative simulée [s^{-1}] (20m) au 25 juillet 2001

Résolution: 3km → 1km
 $\delta = 0,2; 0,8$

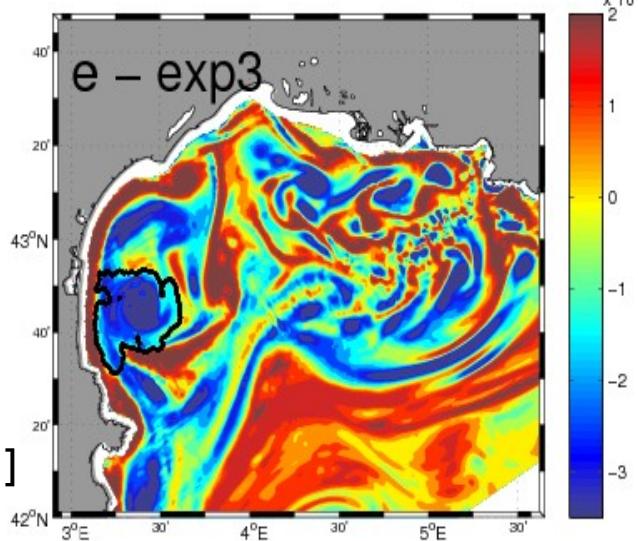
Résolution: **3km**
 $\delta = 0,2$



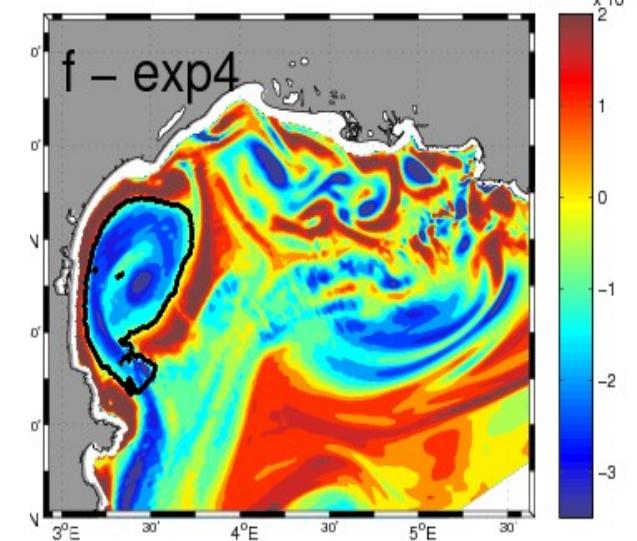
Résolution: **3km**
 $\delta = 0,8$



Résolution: **1km**
 $\delta = 0,2$



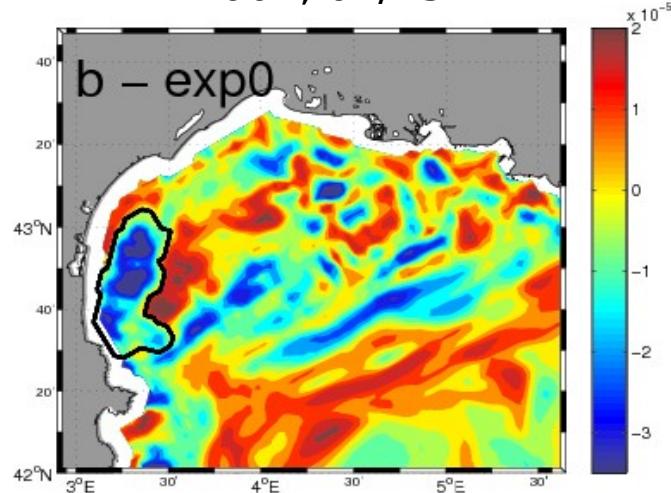
Résolution: **1km**
 $\delta = 0,8$



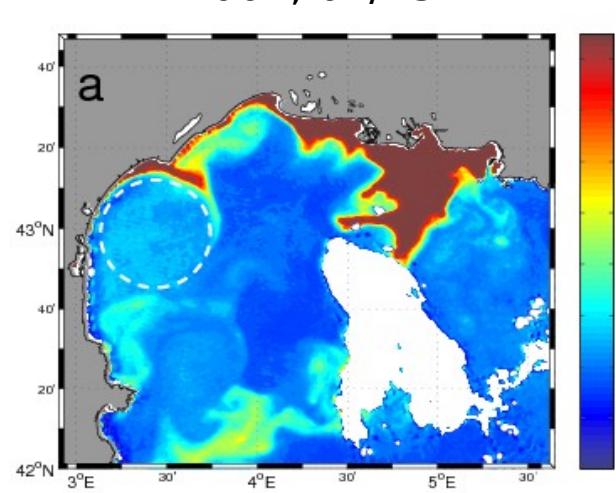
[Hu et al., Ocean Model., 2009]

Étude de la sensibilité: Résolution + Diffusion horizontale

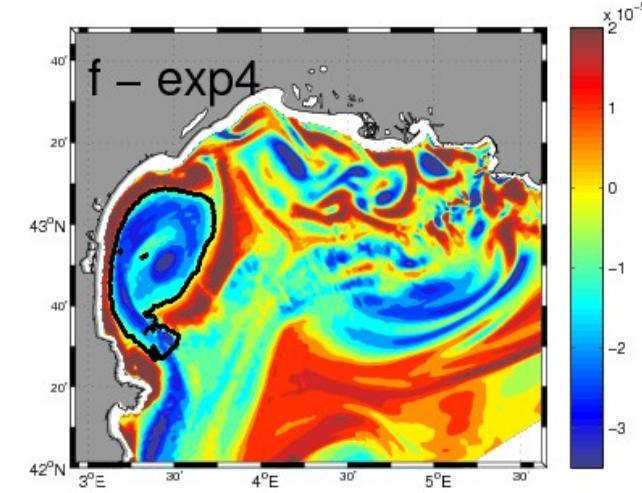
Vorticité relative (20m)
2001, 07/25



SeaWiFs
2001, 07/25



Vorticité relative (20m)
2001, 07/25



Résolution: **3km**

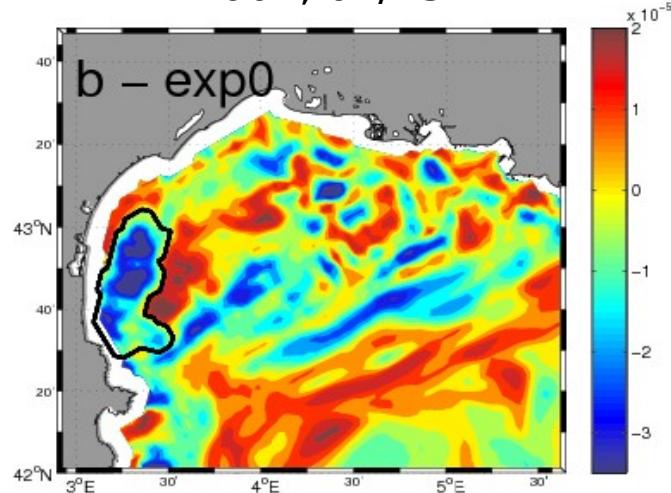
Coefficient de viscosité $A=15 \text{ m}^2/\text{s}$

Concentration chlorophyll a
25 juillet, 2001
(E. Bosc)

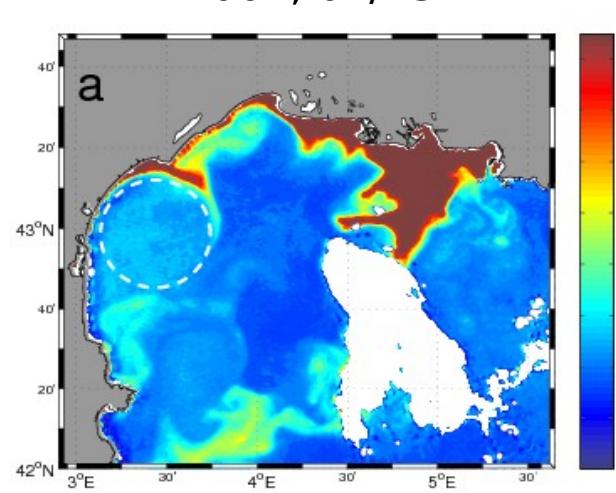
Résolution: **1km**
 $\delta = 0,8$

Étude de la sensibilité: Résolution + Diffusion horizontale

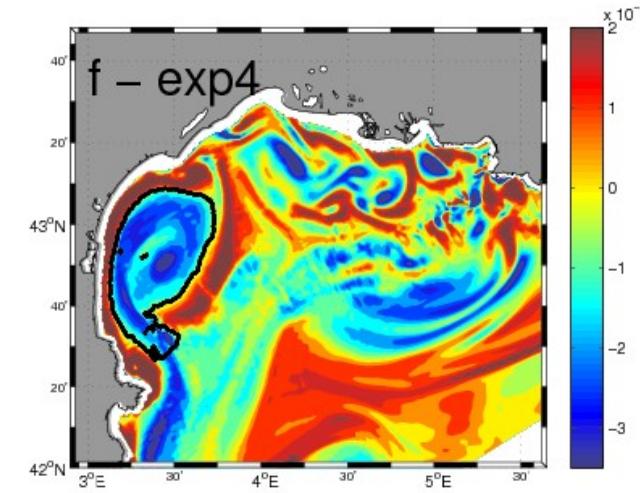
Vorticité relative (20m)
2001, 07/25



SeaWiFs
2001, 07/25



Vorticité relative (20m)
2001, 07/25



Résolution: **3km**

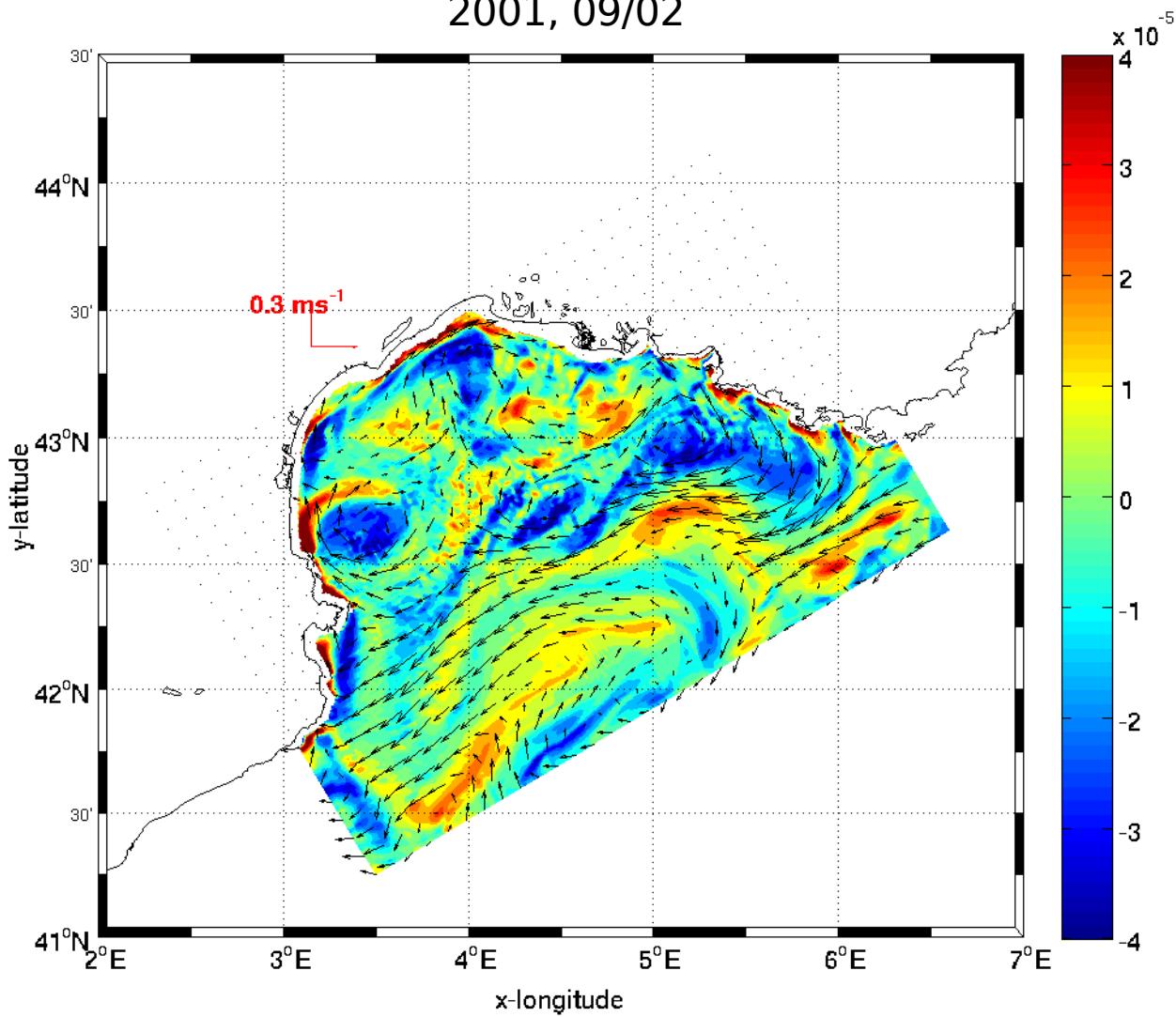
Coefficient de viscosité $A=15 \text{ m}^2/\text{s}$

Concentration chlorophyll a
25 juillet, 2001
(E. Bosc)

Résolution: **1km**
 $\delta = 0,8$

Caractéristiques du tourbillon simulé en 2001

Vorticité relative + champs du courant (20m)
2001, 09/02



Tourbillon anticyclonique
A1_2001 en 2001

23 juillet → 6 Octobre
(76 jours)

Rayon ~ 20 km

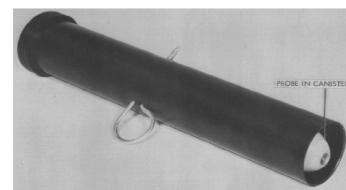
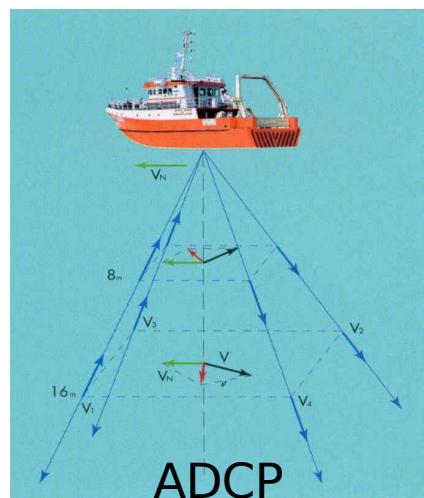
III. Mesures en mer

Campagnes en mer dans le cadre du projet LATEX

Latex08: 1 – 6 septembre 2008

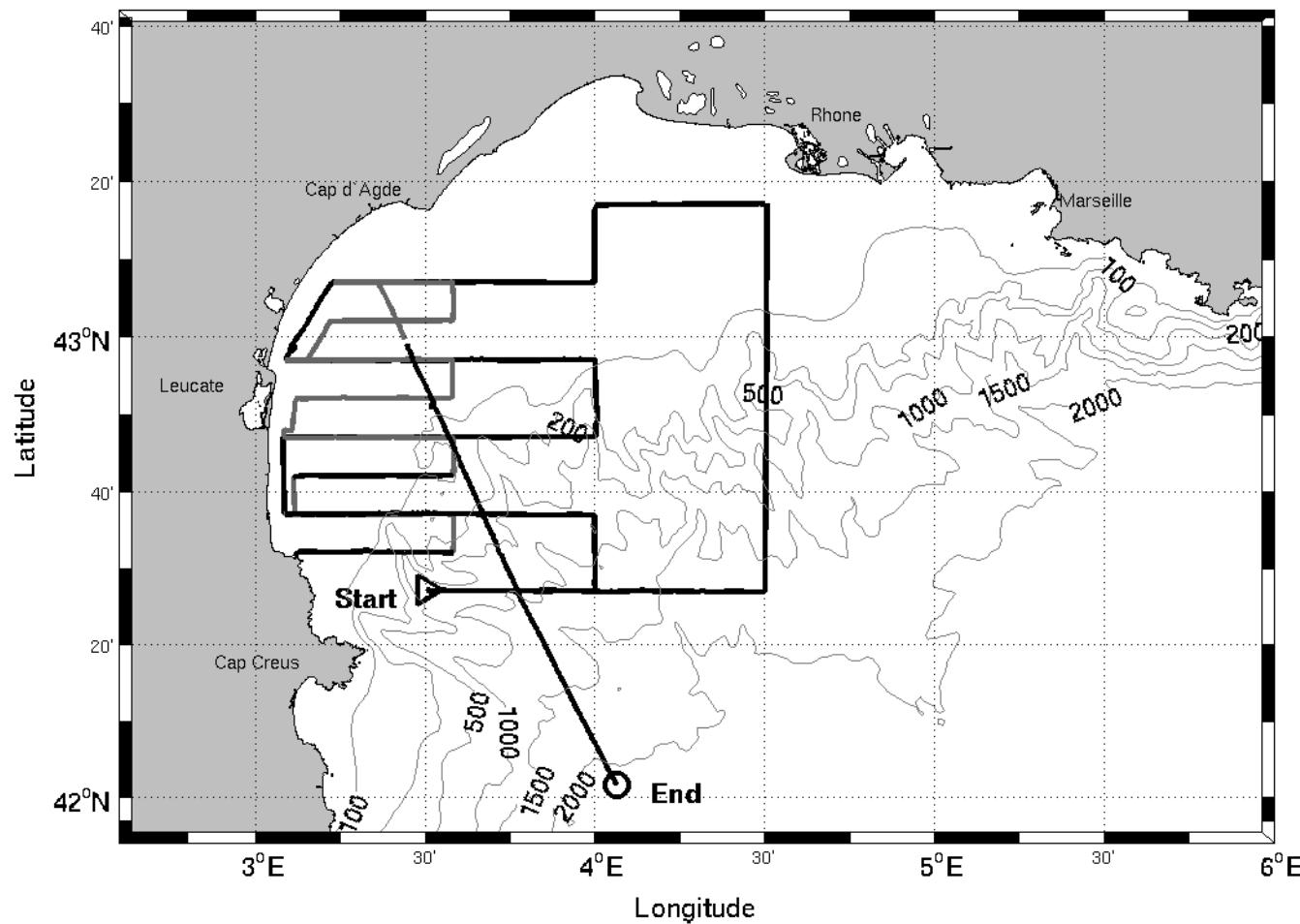
Latex09: 24 – 29 août 2009

Latex10: 1 – 24 septembre 2010



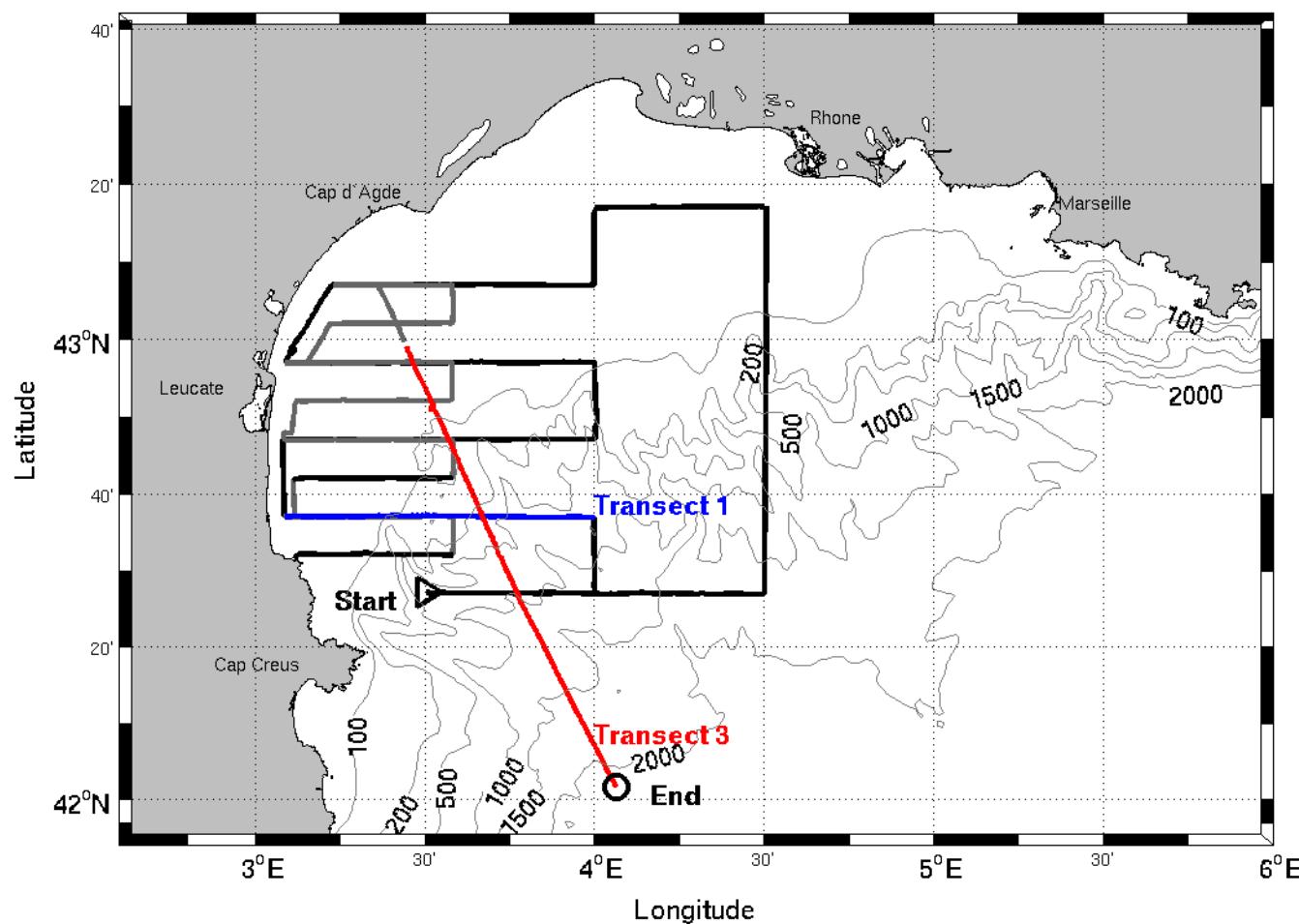
Latex08: 1 – 6 septembre, 2008

Trajet du Bateau

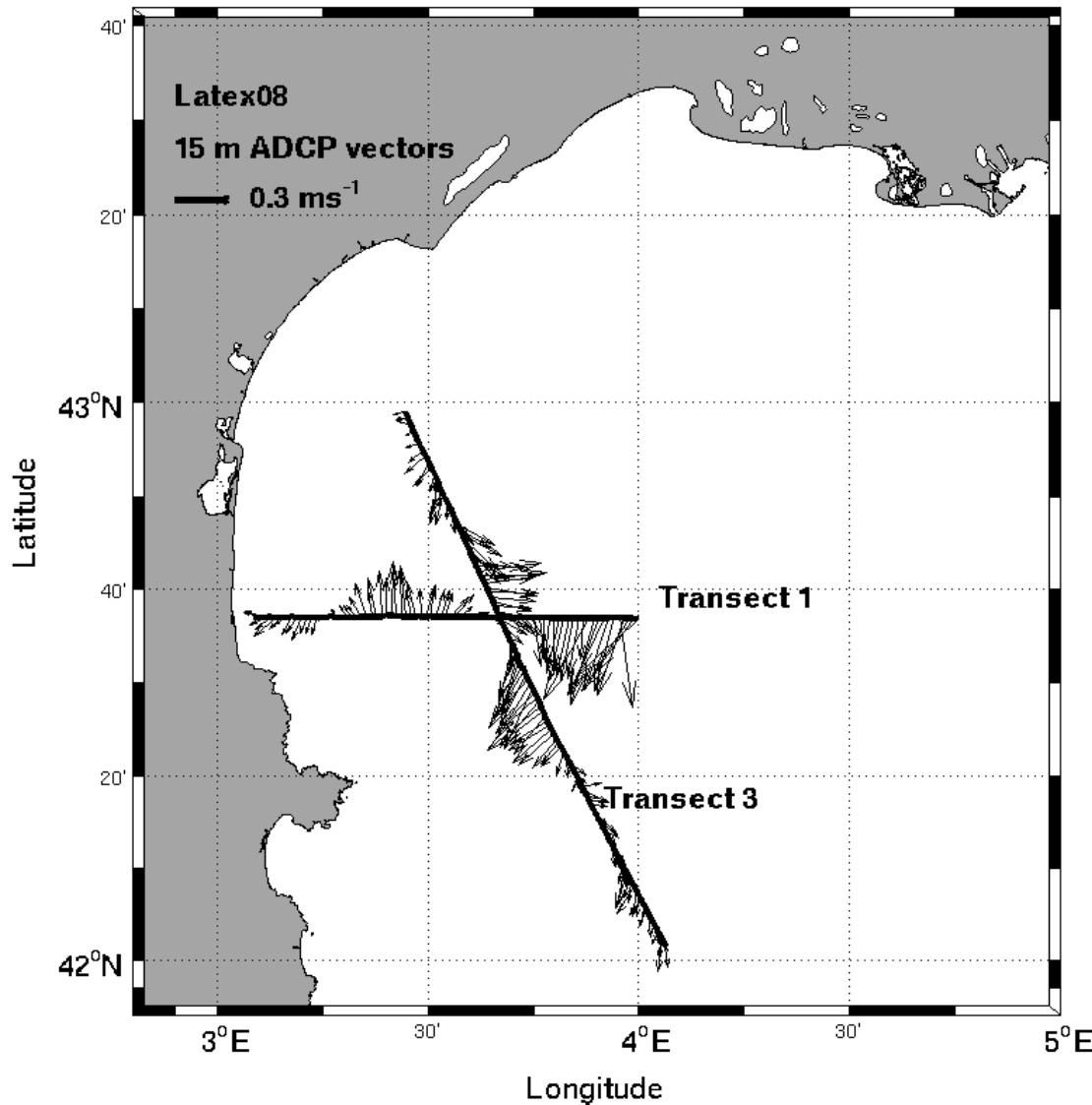


Latex08: 1 – 6 septembre, 2008

Trajet du Bateau

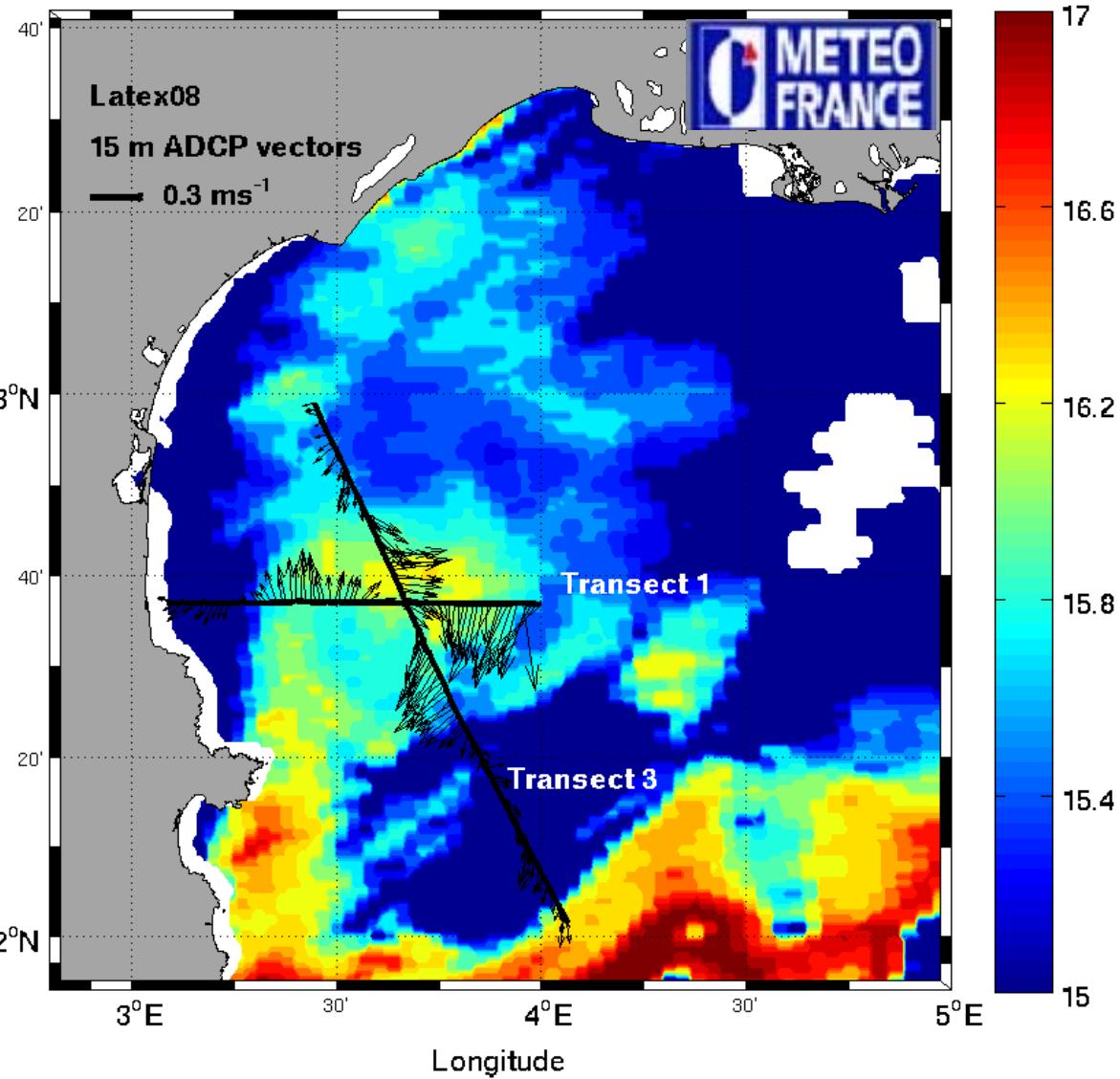


Latex08: 1 – 6 septembre, 2008



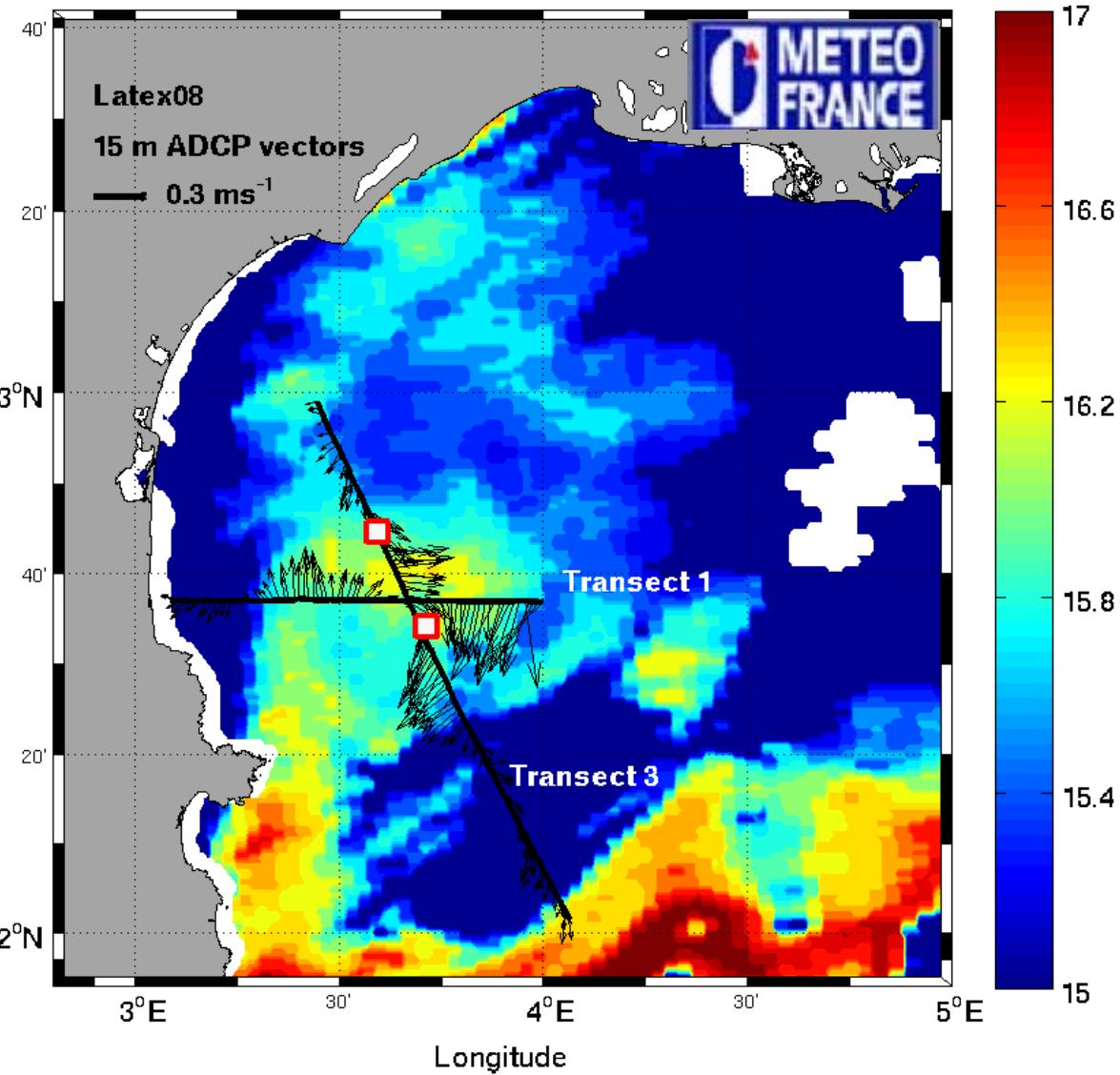
Vecteurs du courant
mesuré par ADCP à 15 m

Latex08: 1 – 6 septembre, 2008



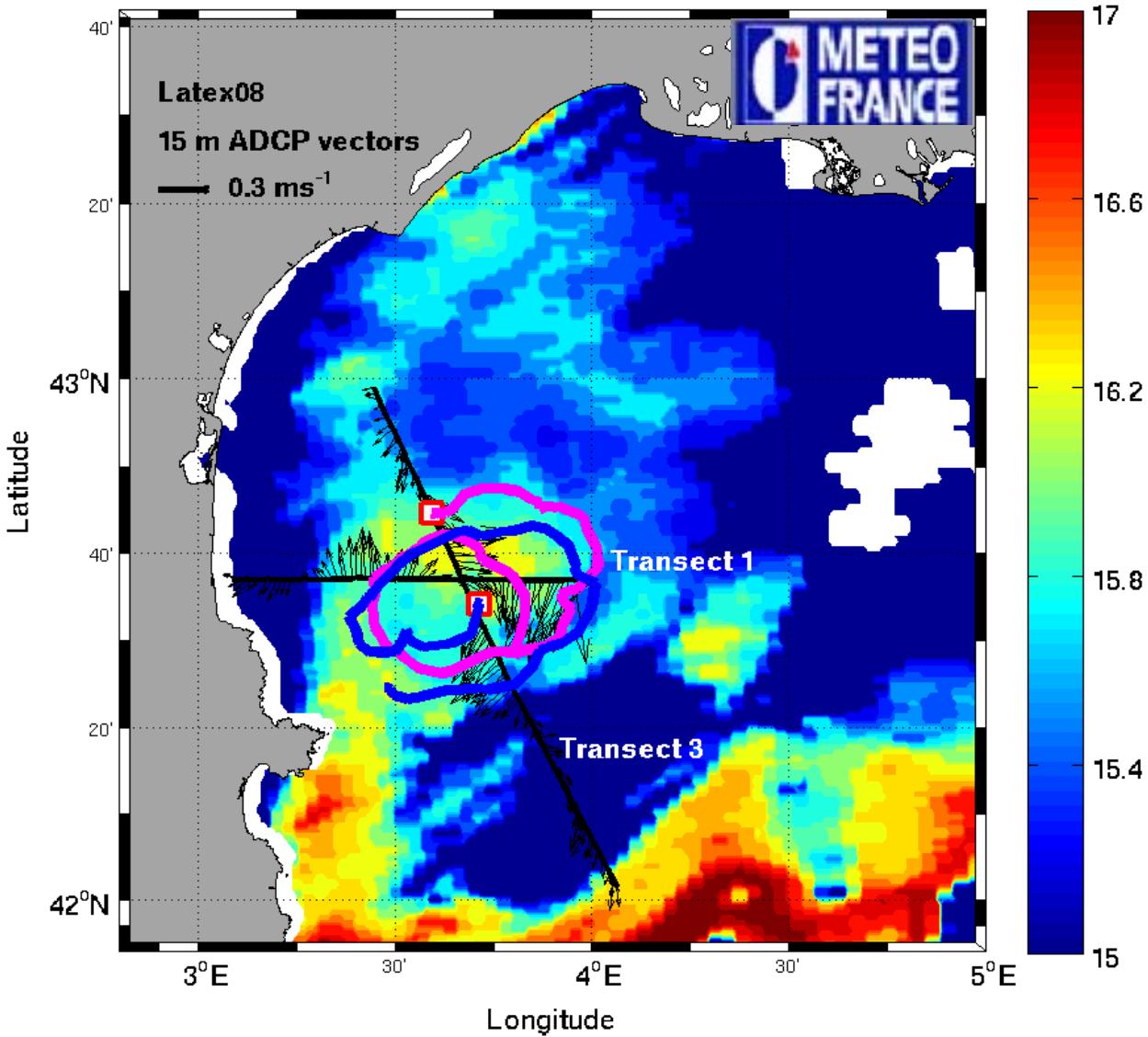
Vecteurs du courant
mesuré par ADCP à 15 m
+
SST

Latex08: 1 – 6 septembre, 2008



Vecteurs du courant
mesuré par ADCP à 15 m
+
SST
+
Lancement des bouées

Latex08: 1 – 6 septembre, 2008



Vecteurs du courant
mesuré par ADCP à 15 m
+
SST
+
Trajectoires des bouées

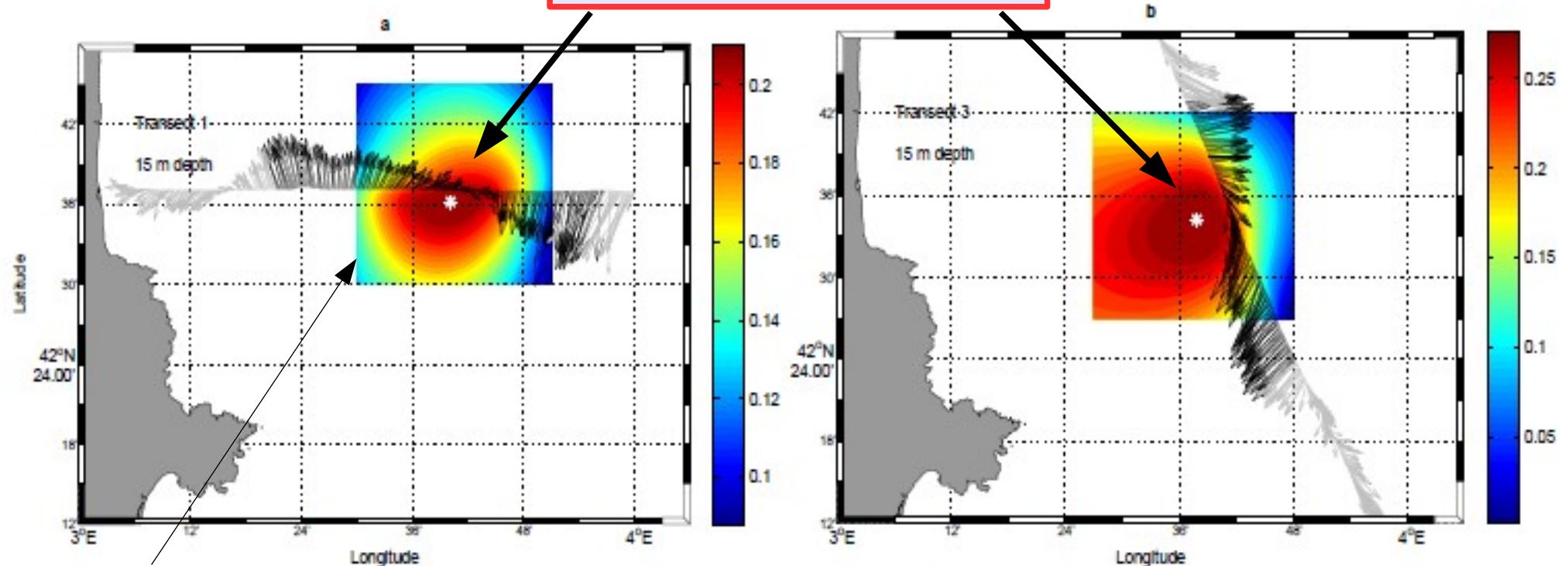
Vitesse $\sim 0.3 \text{ ms}^{-1}$

Détection du centre du tourbillon

Centre du tourbillon:

le point de grille où la somme des valeurs absolues de la composante tangentielle de vitesse est maximale. [Nencioli et al., 2008]

Centre du tourbillon



Carré: 30 x 30 pixels

Colorbars - vitesse tangentielle

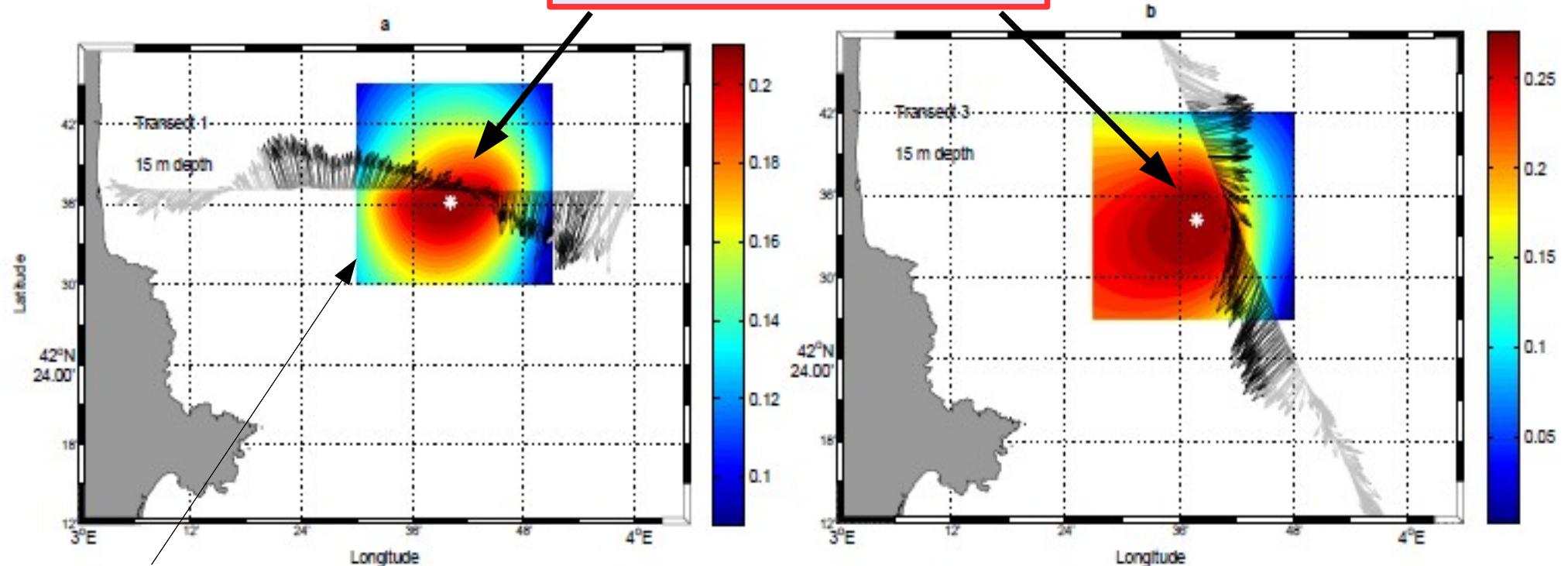
[Hu et al., 2010, JMS, accepté]

Détection du centre du tourbillon

Centre du tourbillon:

le point de grille où la somme des valeurs absolues de la composante tangentielle de vitesse est maximale. [Nencioli et al., 2008]

Centre du tourbillon

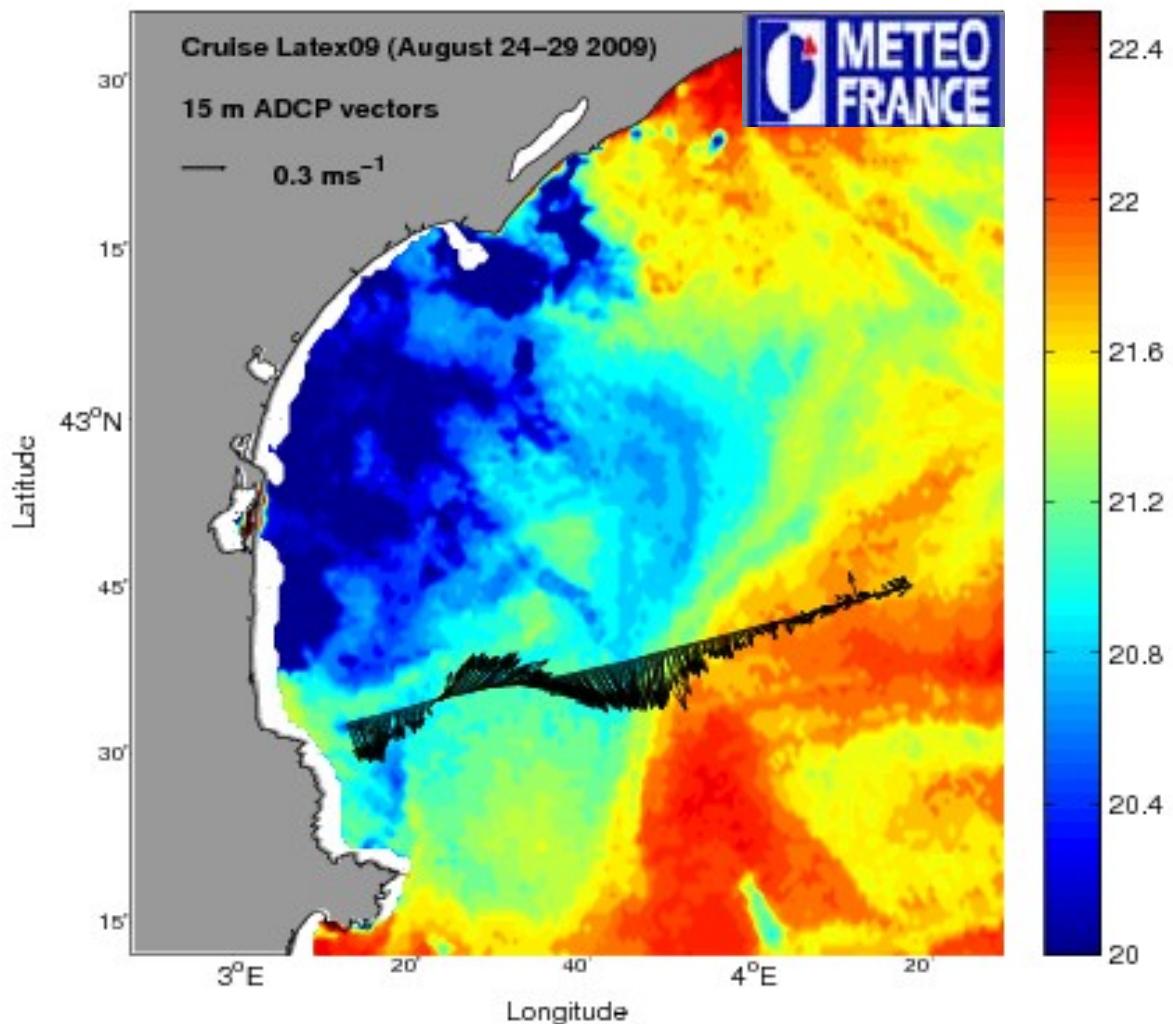


Carré: 30 x 30 pixels

Colorbars - vitesse tangentielle

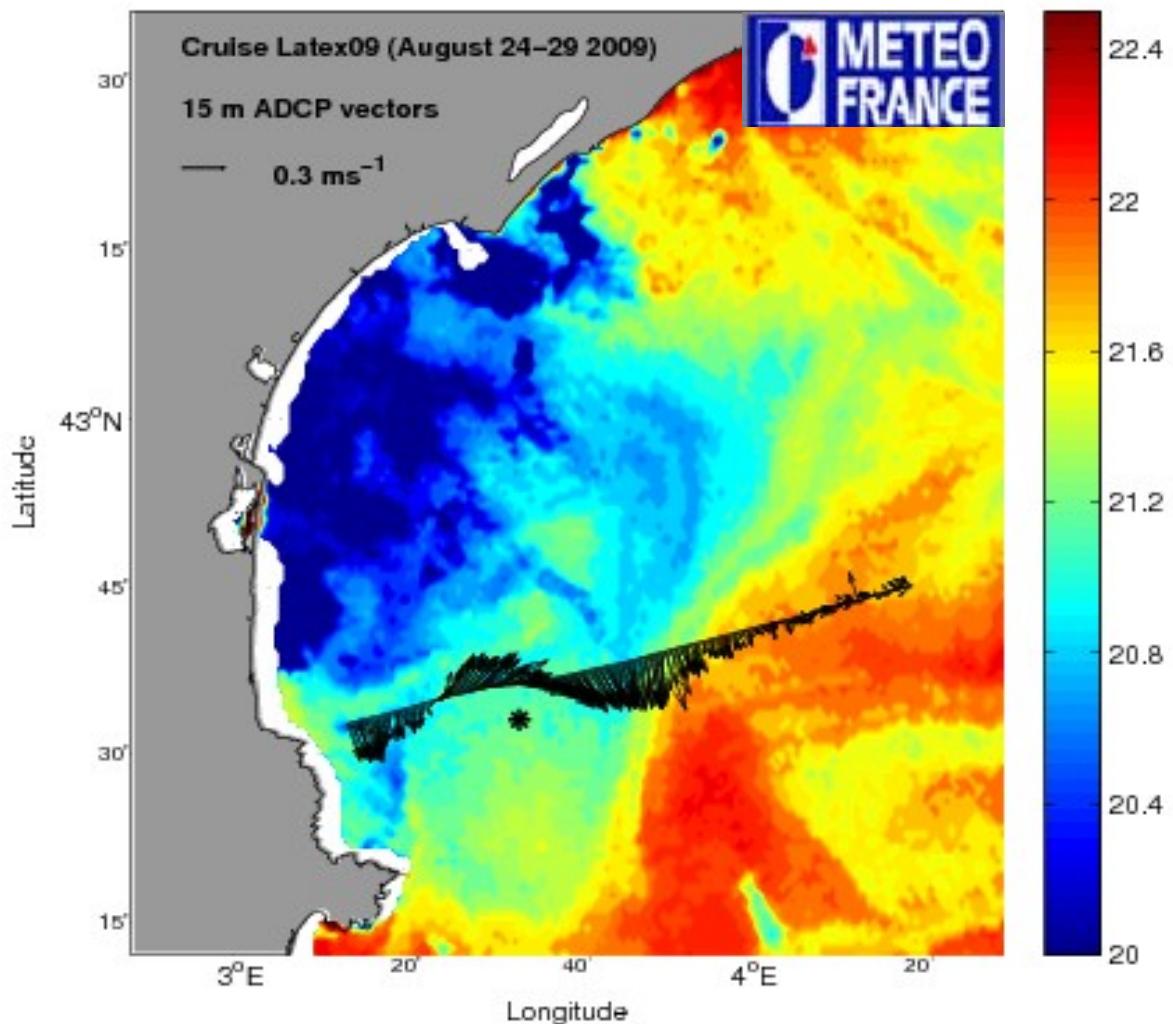
[Hu et al., 2010, JMS, accepté]

Latex09: 24 – 29 août, 2009



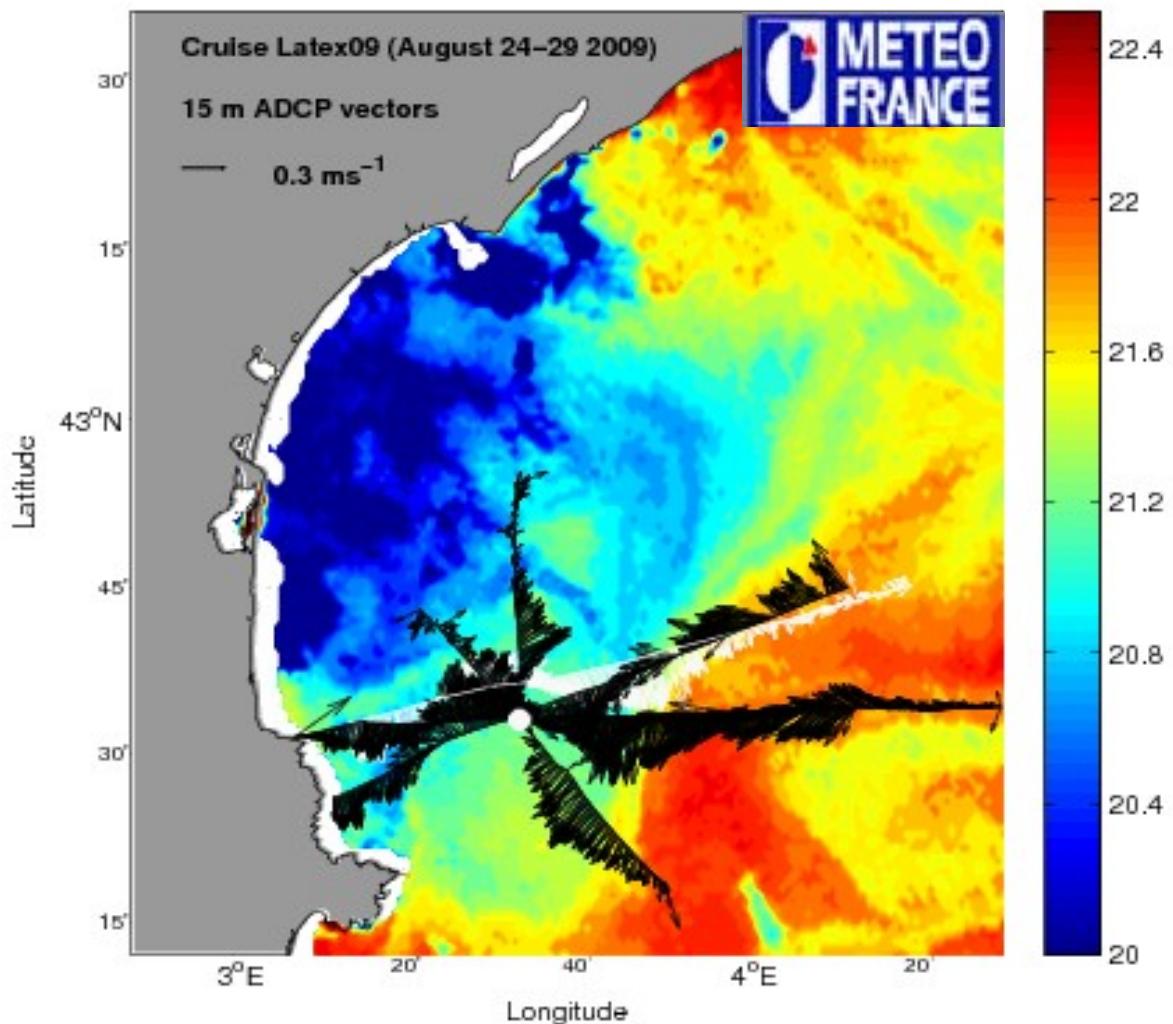
Vecteurs du courant
mesuré par ADCP à 15 m
+
SST

Latex09: 24 – 29 août, 2009



Vecteurs du courant
mesuré par ADCP à 15 m
+
SST

Latex09: 24 – 29 août, 2009



Vecteurs du courant
mesuré par ADCP à 15 m
+
SST

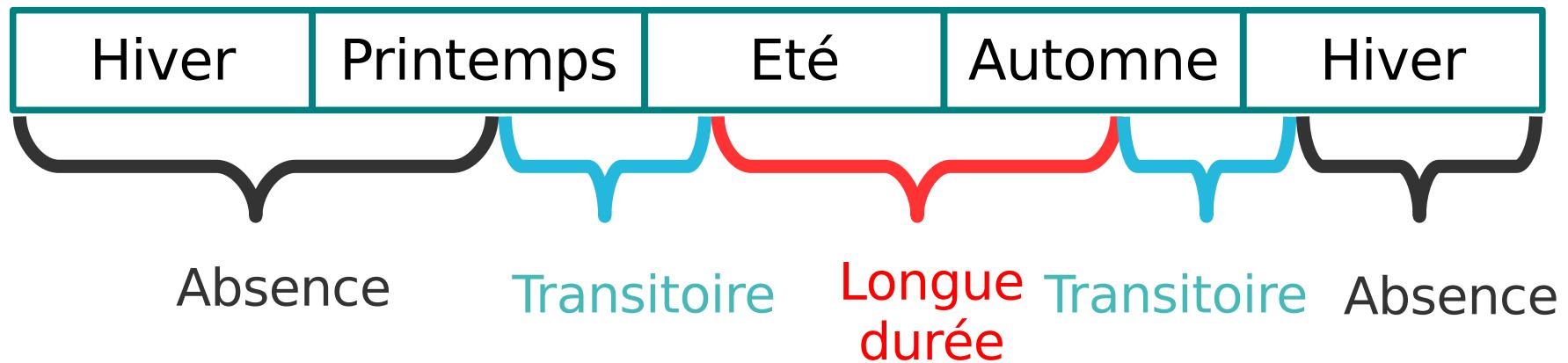
Rayon ~ 30 km

IV. Mécanisme de la génération des tourbillons

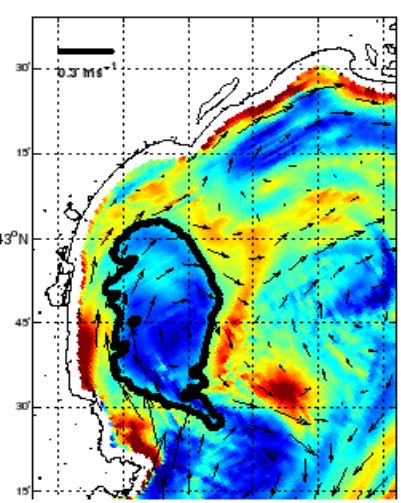
8 ans de simulations: 2001 – 2008

Tourbillon 'longue durée' : durée de vie ≥ 15 jours
Tourbillon 'transitoire' : durée de vie < 15 jours

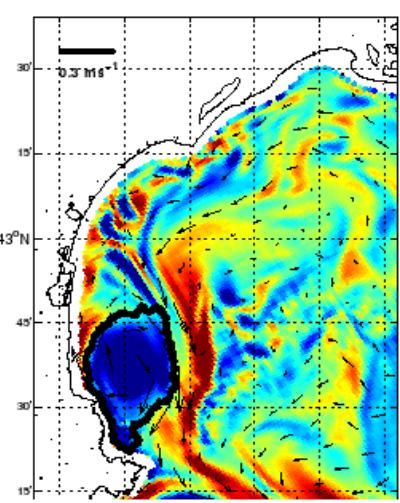
Présence des tourbillons



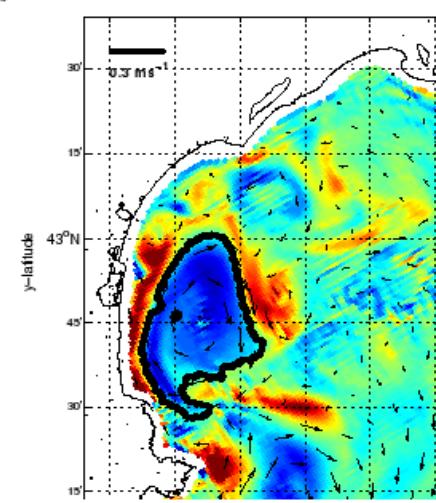
A1_2001
2001, 08/07



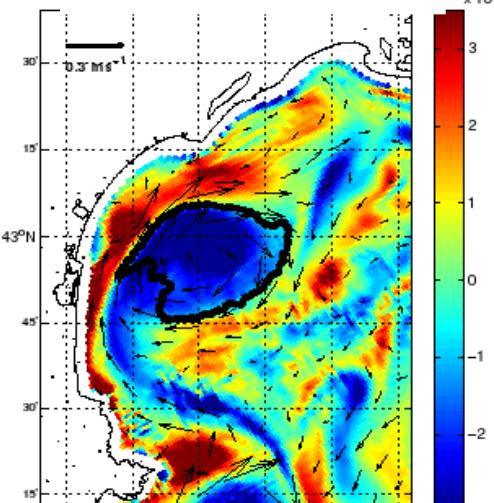
A1_2002
2002, 08/04



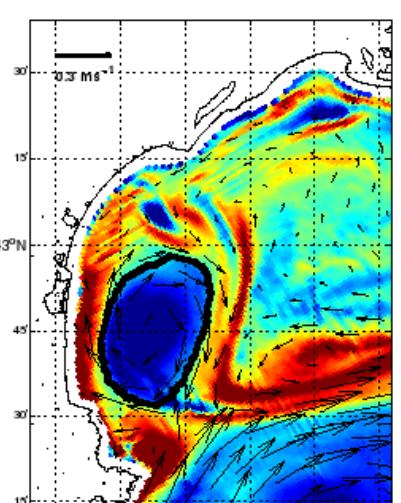
A1_2003
2003, 08/09



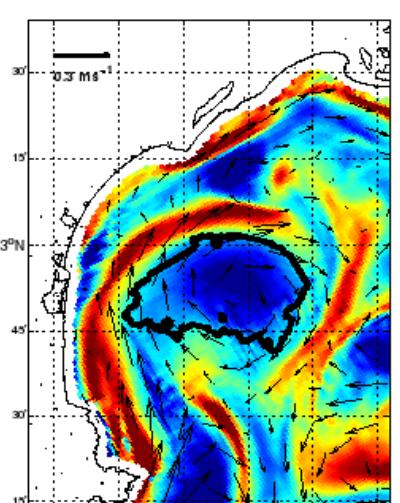
A1_2003
2003, 09/24



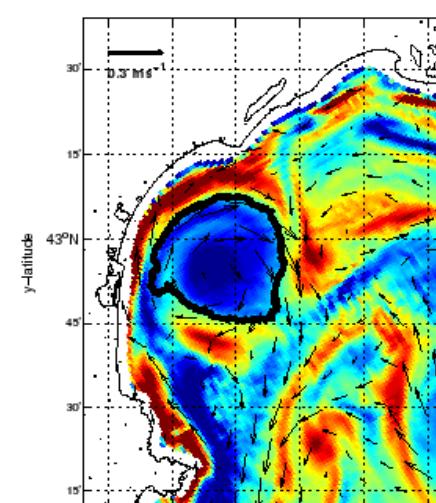
A1_2005
2005, 08/19



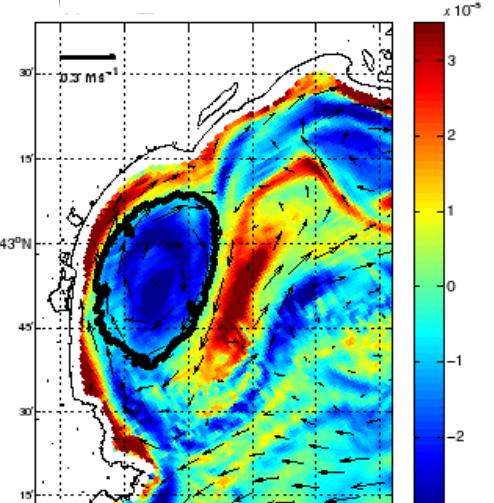
A2_2005
2005, 10/02



A1_2006
2006, 08/18



A1_2008
2008, 07/22



Présence des tourbillons de longue-durée

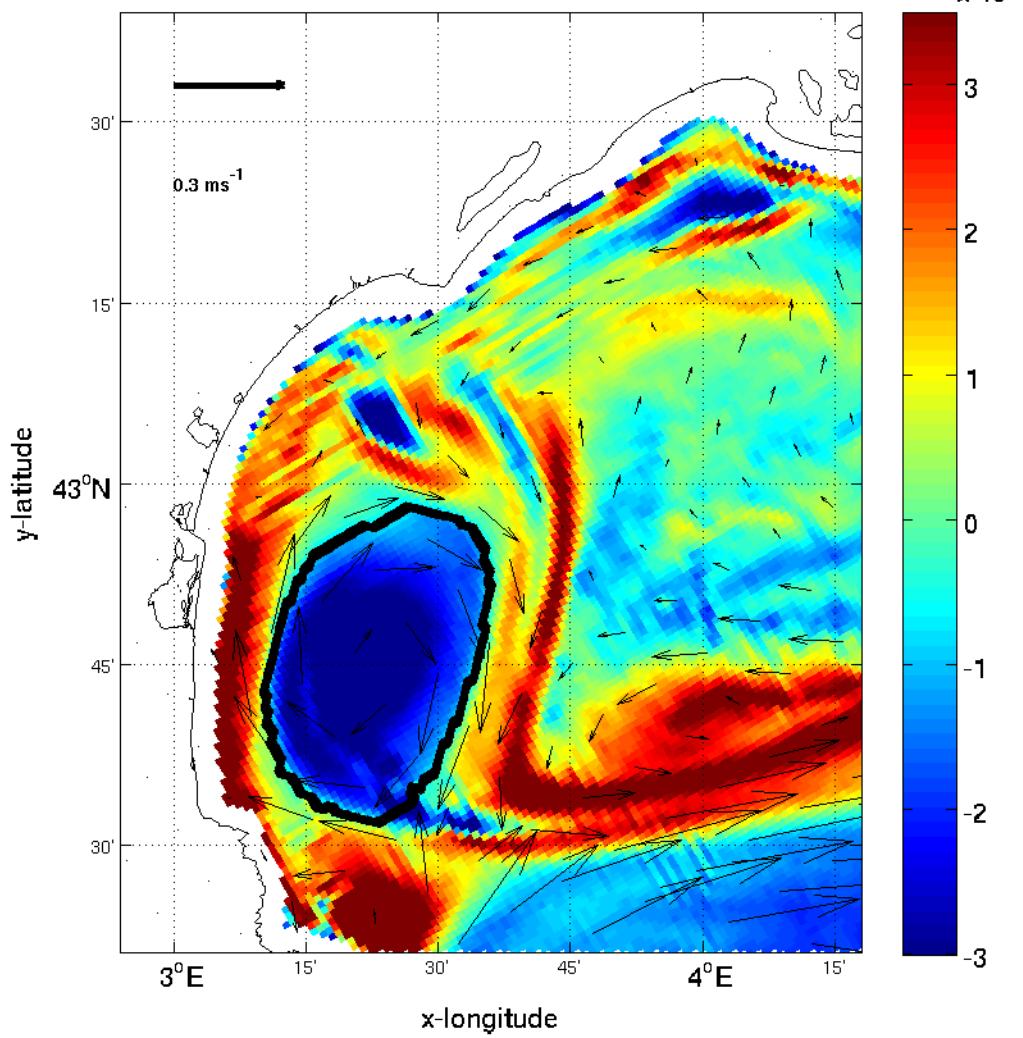
Année	Juillet	Août	Septembre	Octobre
2001		23/07	A1_2001 (76 j)	06/10
2002	07/07	13/08	A1_2002 (38 j)	
2003	07/07	18/08	A1_2003 (43 j)	12/09
			A2_2003 (26 j)	07/10
2004				
2005	10/07	04/09	A1_2005 (57j)	20/09
			A2_2005 (15 j)	04/10
2006		04/08	A1_2006 (22 j)	31/08
2007				
2008	15/07		A1_2008 (67 j)	26/09

Présence des tourbillons de longue-durée

Année	Juillet	Août	Septembre	Octobre
2001		23/07	A1_2001 (76 j)	06/10
2002	07/07	13/08	A1_2002 (38 j)	
2003	07/07	18/08	A1_2003 (43 j)	12/09
2004			A2_2003 (26 j)	07/10
2004			Tourbillons transitoires	
2005	10/07	04/09	A1_2005 (57j)	20/09
				04/10
2006		04/08	A1_2006 (22 j)	31/08
2007			Circulation anticyclonique	
2008	15/07		A1_2008 (67 j)	26/09

Vorticité relative
+
Champs du courant

A1_2005 2005/08/19

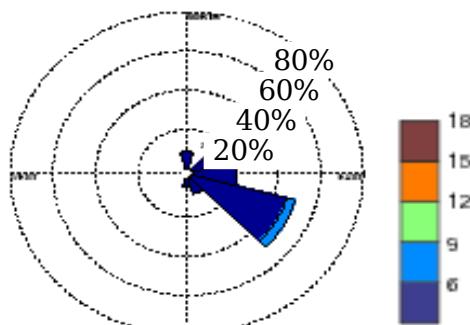


Ex: tourbillon longue-durée
A1_2005

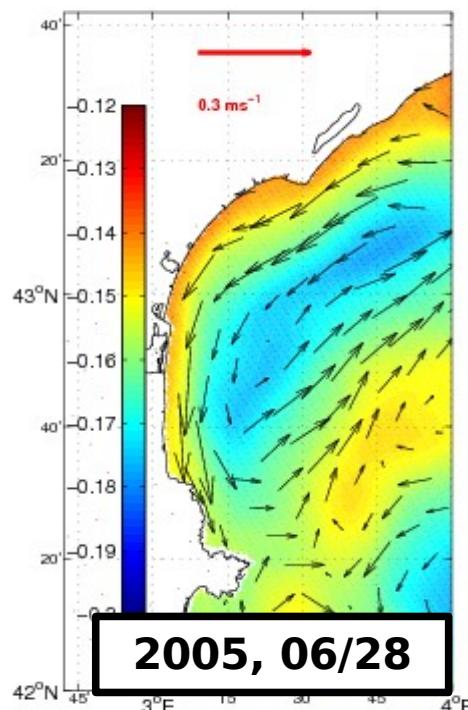
10 juillet → 4 septembre
57 jours

Influence du vent sur le tourbillon (A1_2005: 10/07 → 04/09, 2005)

Rose du Vent:



2005, 06/26→28

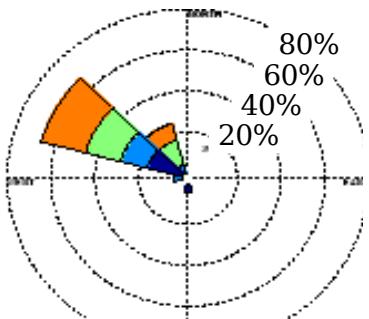


Surélévation
+
Courant de surface

[Millot, 1979, 1982]

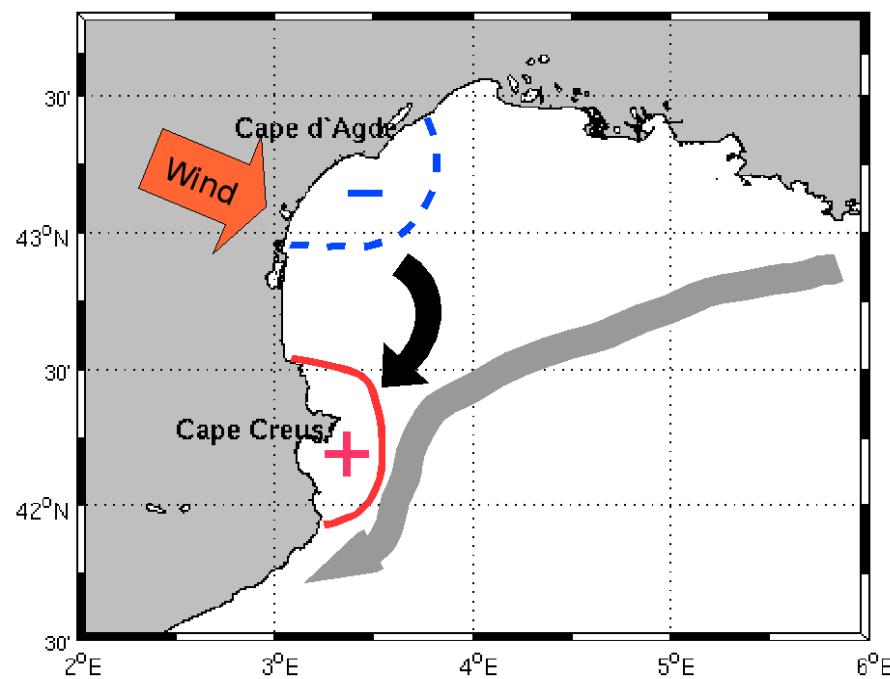
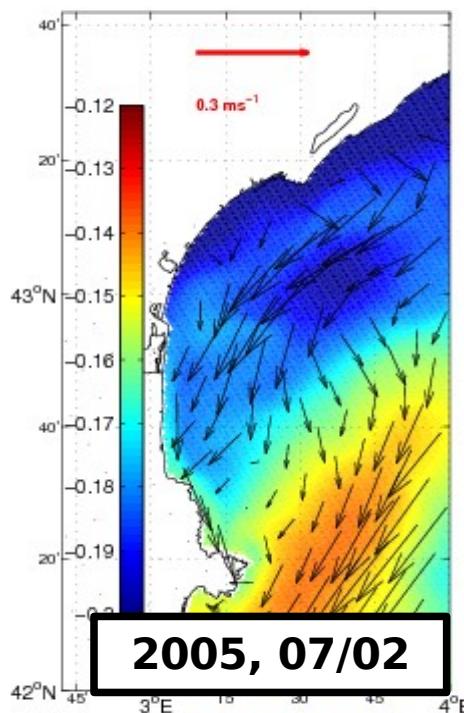
2005, 06/28

Influence du vent sur le tourbillon (A1_2005: 10/07 → 04/09, 2005)



2005, 06/31→07/02

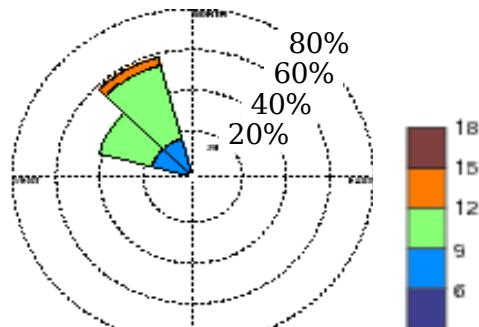
Tramontane: Vent fort du Nord-Ouest
Vitesse $\geq 8 \text{ ms}^{-1}$ & [270°:360°]



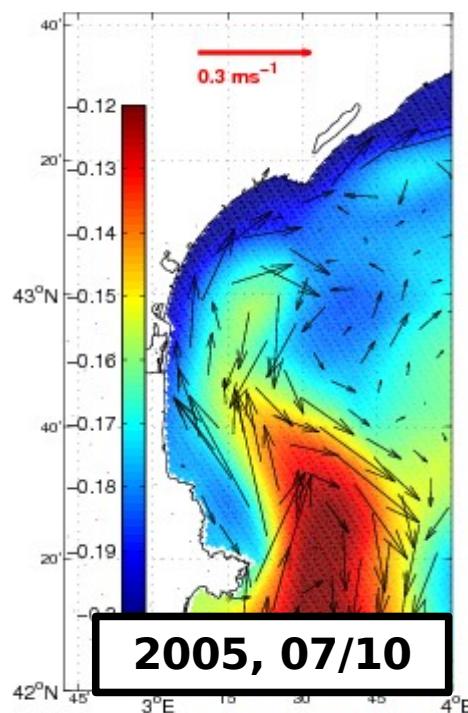
- Wind
- Surface current
- (-)(+) Sea surface level

[Hu et al., 2011, JGR, Soumis]

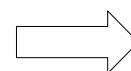
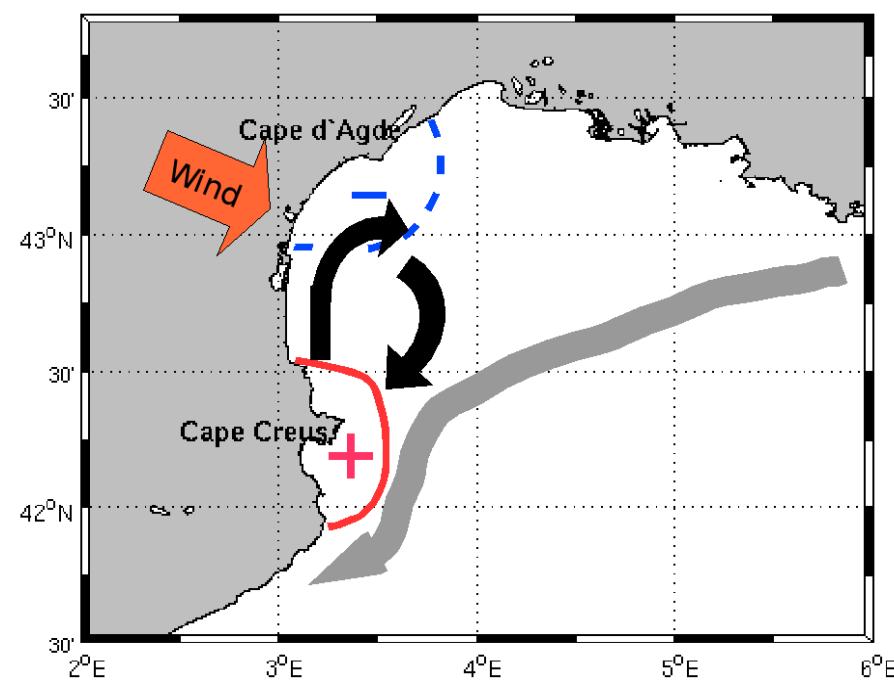
Influence du vent sur le tourbillon (A1_2005: 10/07 → 04/09, 2005)



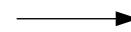
2005, 07/8→10



2005, 07/10



Wind



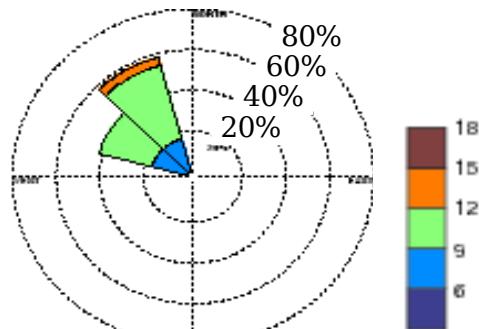
Surface current



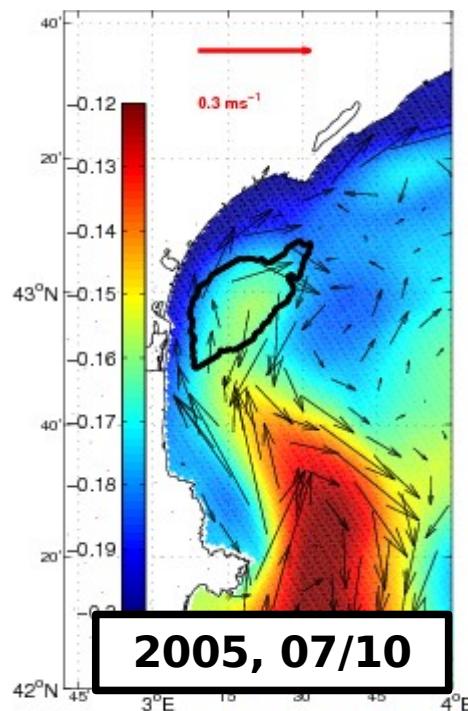
Sea surface level

[Hu et al., 2011, JGR, Soumis]

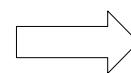
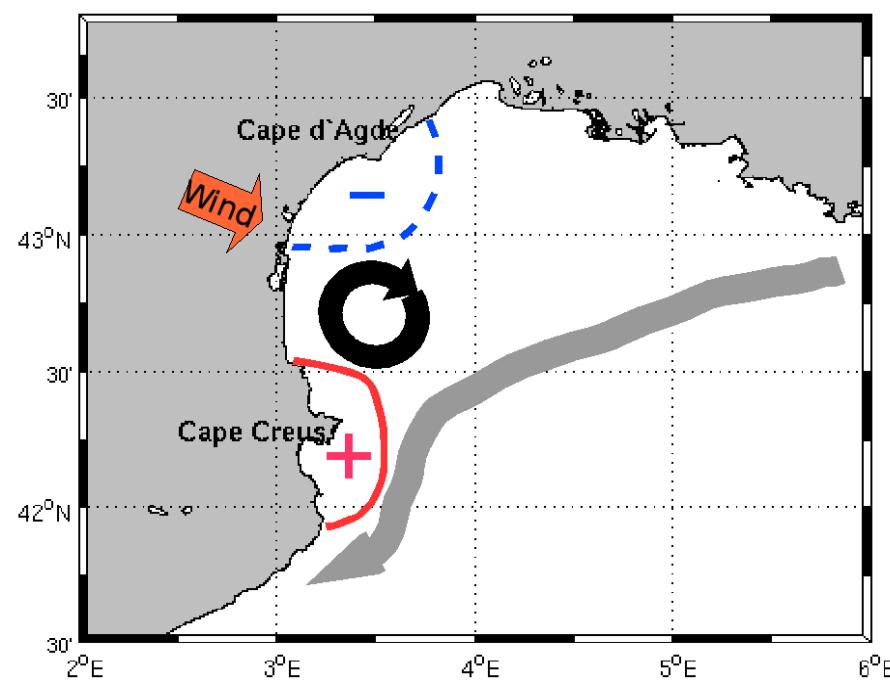
Influence du vent sur le tourbillon (A1_2005: 10/07 → 04/09, 2005)



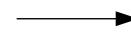
2005, 07/8→10



2005, 07/10



Wind



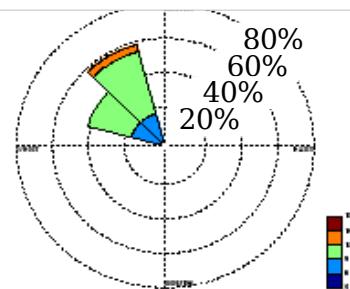
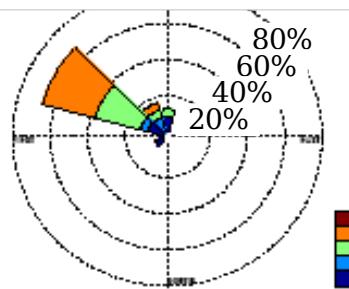
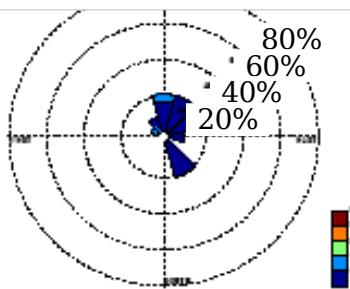
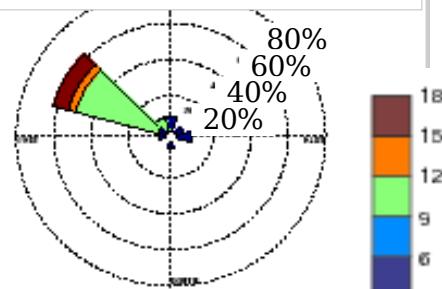
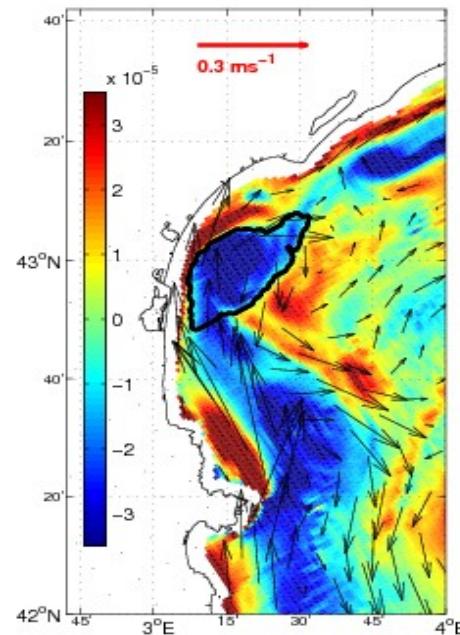
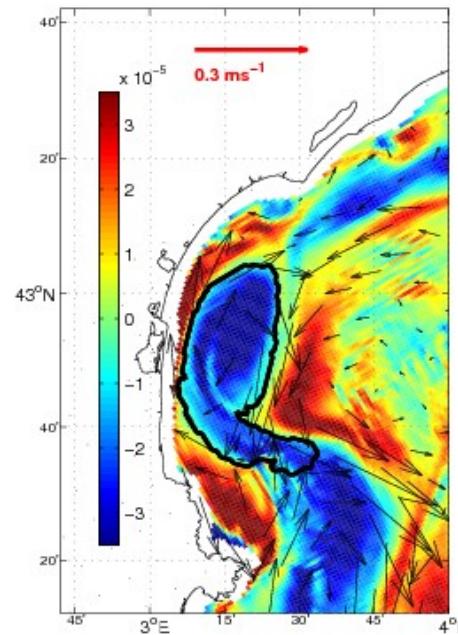
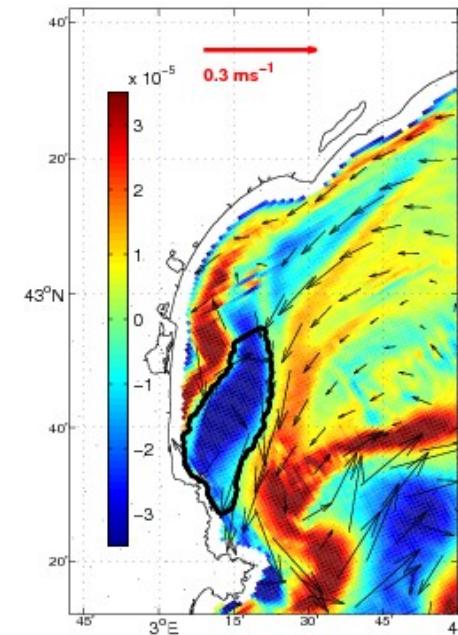
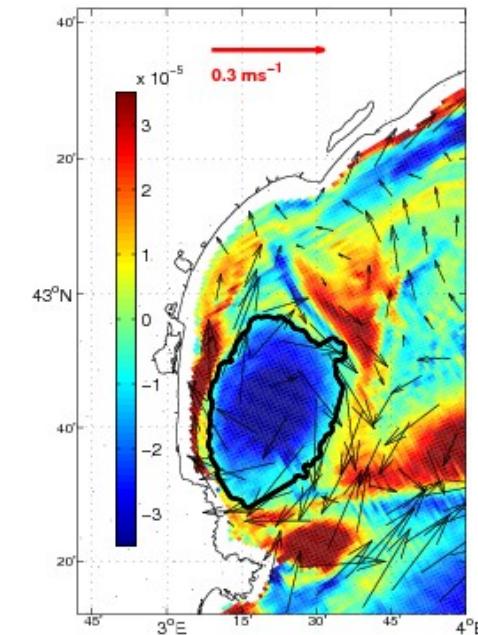
Surface current



Sea surface level

[Hu et al., 2011, JGR, Soumis]

Influence du vent sur le tourbillon (A1_2005: 10/07 → 04/09, 2005)

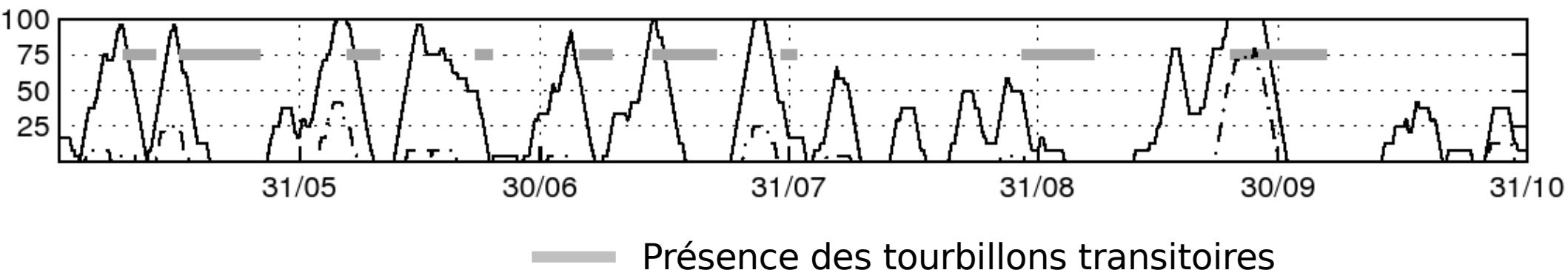
2005, 07/8→10**2005, 07/11→13****2005, 07/16→18****2005, 08/19→21****2005 07 10****2005 07 13****2005 07 18****2005 08 21**

[Hu et al., 2011, JGR, Soumis]

Cas spécial 1: 2004 – Tourbillons transitoires

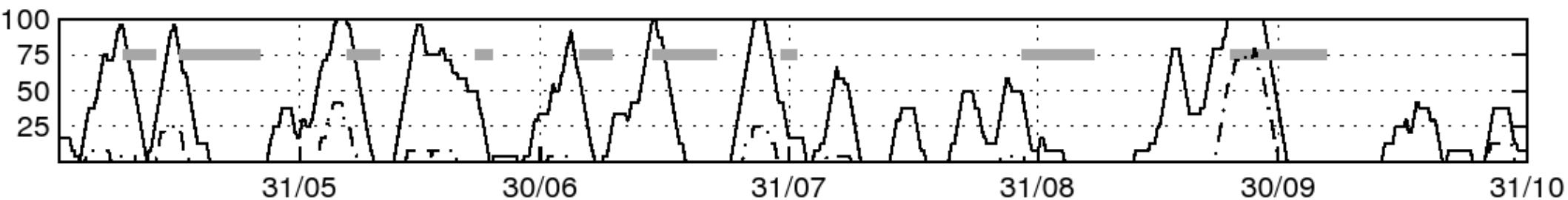
Cas spécial I: 2004 – Tourbillons transitoires

Pourcentage de la Tramontane en **2004**

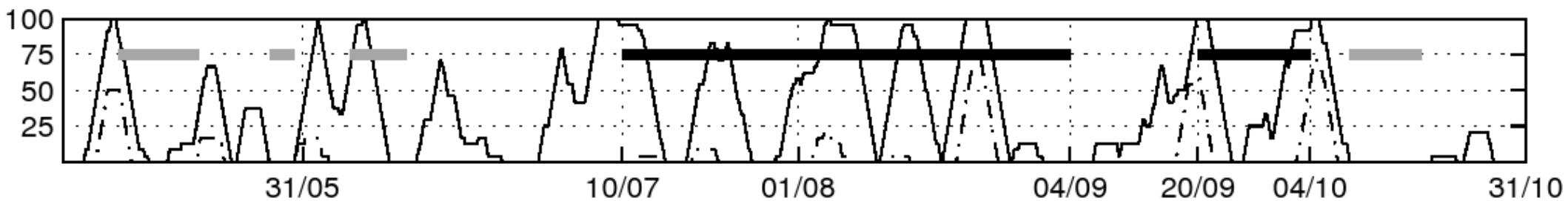


Cas spécial I: 2004 – Tourbillons transitoires

Pourcentage de la Tramontane en **2004**



Pourcentage de la Tramontane en **2005**

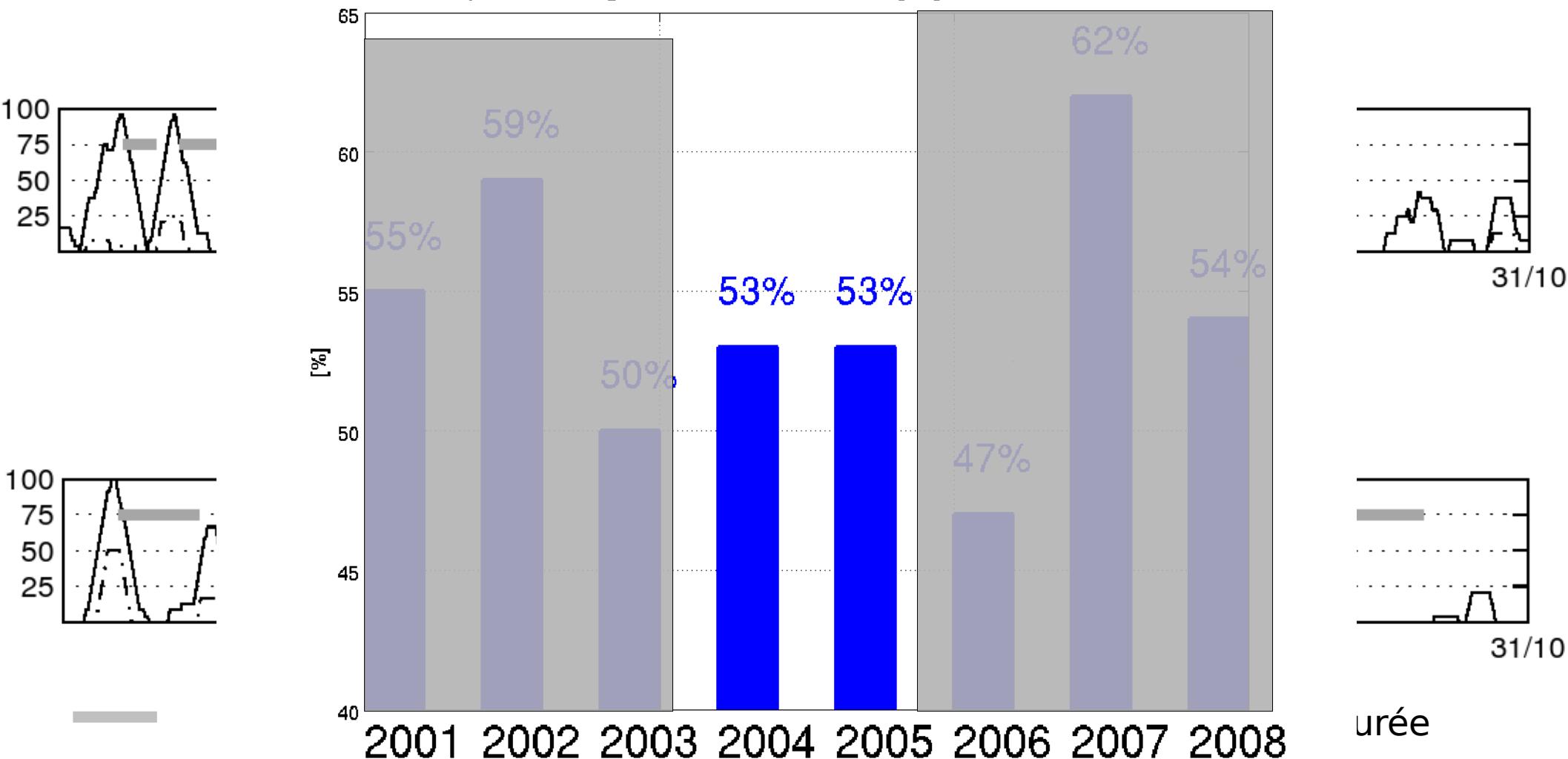


Tourbillons transitoires



Tourbillons de longue-durée

pourcentage de la Tramontane [%]: Mai - Octobre

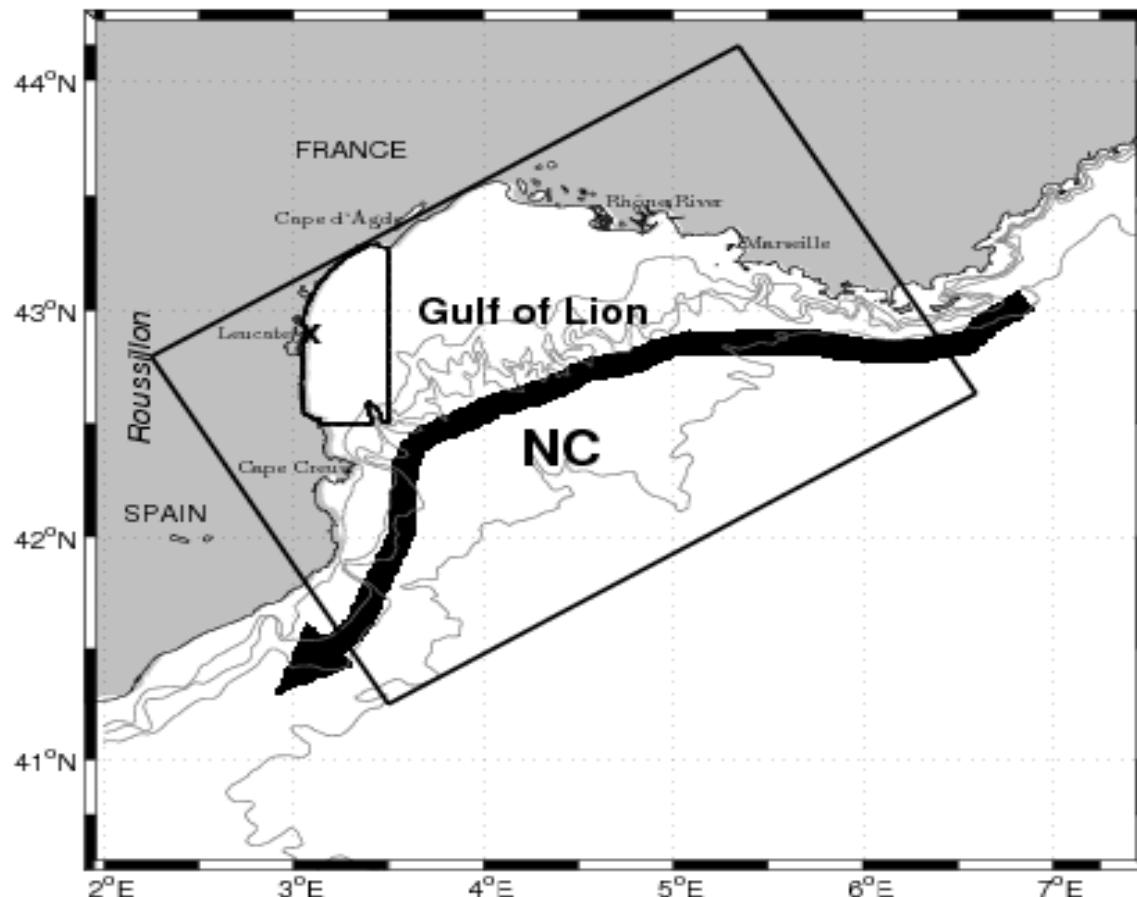


Influence de la stratification sur le tourbillon

Anomalie d'énergie potentielle

$$\phi = \frac{1}{D} \int_{-H}^{\eta} g z (\bar{\rho} - \rho) dz$$

[Simpson, 1981; Simpson et Bowers, 1981; Schaeffer, 2010]



Φ élevé



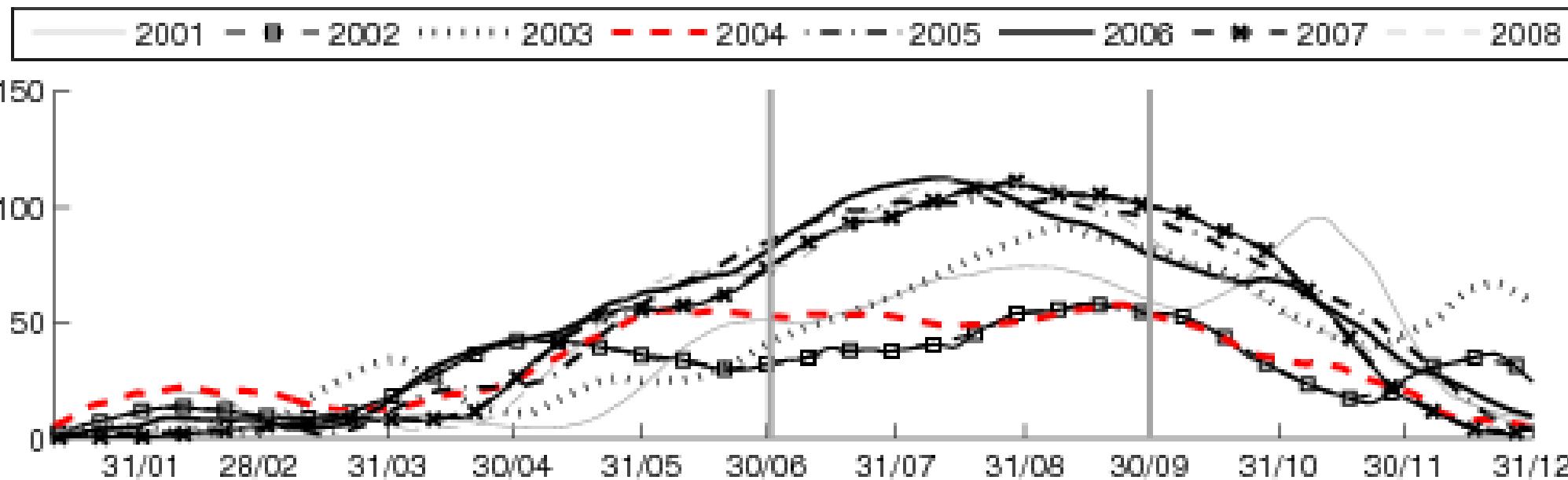
Stratification plus forte

Influence de la stratification sur le tourbillon

Anomalie d'énergie potentielle

$$\phi = \frac{1}{D} \int_{-H}^{\eta} g z (\bar{\rho} - \rho) dz$$

[Simpson, 1981; Simpson et Bowers, 1981; Schaeffer, 2010]

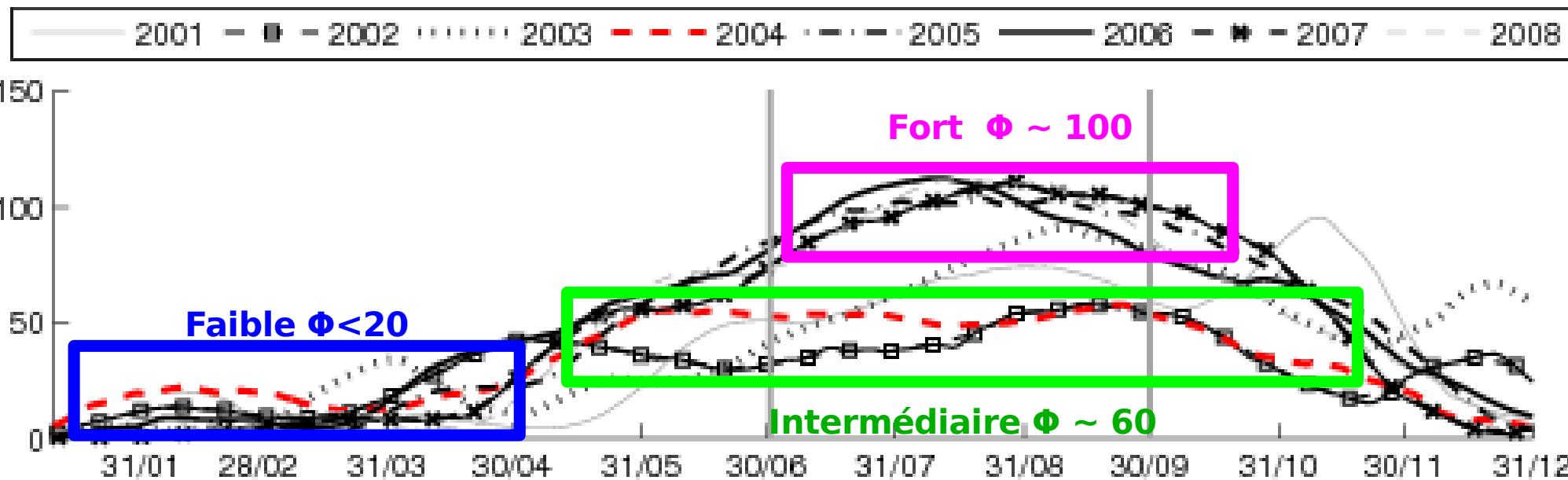


Influence de la stratification sur le tourbillon

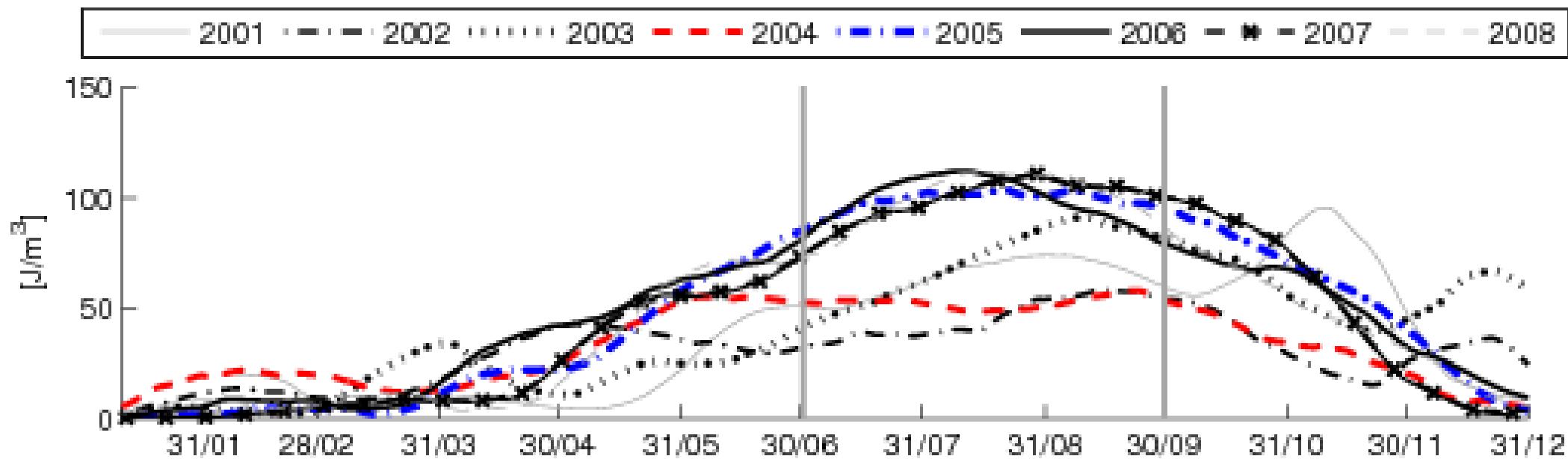
Anomalie d'énergie potentielle

$$\phi = \frac{1}{D} \int_{-H}^{\eta} g z (\bar{\rho} - \rho) dz$$

[Simpson, 1981; Simpson et Bowers, 1981; Schaeffer, 2010]



Influence de la stratification sur le tourbillon



2005

Stratification forte

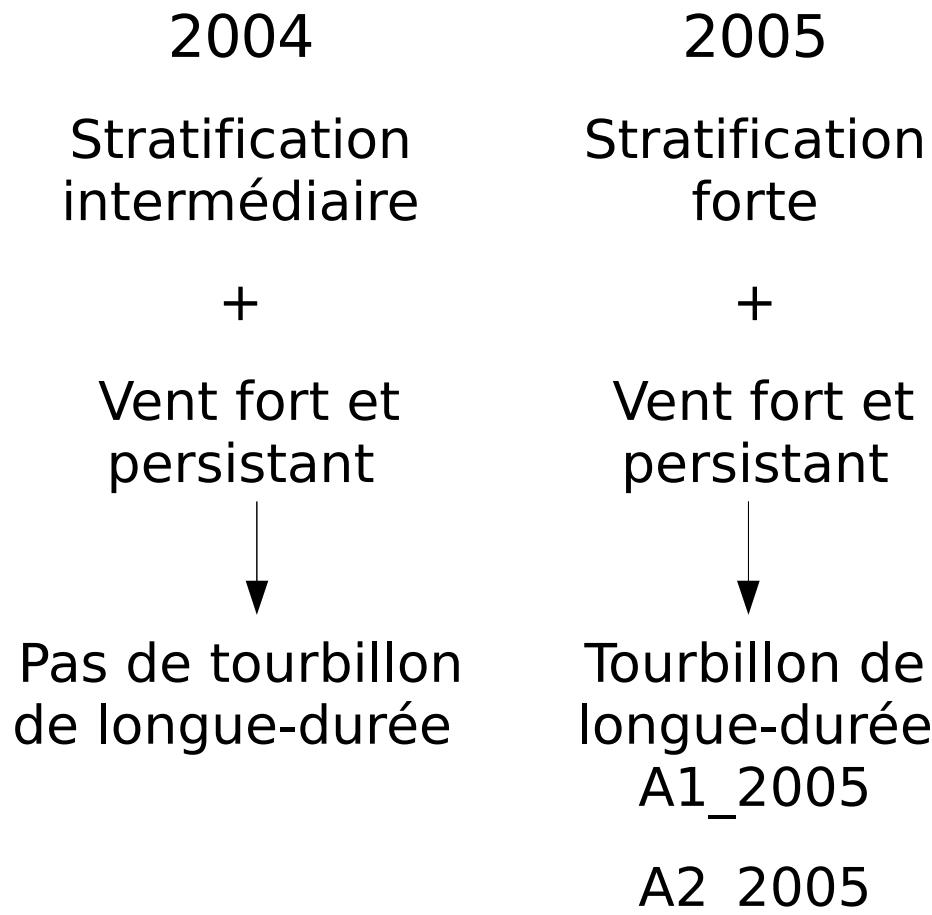
↓
Tourbillon de longue-durée
A1_2005 & A2_2005

2004

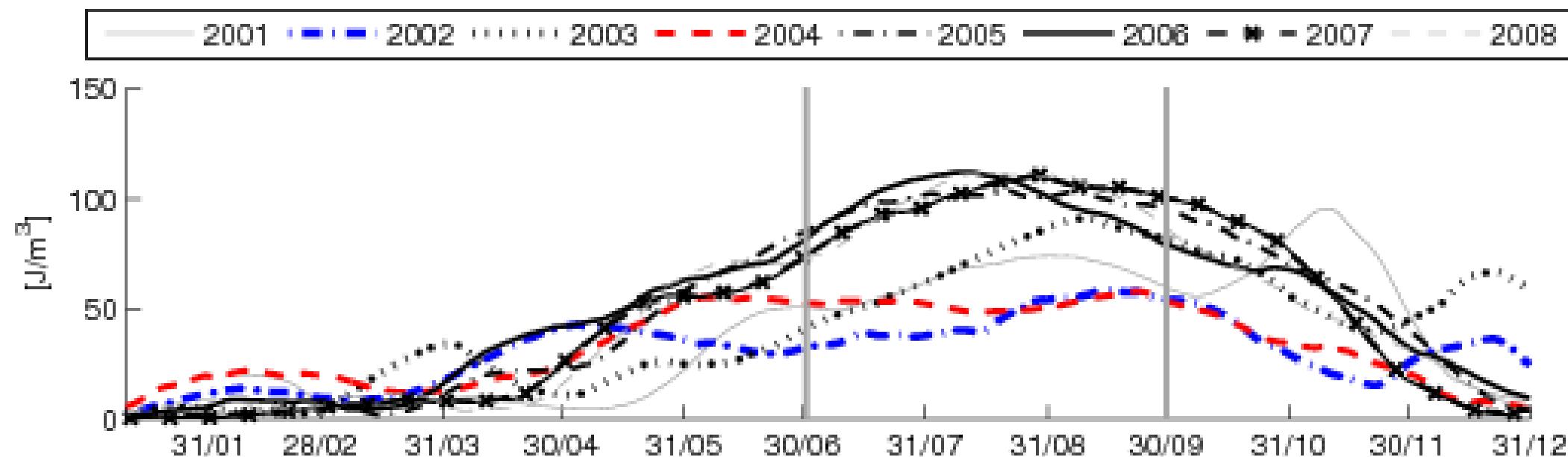
Stratification intermédiaire

↓
Pas de tourbillon de longue-durée

Influence de la stratification sur le tourbillon



Influence de la stratification sur le tourbillon



2002

Stratification intermédiaire



Tourbillon de longue-durée
A1_2002

2004

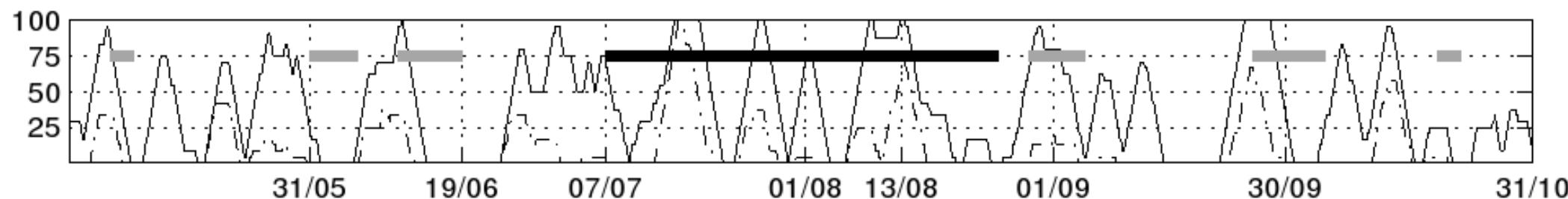
Stratification intermédiaire



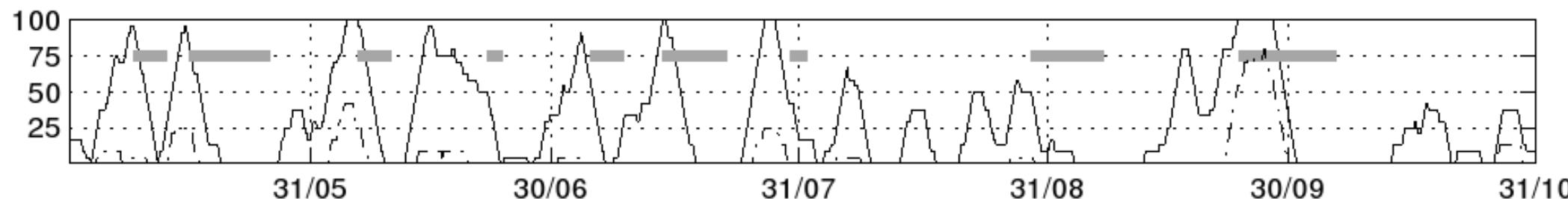
Pas de tourbillon de longue-durée

Influence du vent et de la stratification sur le tourbillon

Pourcentage de la Tramontane en **2002**



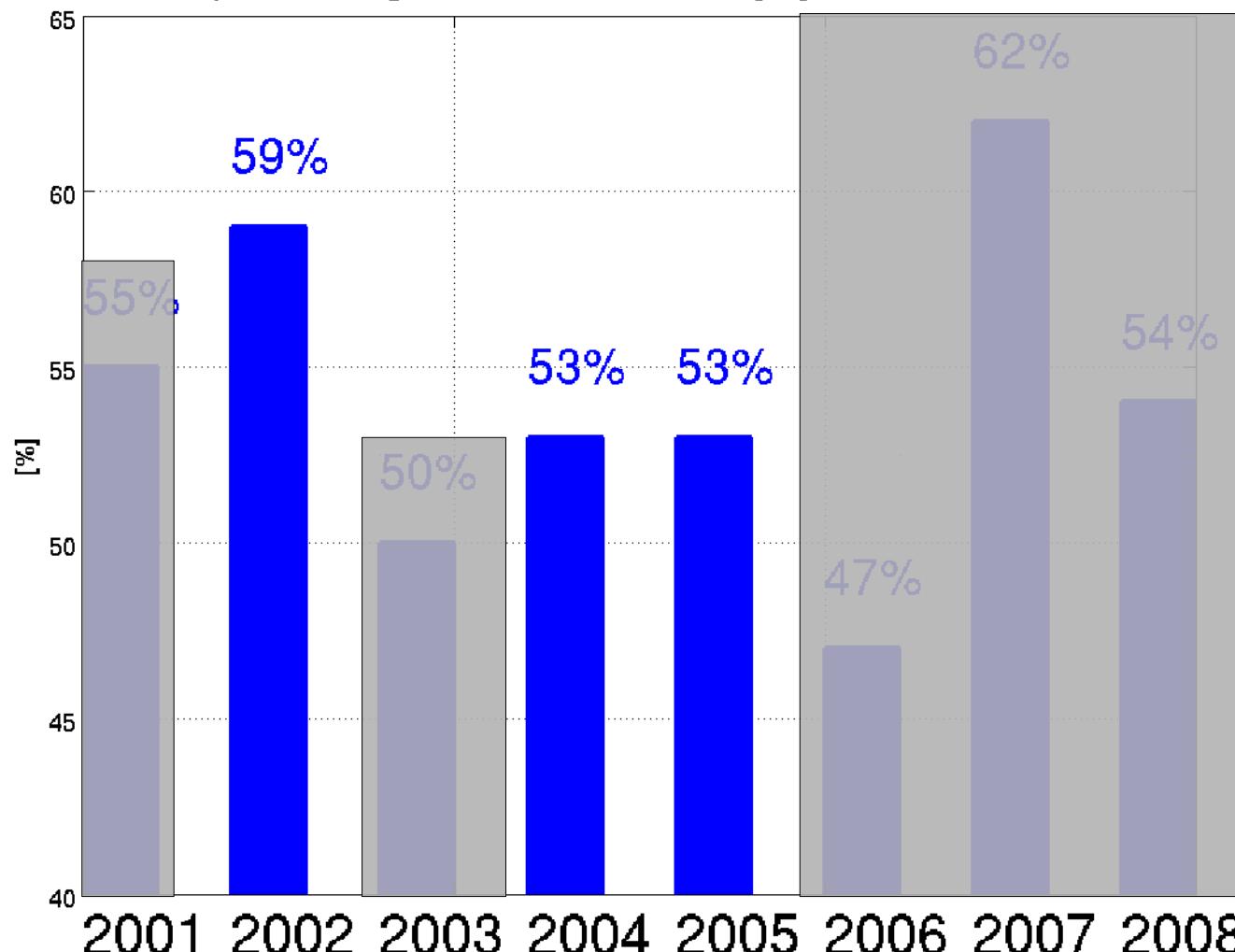
Pourcentage de la Tramontane en **2004**



— Tourbillons transitoires

— Tourbillons de longue-durée

pourcentage de la Tramontane [%]: Mai - Octobre



durée

2002: Vent très fort et persistant

Influence du vent et de la stratification sur le tourbillon

2002

Stratification
intermédiaire

+

Vent très fort
et persistant



Tourbillon de
longue-durée
A1_2002

2004

Stratification
intermédiaire

+

Vent fort et
persistant



Pas de tourbillon
de longue-durée

2005

Stratification
forte

+

Vent fort et
persistant

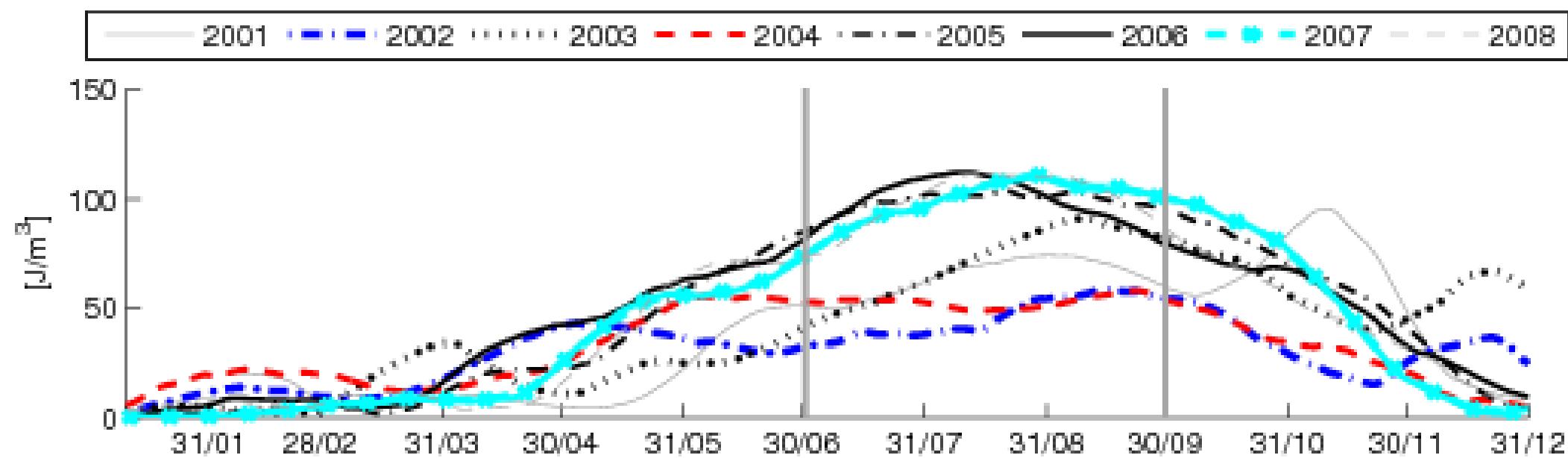


Tourbillon de
longue-durée
A1_2005

A2_2005

Influence du vent et de la stratification sur le tourbillon

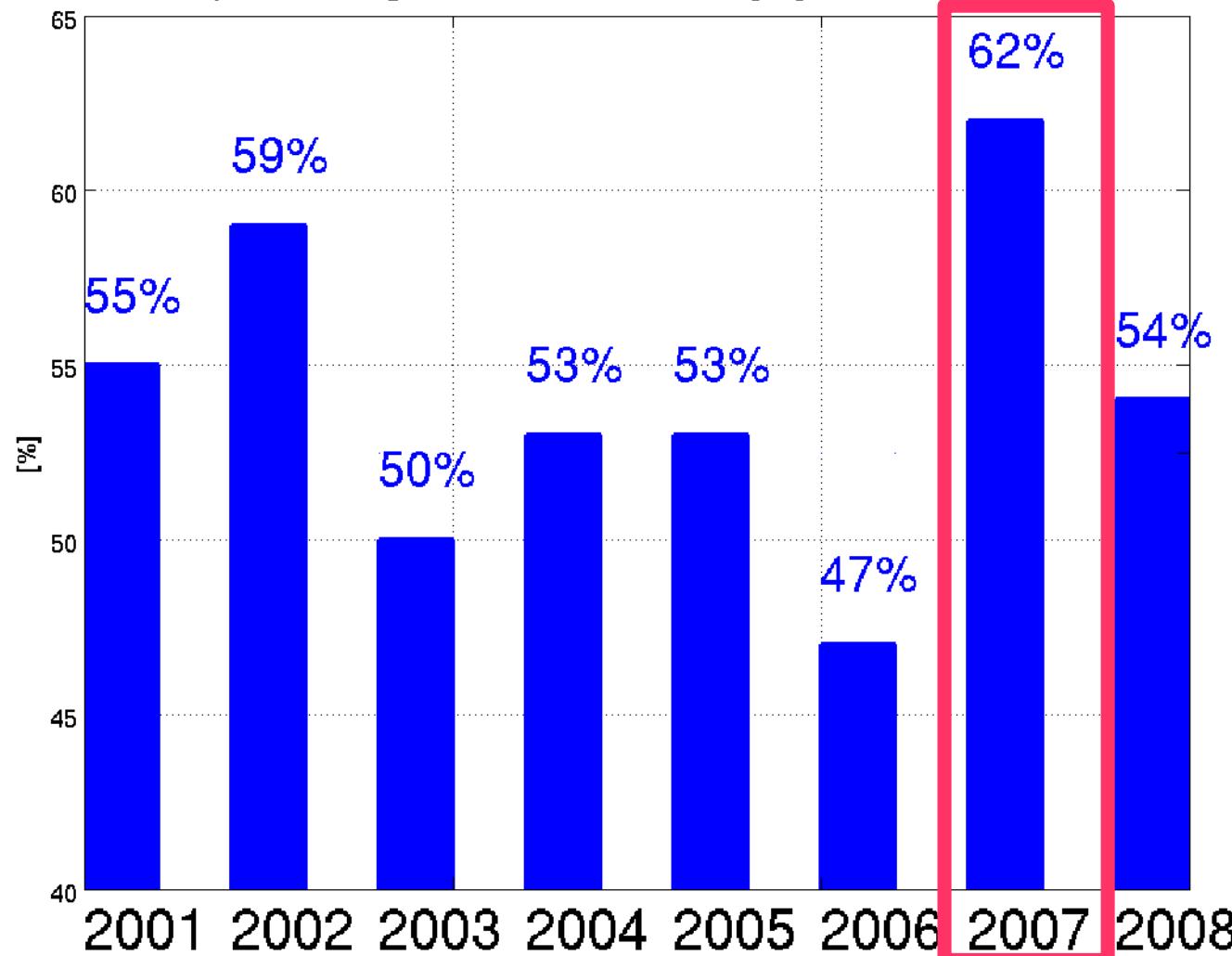
Cas spécial II: 2007 Stratification forte



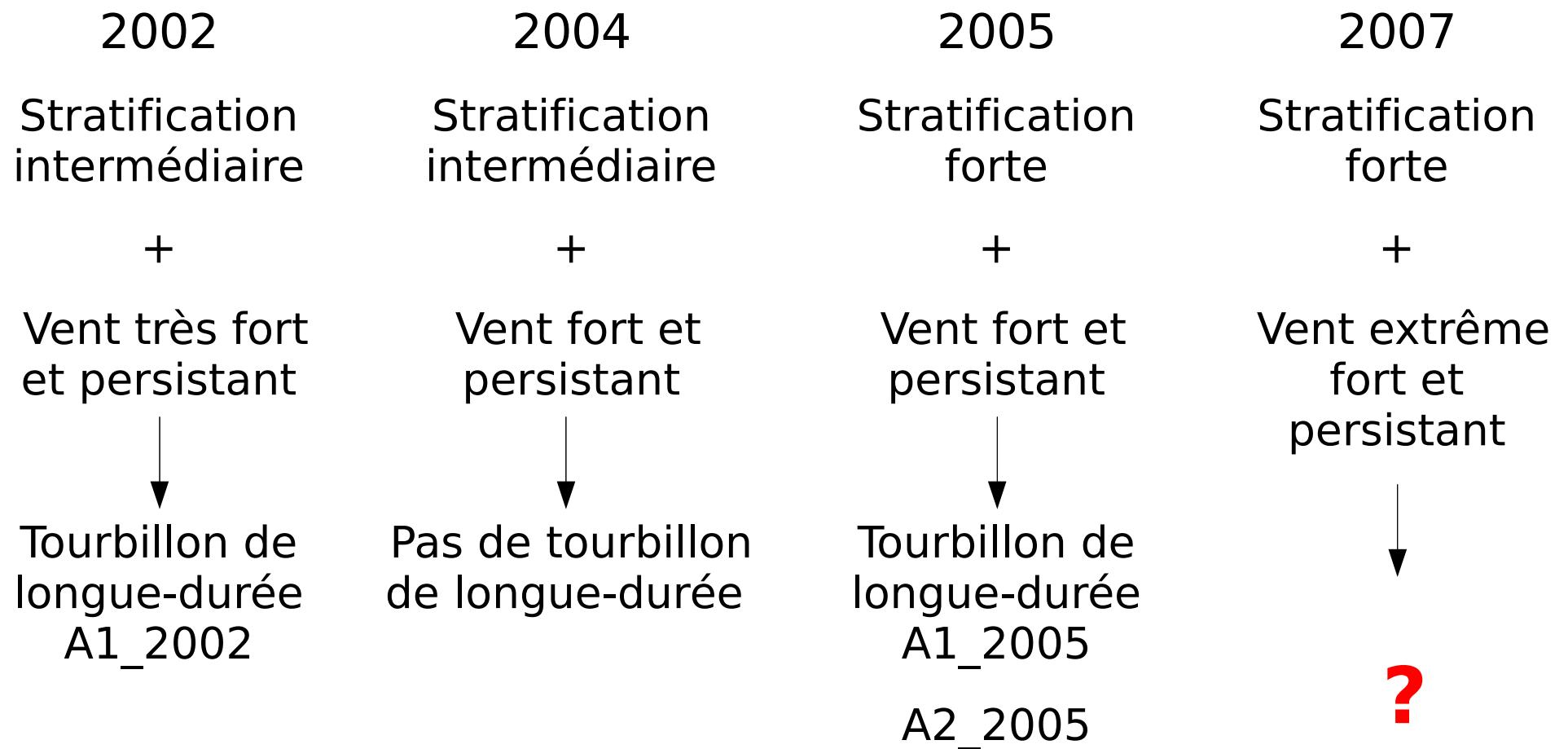
Influence du vent et de la stratification sur le tourbillon

Cas spécial II: 2007 Vent très fort et persistant

pourcentage de la Tramontane [%]: Mai - Octobre

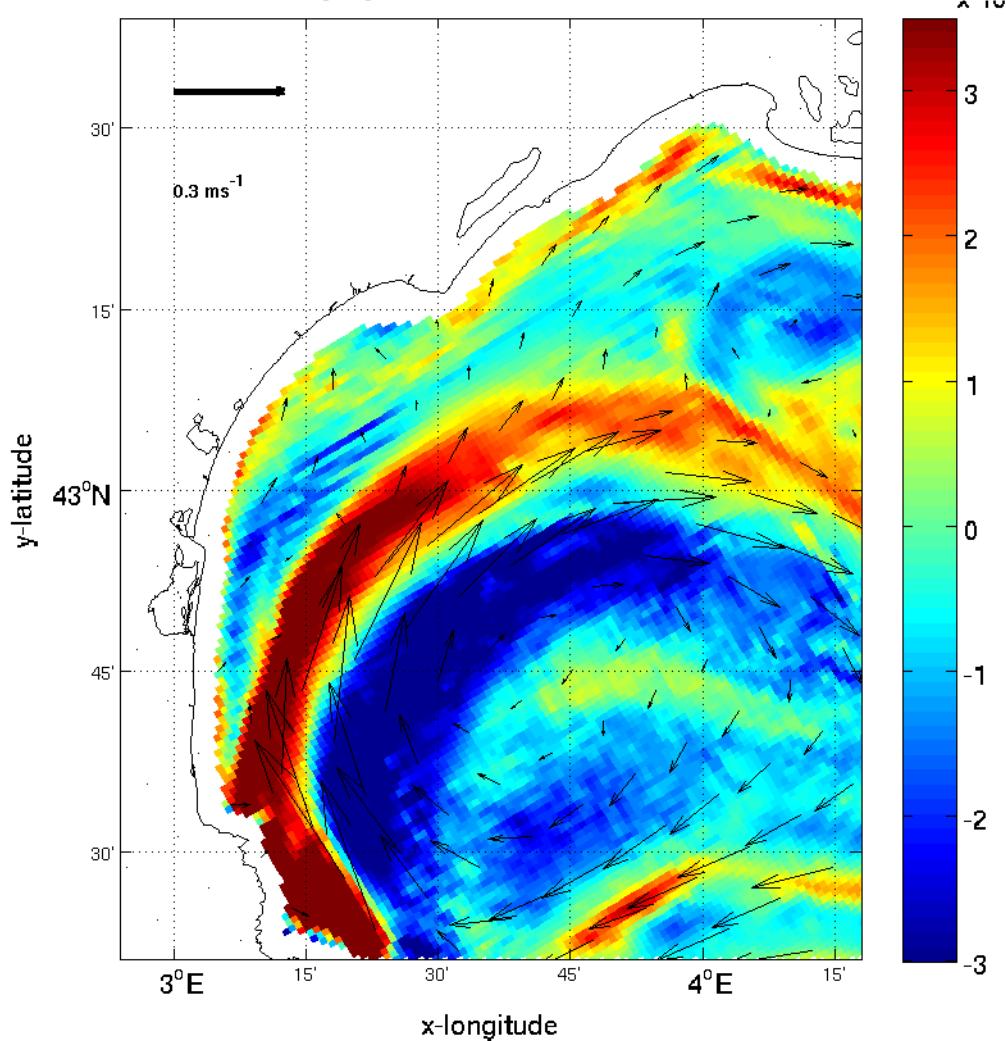


Influence du vent et de la stratification sur le tourbillon



Cas spécial II: 2007 – Une circulation anticyclonique

Vorticité relative+ champs du courant
(20m)
2007/08/08



2007

Stratification forte

+

Vent extrême fort et persistant



Une grande circulation anticyclonique

[Petrenko et al., 2008, JMS]

Deux conditions nécessaires pour avoir un tourbillon de longue-durée:

- Vent du Nord-Ouest: fort et persistant
- Une bonne condition de stratification

Deux conditions nécessaires pour avoir un tourbillon de longue-durée:

- Vent du Nord-Ouest: fort et persistant
- Une bonne condition de stratification

Vent	Non	Fort	Fort	Fort	Très fort	Très fort
Stratif.	Forte Faible	Non	Intermédiaire	Forte	Intermédiaire	Forte
Tourbillon	Non	Non	Transitoire	Longue- durée	Longue- durée	Circulation

↓ ↓ ↓ ↓ ↓

Hiver-printemps Début été,
Fin automne,
Été 2004 Été 2001,
2003, 2005,
2006, 2008 2002 2007

Conclusions

- Développement d'une configuration optimisée du modèle pour simuler de façon plus réaliste des tourbillons anticycloniques à l'ouest du GoL; [Hu et al., Ocean Model., 2009]
- Vérification de l'existence des tourbillons *in situ* et approfondissement des connaissances sur les tourbillons; [Hu et al., 2010, JMS, accepté]
- Compréhension du processus de génération des tourbillons; reproductibilité et variabilité des tourbillons. [Hu et al., 2011, JGR, soumis]

Perspectives

- Simulation prolongée jusqu'à 2010, test de l'hypothèse de génération:
 - *Latex09 – observation d'un tourbillon;*
 - *Latex10 – absence des tourbillons pendant la campagne;*
- Analyses Lagrangiennes des sorties de Symphonie:
 - *transport et distribution du zooplankton [Qiu et al., Ecol. Mod. 2010]*
 - *outil diagnostique lagrangien ARIANE: estimer le temps de résidence des eaux sur le plateau et les échanges des masses d'eau;*
 - *méthodes des Exposants de Lyapunov: comparer les résultats des identification des structures Lagrangiennes cohérentes obtenu à partir de données satellitales d'altimétrie [Nencioli et al., 2011];*
- Couplage modélisation Physique-biogéochimique avec ECO3M
 - *étudier l'influence du tourbillon sur la chaîne trophique [Campbell et al., Ecol. Mod., soumis]*
- Quantifier le rôle des tourbillons de mésoéchelle sur les échanges côte-large dans le Golfe du Lion

Remerciements

感谢

Directeur et co-directeurs de thèse:

M. Dekeyser, Mme. Petrenko, M. Doglioli

Les Equipages à bord (TéthysII & Suroît) & Personnel du service informatique

Laboratoires de collaboration: LA, LPO, LSEET, etc.

Les collègues du COM, de l'étage, du bureau...

La famille, mes parents, mes amis

谢谢爸爸妈妈,和所有的朋友们....

.....