



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

Ziyuan HU

Directeur de thèse: Ivan Dekeyser

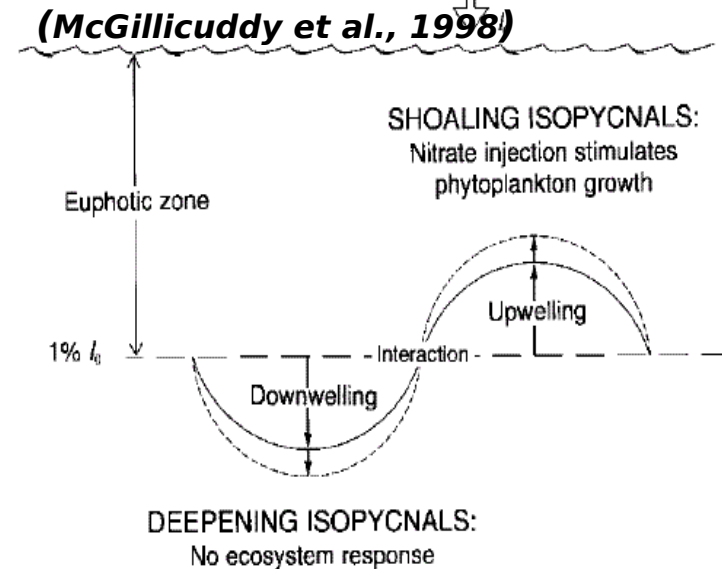
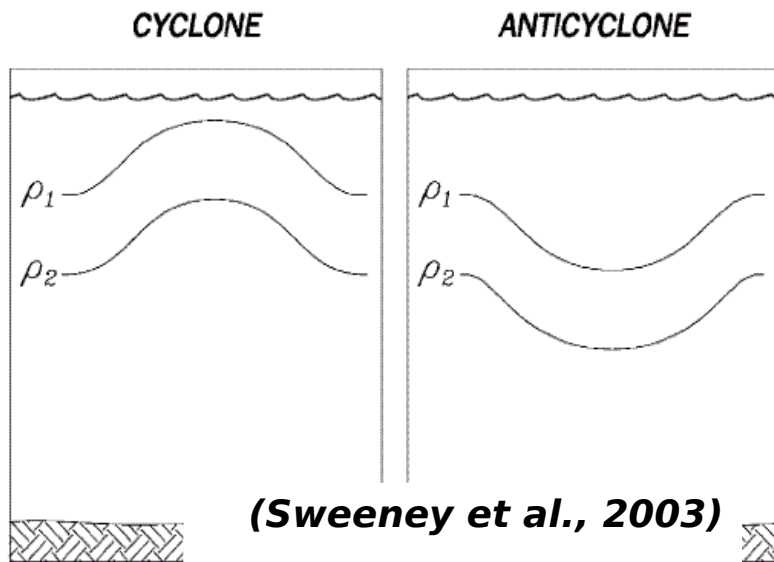
Co-directeurs : Anne Petrenko, Andrea Doglioli

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:

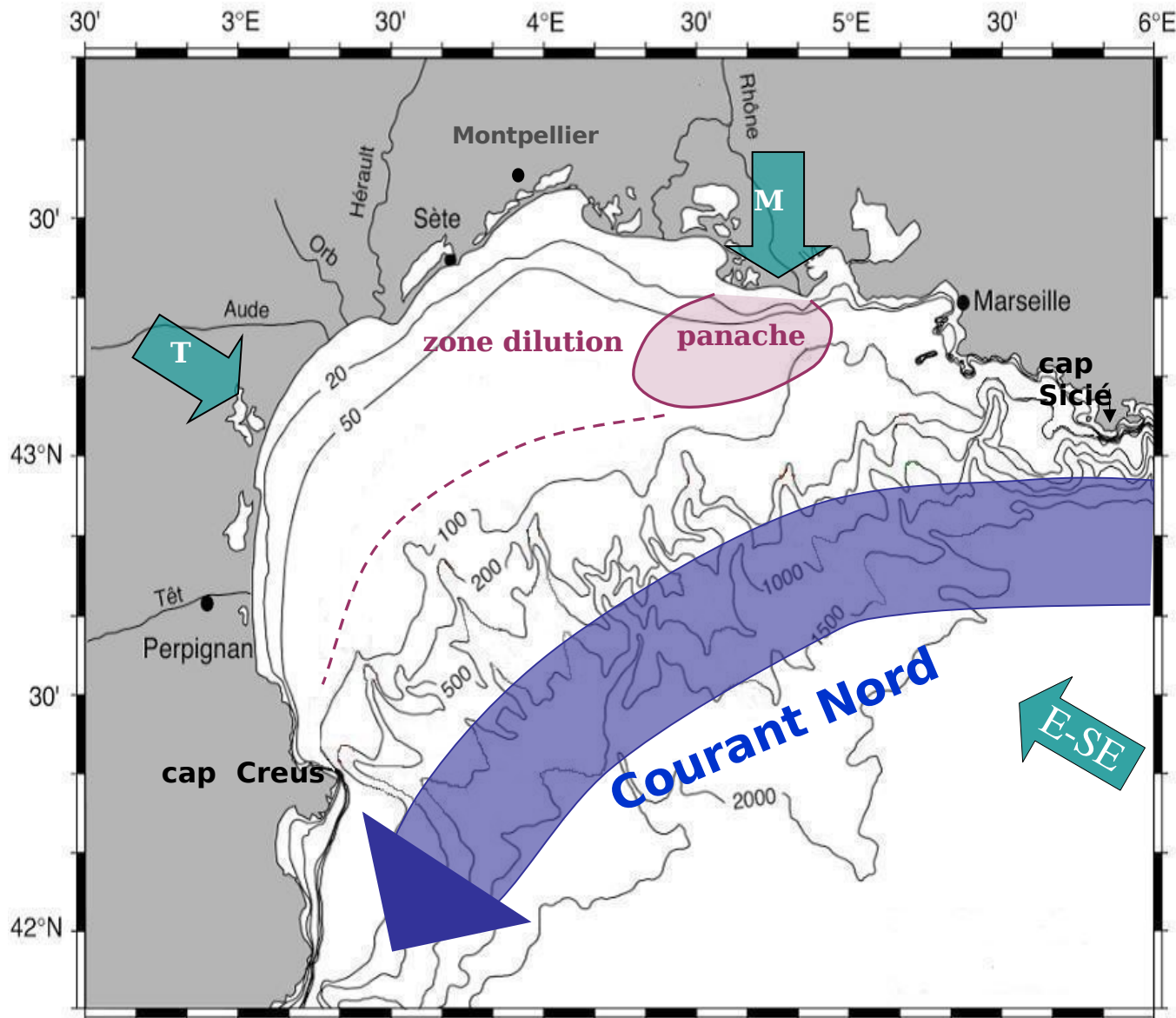
- Les campagnes en mer: Latex08 et Latex09

IV. Génération des tourbillons:

- Influence du vent
- Influence de stratification

V. Conclusion et perspectives

Golfe du Lion (GoL)



• Description :

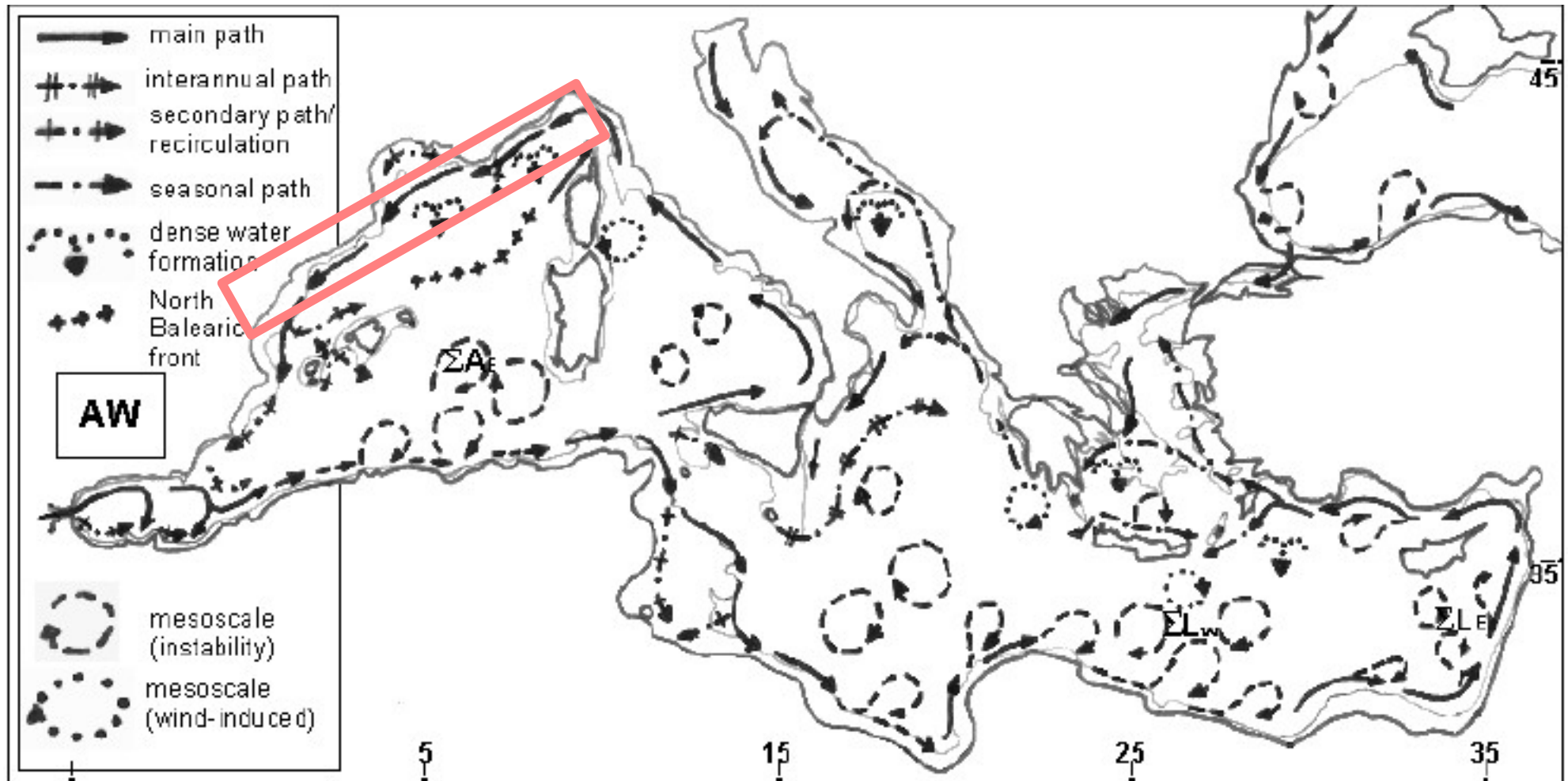
- surface ~ 11 000 km²
- profondeur moyenne ~ 80 m
- nombreux canyons

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]

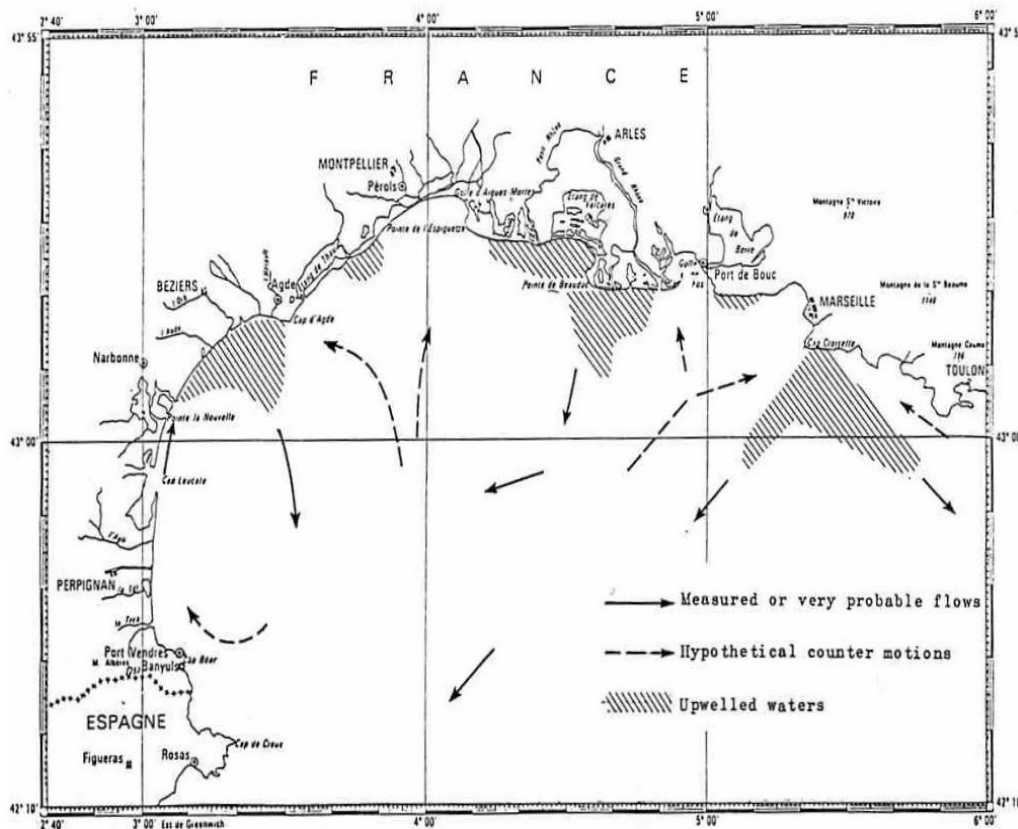
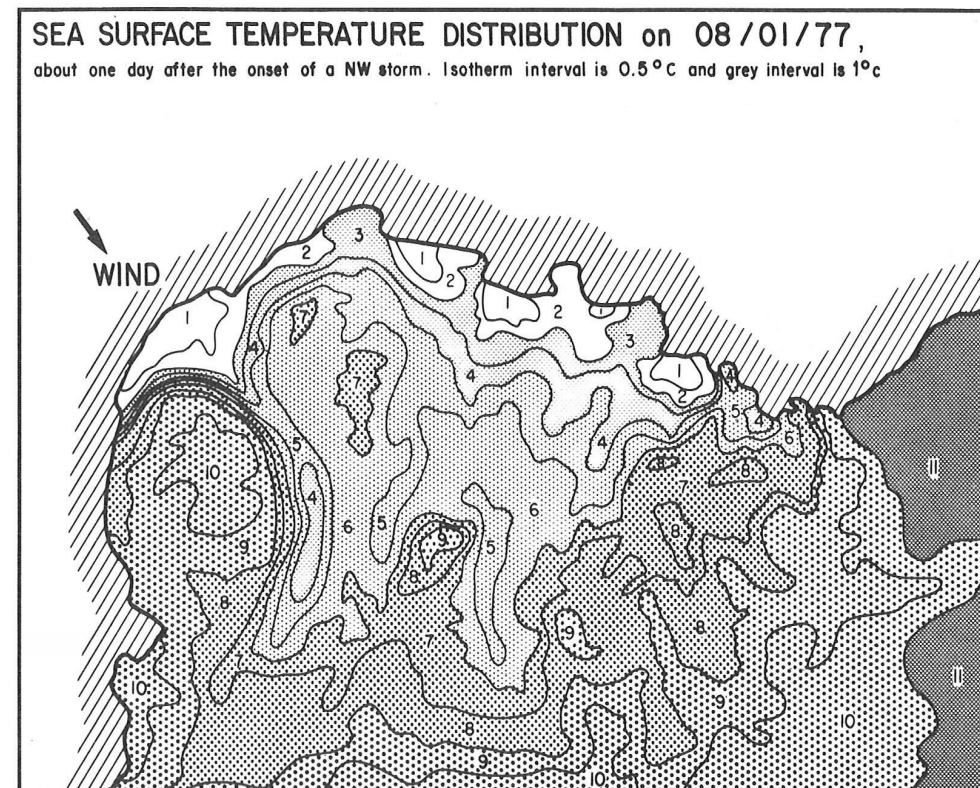


Schéma de circulation issue de mesures avec mouillages fixes

[Millot 1982]



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]

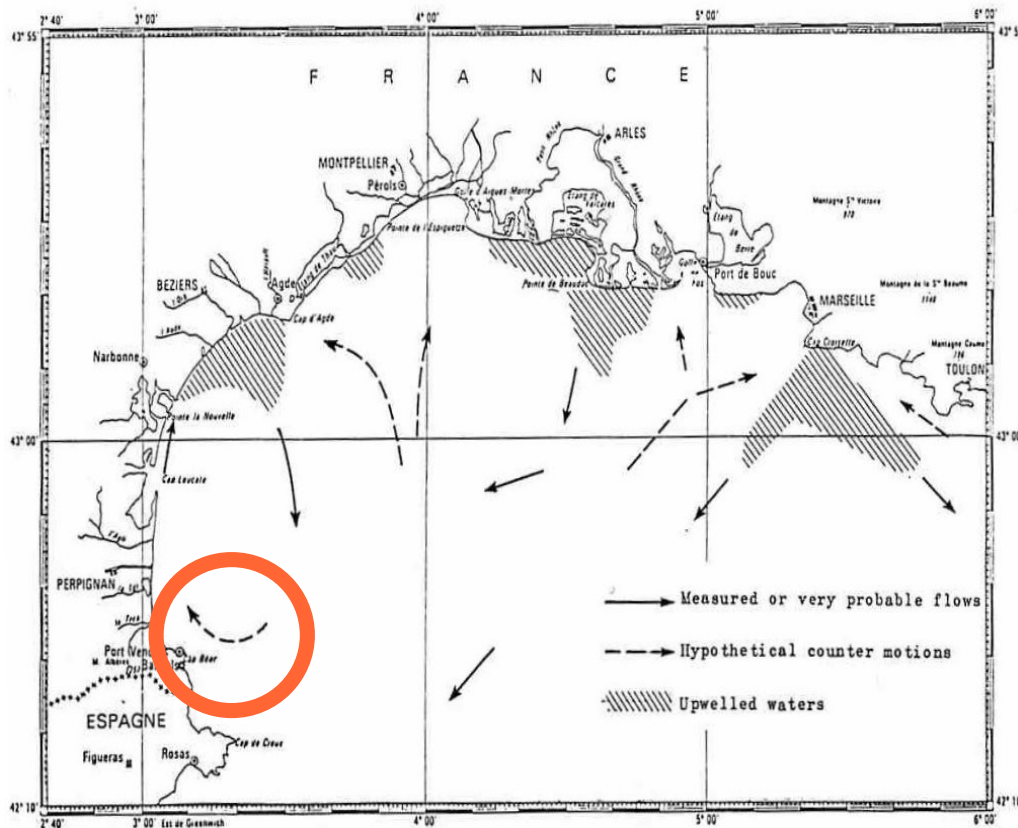
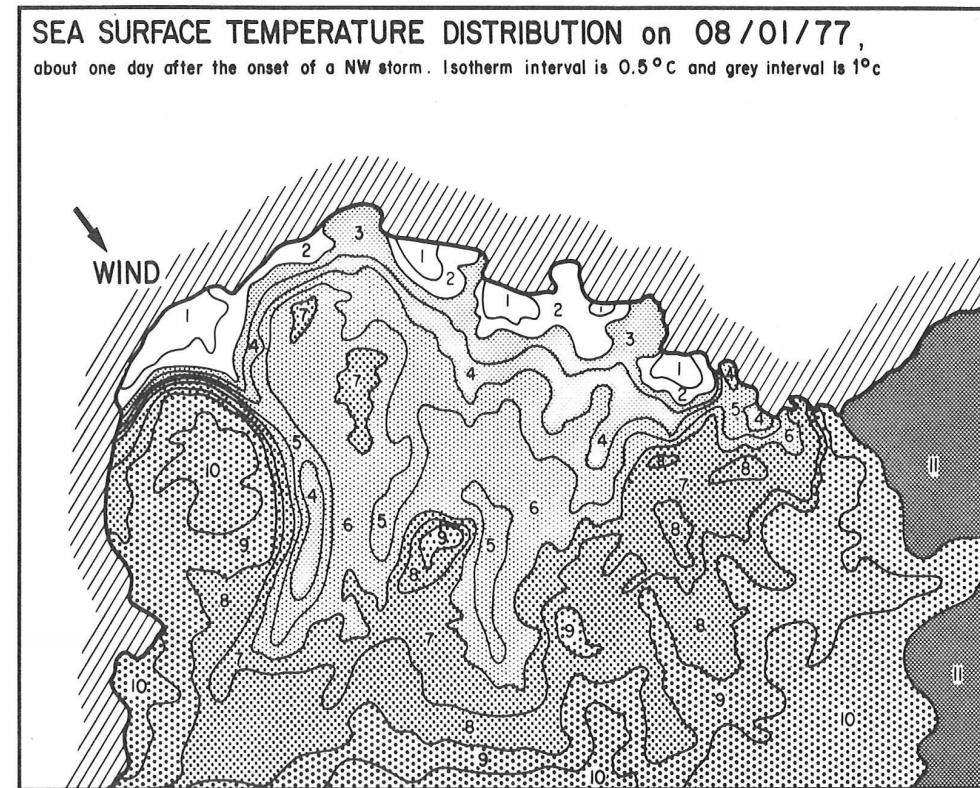


Schéma de circulation issue de mesures avec mouillages fixes

[Millot 1982]



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]

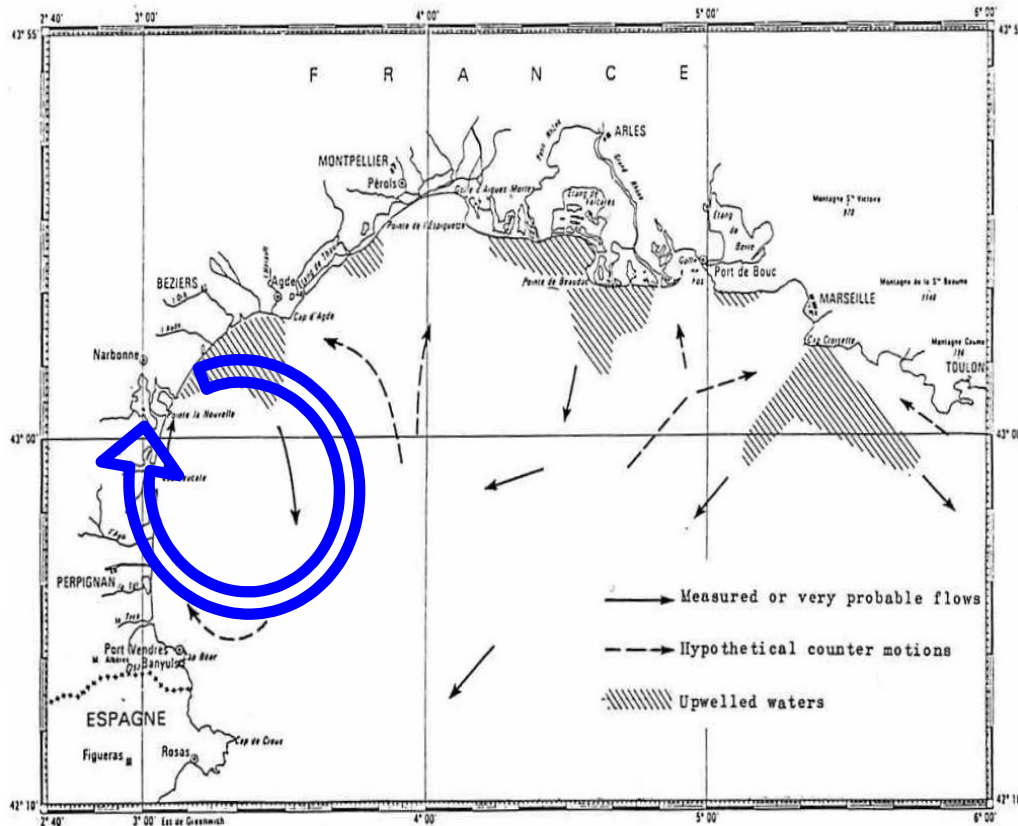
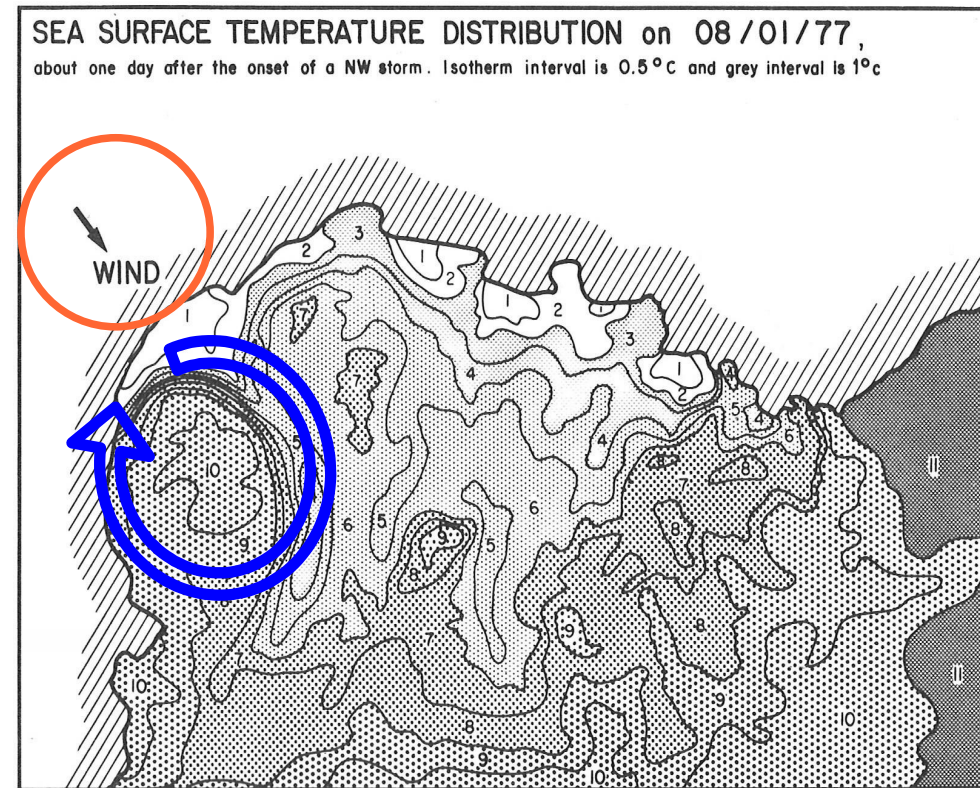


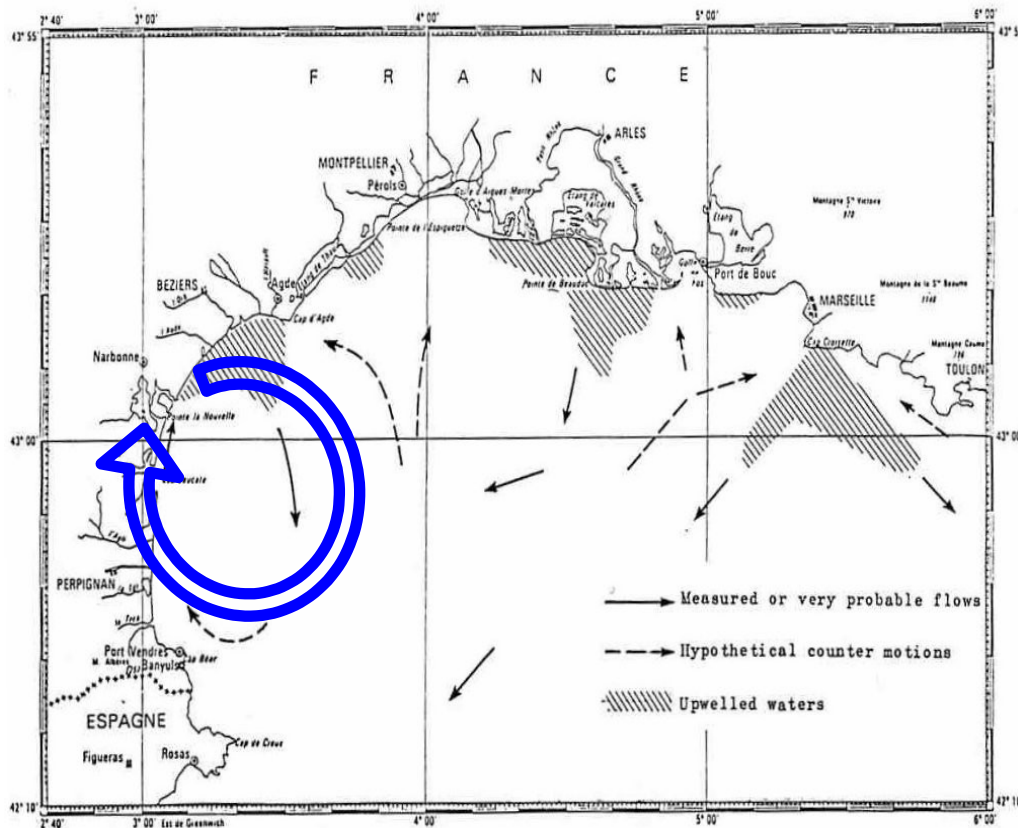
Schéma de circulation issue de mesures avec mouillages fixes

[Millot 1982]



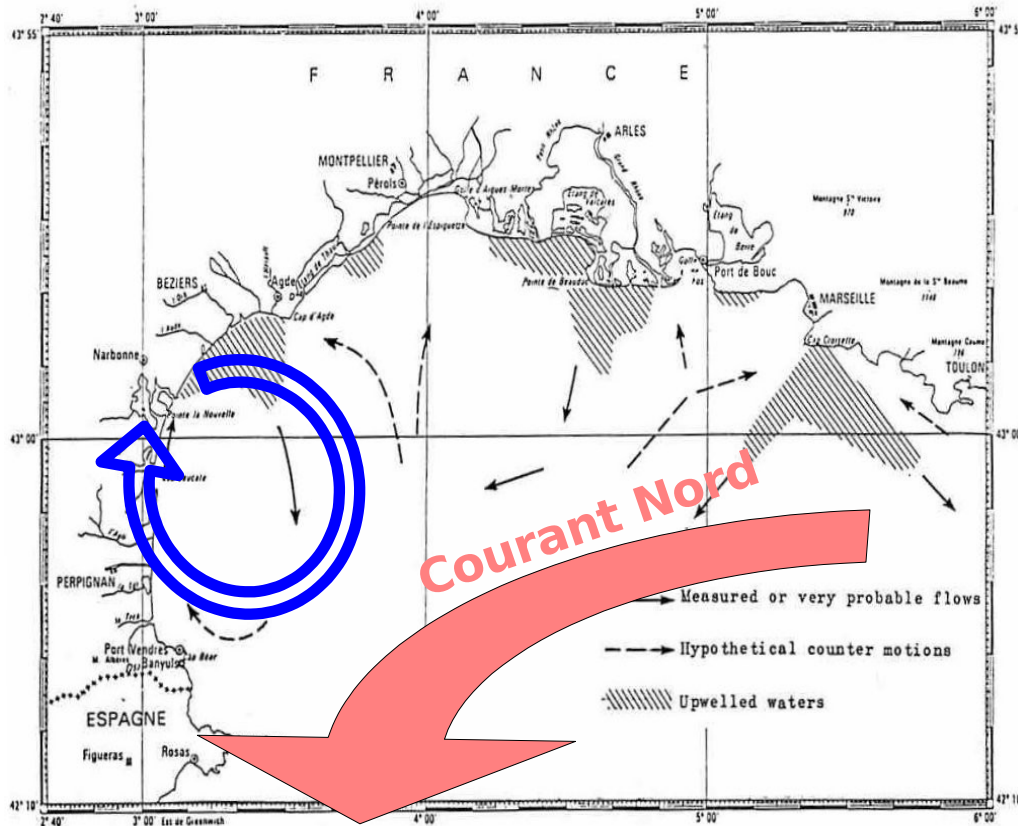
Température de surface de la mer (SST), 09 00 TU, 1 août, 1977

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?

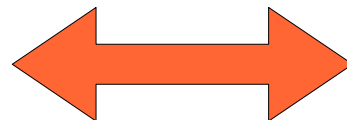
Projet **LATEX** (**L**Agrangian **T**ransport **E**xperiment),
2008 – 2011

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

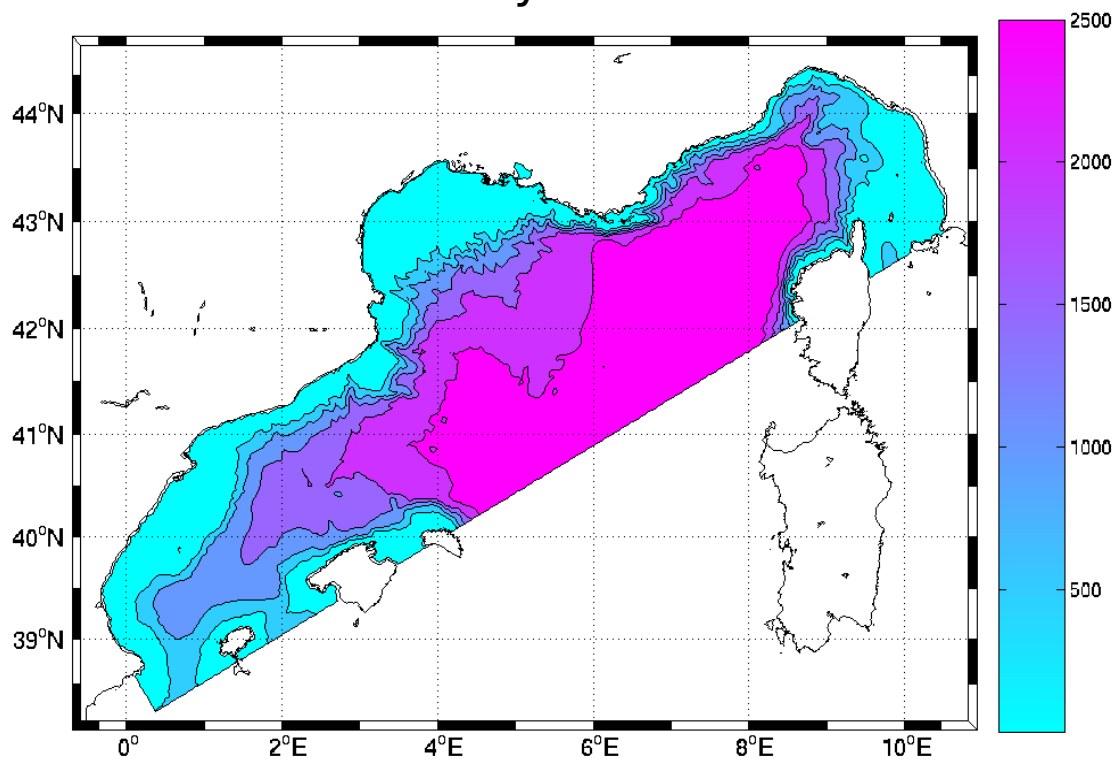


Modèle numérique: **SYMPHONIE**

Laboratoire d'Aérodynamique 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]

Coordonnée vertical: 40 sigma-z hybrid

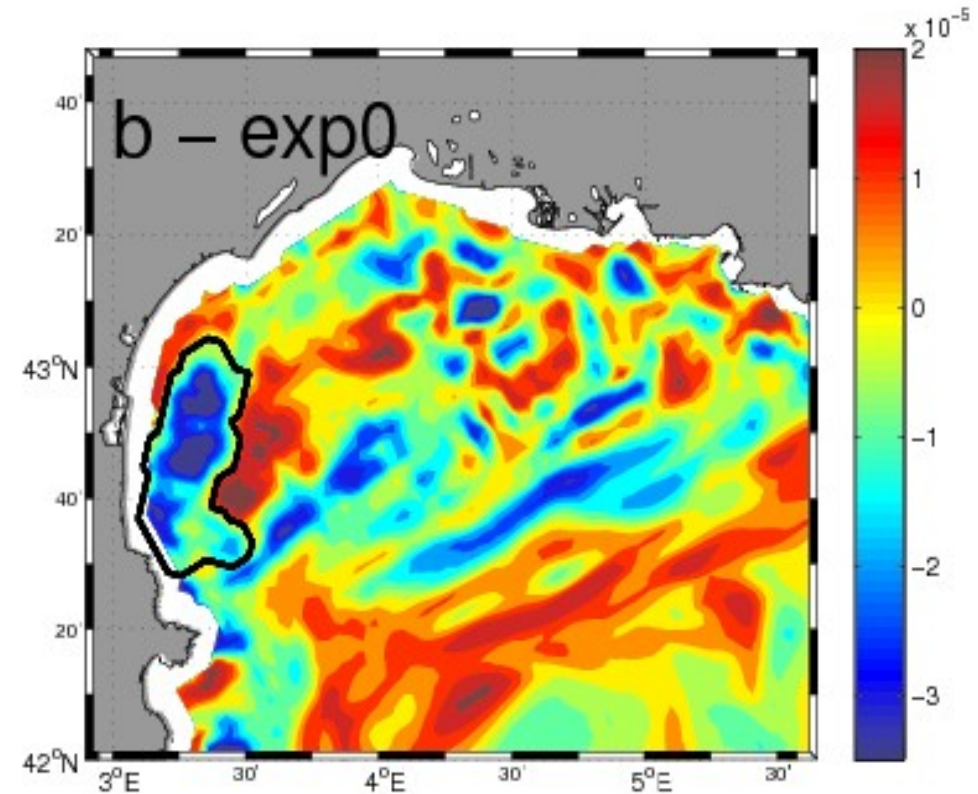
horizontal: $\Delta X = \Delta Y$

Forçages atmosphériques: Modèle Aladin
de Météo-France

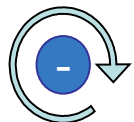
Conditions aux frontières: Sorties du
modèle OPA par MFSTEP

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



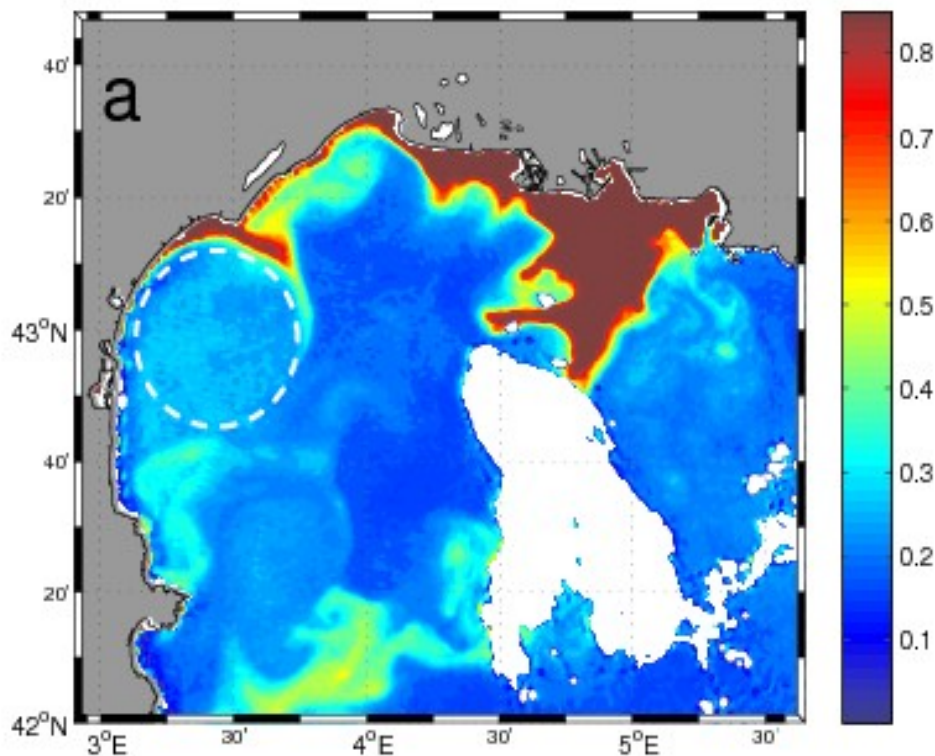
Cyclonique

Hémisphère Nord

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

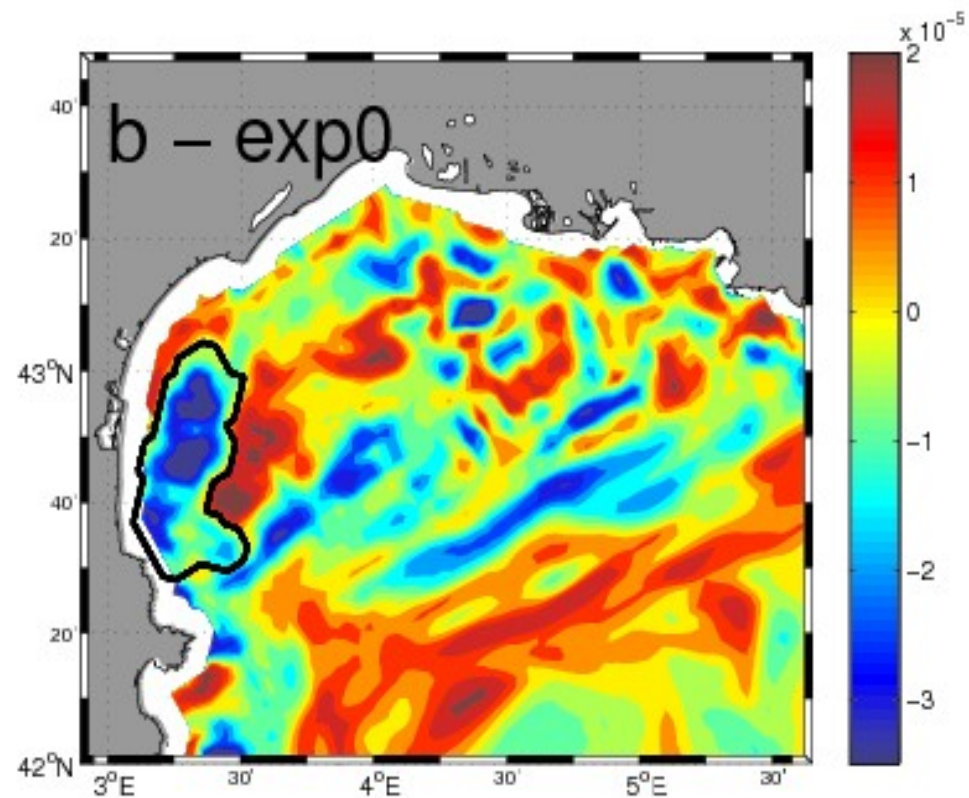
Identification du tourbillon – Analyse en ondelettes
[Doglioli et al., 2007]

SeaWiFs [$\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$]
2001, 07/25



Concentration chlorophyll a [$\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$]
25 juillet, 2001 (E. Bosc)

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



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]

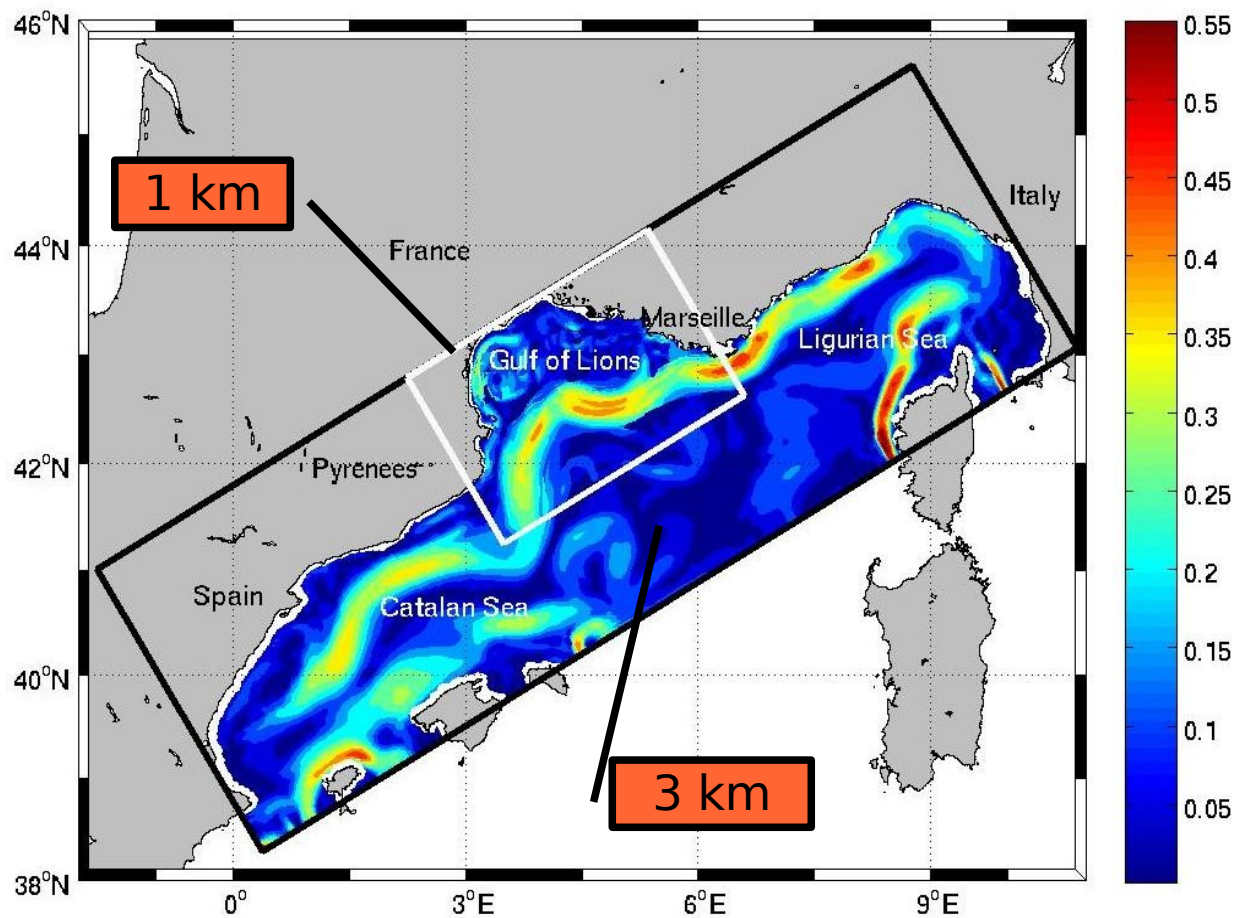
Etude de sensibilité

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)



- Résolution: 3km → 1km
[Spall et Holland, 1991]

- Zoom sur le GoL

- One – Way nesting

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

Étude de sensibilité: Diffusion horizontale

Upwind = Advection + Diffusion

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

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

[James, 1996]

Advection

Diffusion
numérique

Étude de sensibilité: Diffusion horizontale

Upwind = Advection + Diffusion

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

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

[James, 1996]

Advection

Diffusion
numérique

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

Coefficient de viscosité: $A = \text{Constant}$ (15m²/s) \longrightarrow $A = |u| \frac{\Delta x}{2}$

Étude de sensibilité: Diffusion horizontale

Upwind = Advection + Diffusion

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

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

[James, 1996]

Advection

Diffusion
numérique

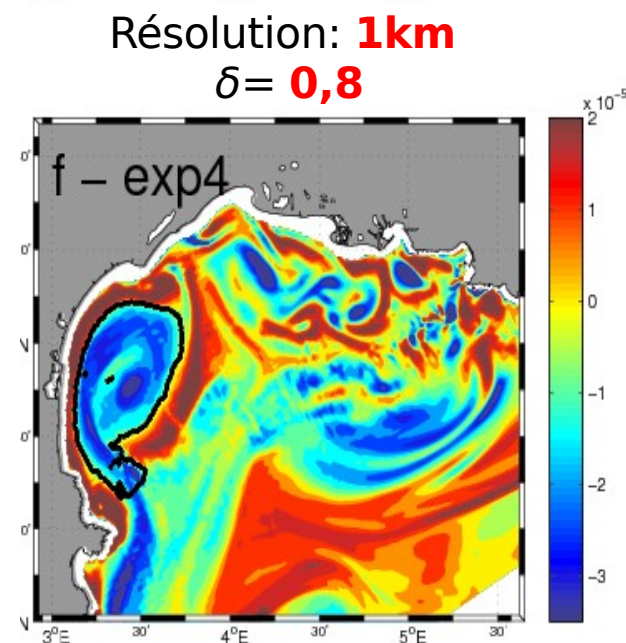
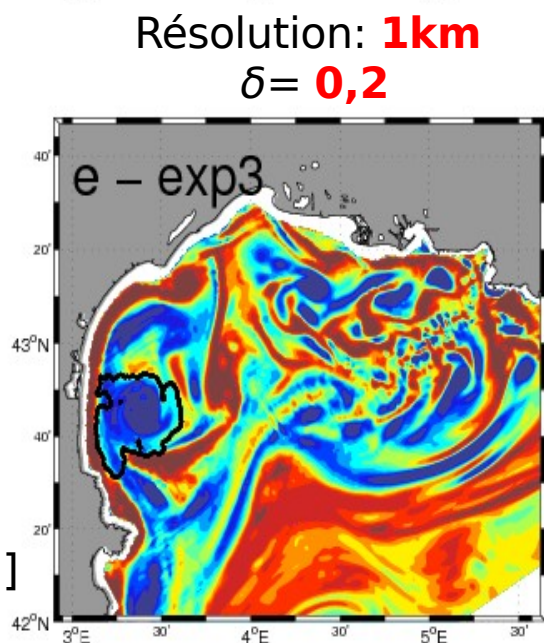
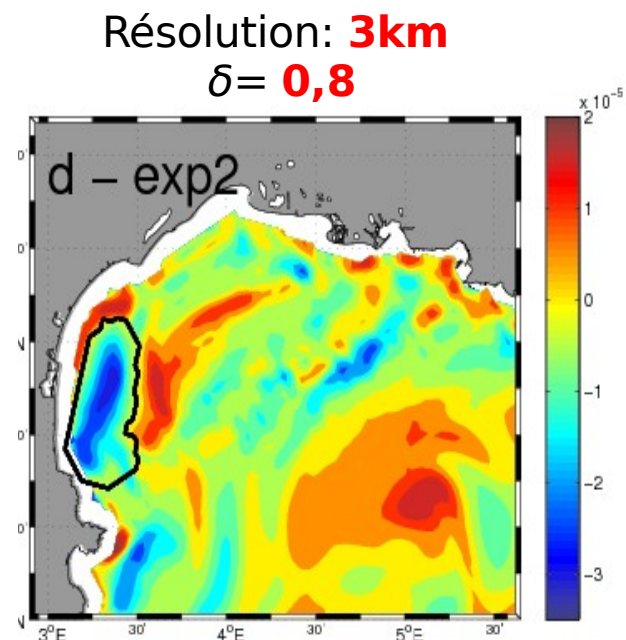
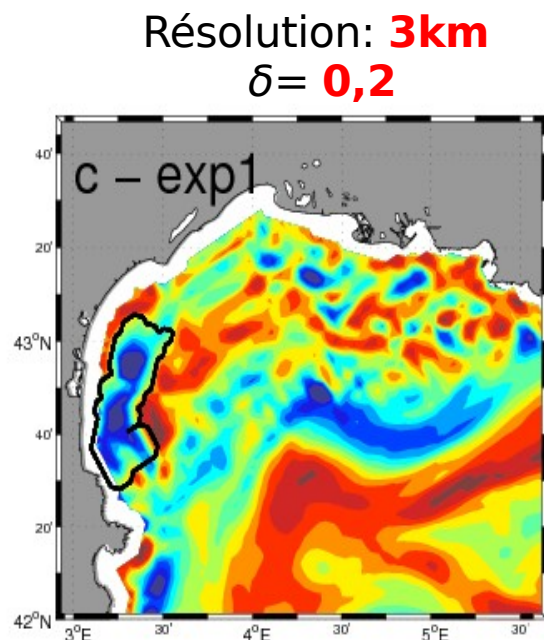
Schéma conservant l'énergie,
[Marsaleix et al., 2008]

Coefficient de viscosité: $A = \text{Constant}$ (15m²/s) \longrightarrow $A = |u| \frac{\Delta x}{2}$ \longrightarrow $\tilde{A} = \delta \cdot |u| \frac{\Delta x}{2}$

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

Étude de sensibilité: Résolution + Diffusion horizontale

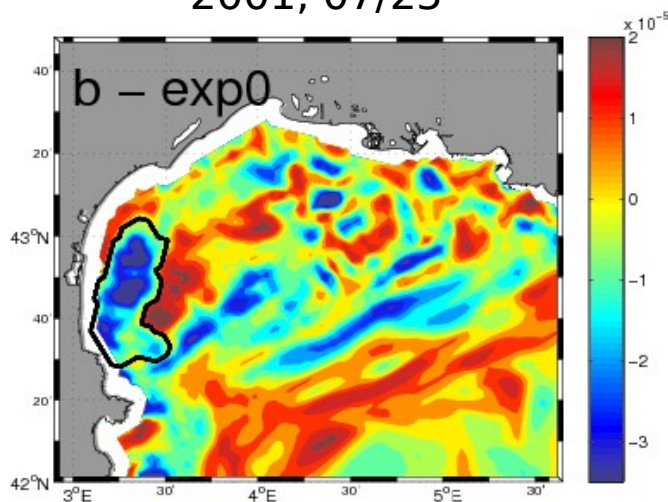
Vorticité relative
simulée [s^{-1}] (20m)
au 25 juillet 2001



Résolution: 3km \rightarrow 1km
 $\delta = 0,2; 0.8$

Étude de la sensibilité: Résolution + Diffusion horizontale

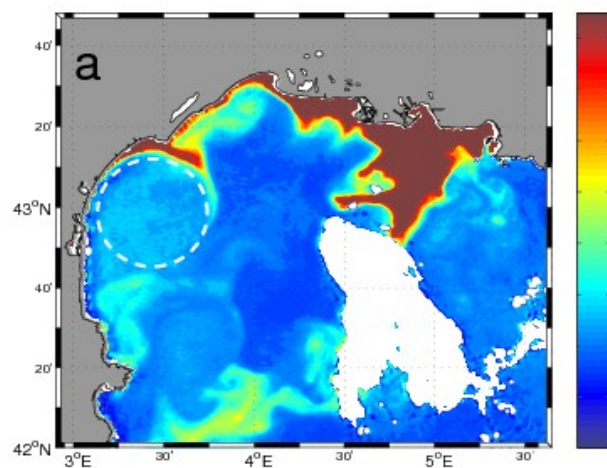
Vorticité relative (20m)
2001, 07/25



Résolution: **3km**

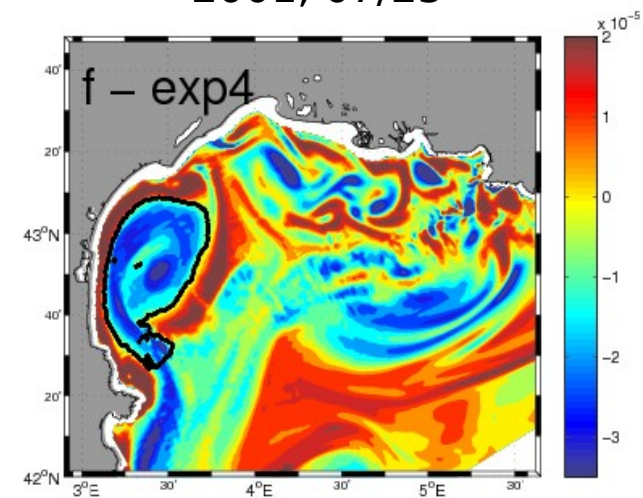
Coefficient de viscosité $A=15 \text{ m}^2/\text{s}$

SeaWiFs
2001, 07/25



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

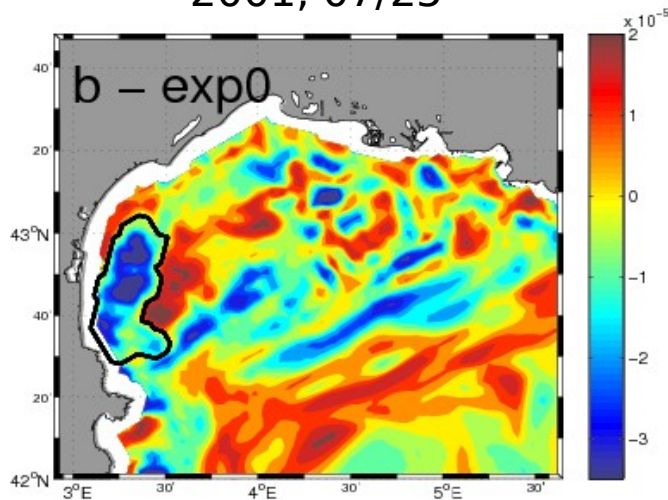
Vorticité relative (20m)
2001, 07/25



Résolution: **1km**
 $\delta=0,8$

Étude de la sensibilité: Résolution + Diffusion horizontale

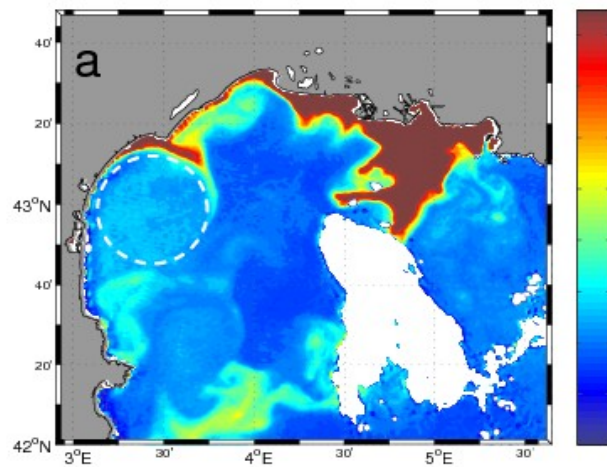
Vorticité relative (20m)
2001, 07/25



Résolution: **3km**

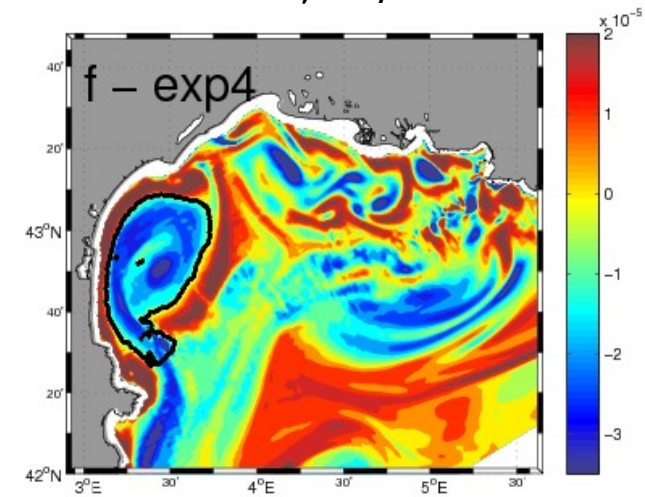
Coefficient de viscosité $A=15 \text{ m}^2/\text{s}$

SeaWiFs
2001, 07/25



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

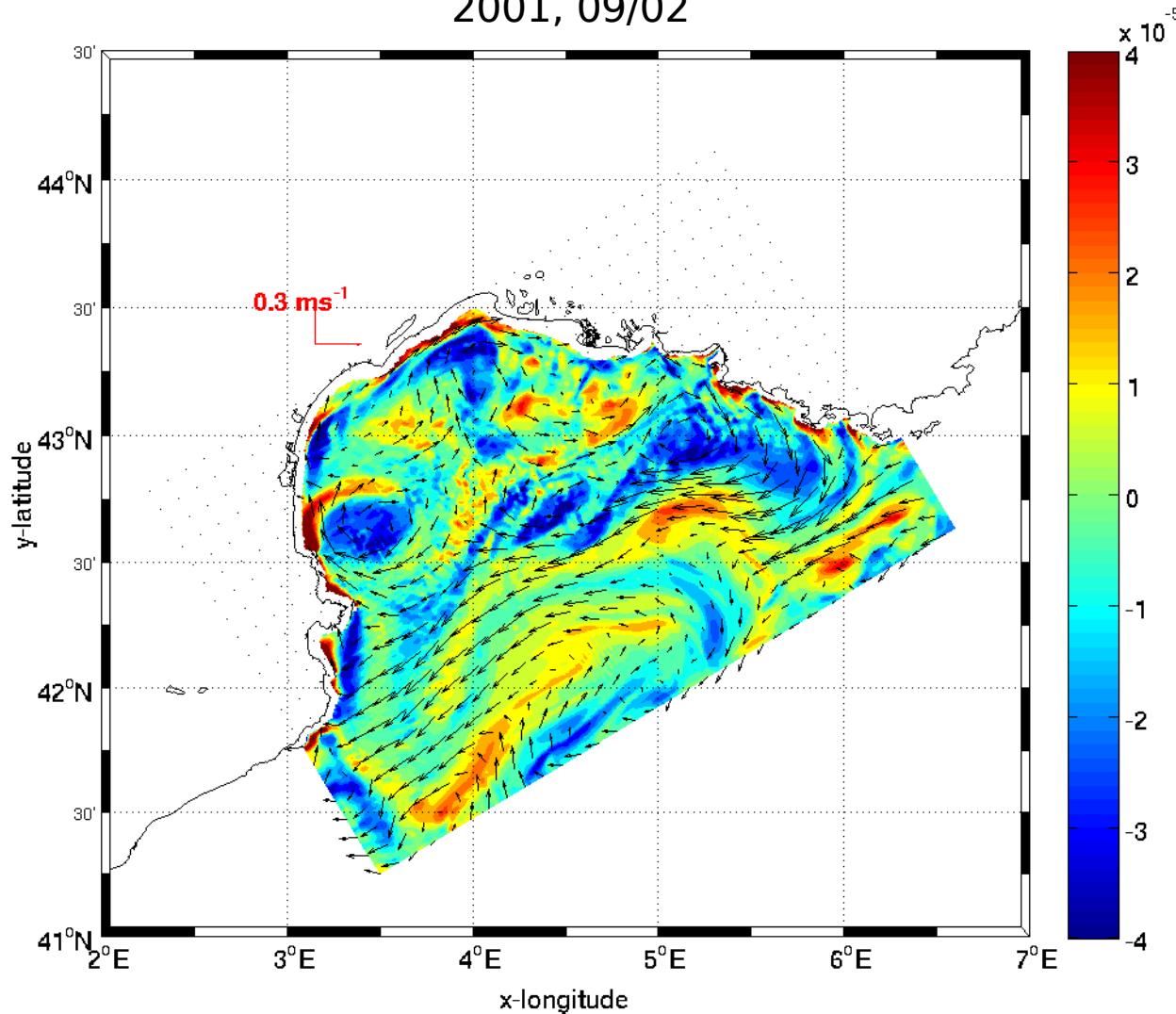
Vorticité relative (20m)
2001, 07/25



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 \sim 20 km

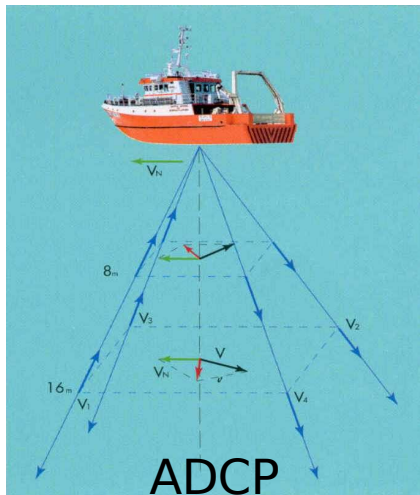
III. Mesures en mer

Campagnes en mer dans le cadre du projet LATEX

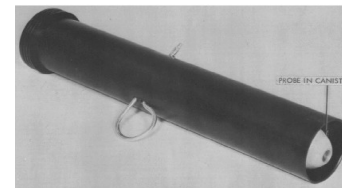
Latex08: 1 – 6 septembre 2008

Latex09: 24 – 29 août 2009

Latex10: 1 – 24 septembre 2010



Flotteur Lagrangien



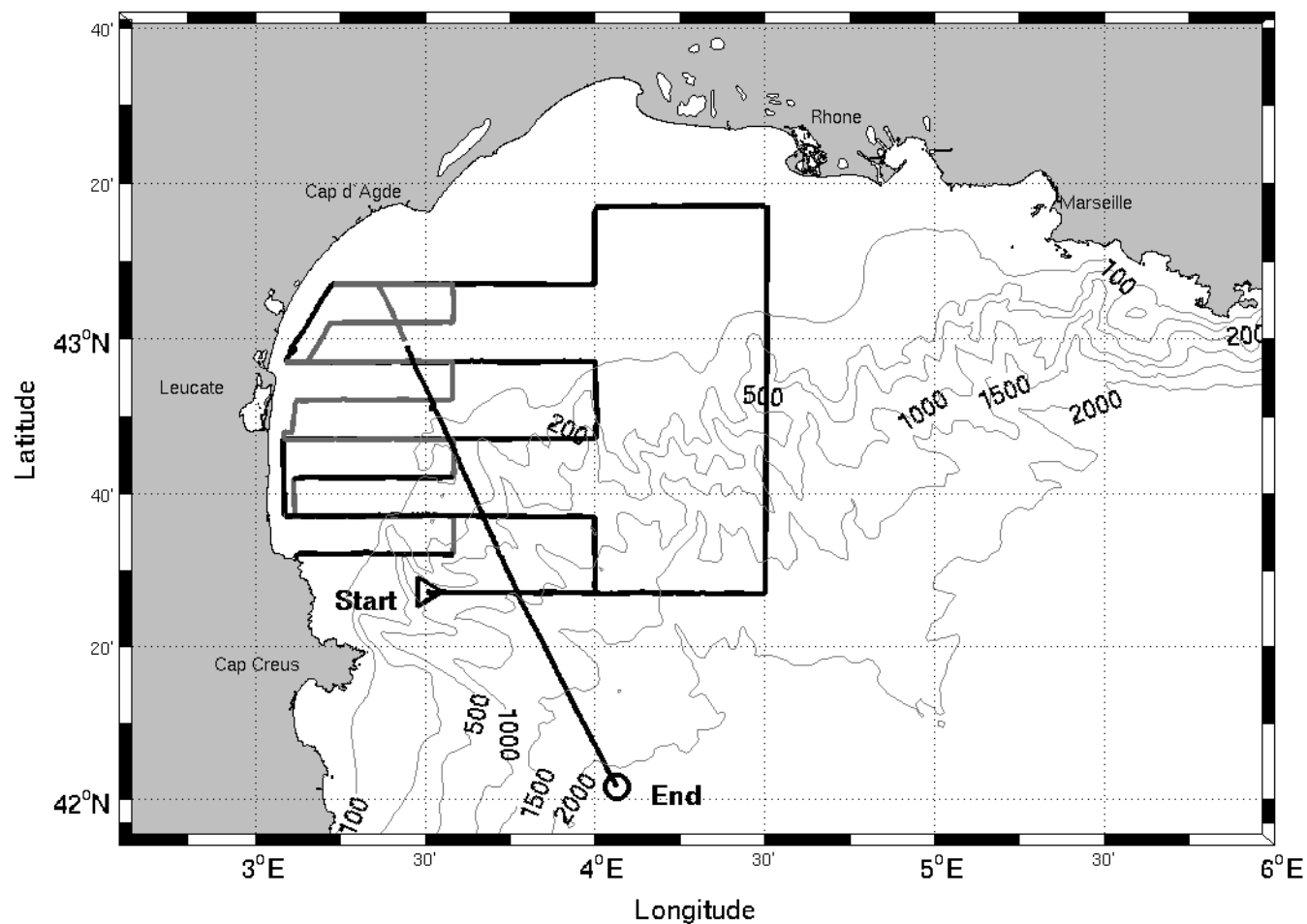
XBT



CTD

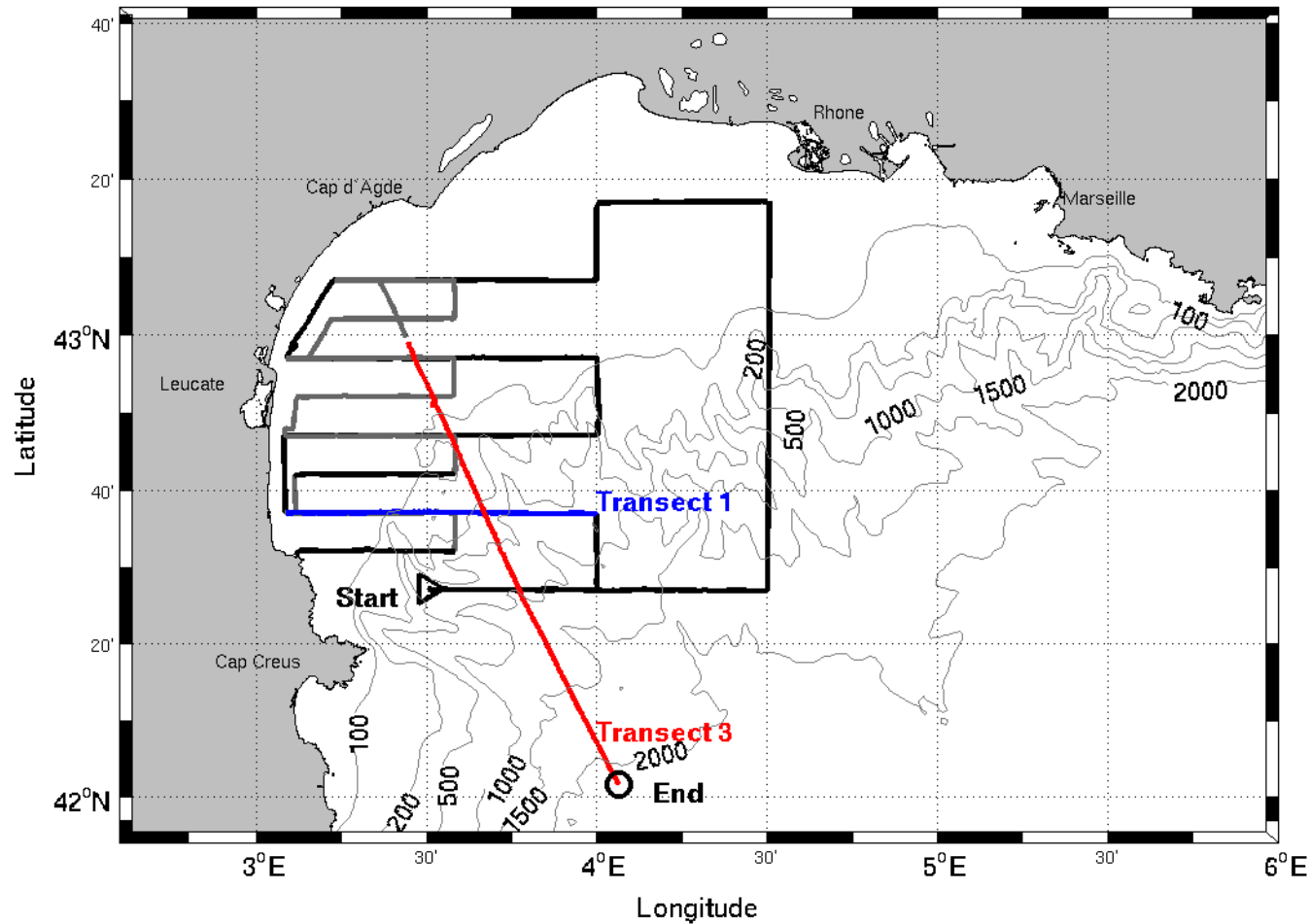
Latex08: 1 – 6 septembre, 2008

Trajet du Bateau

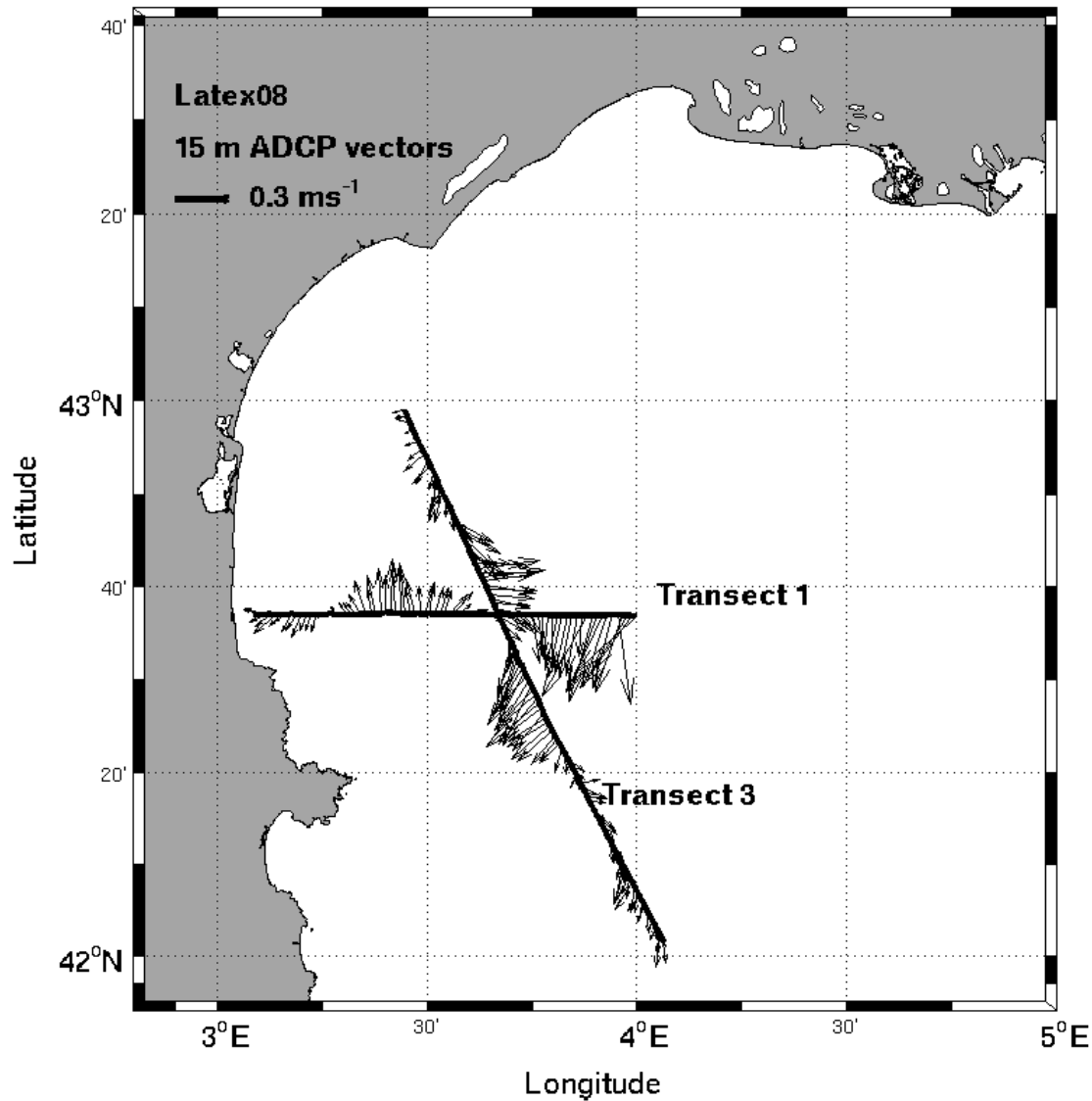


Latex08: 1 – 6 septembre, 2008

Trajet du Bateau

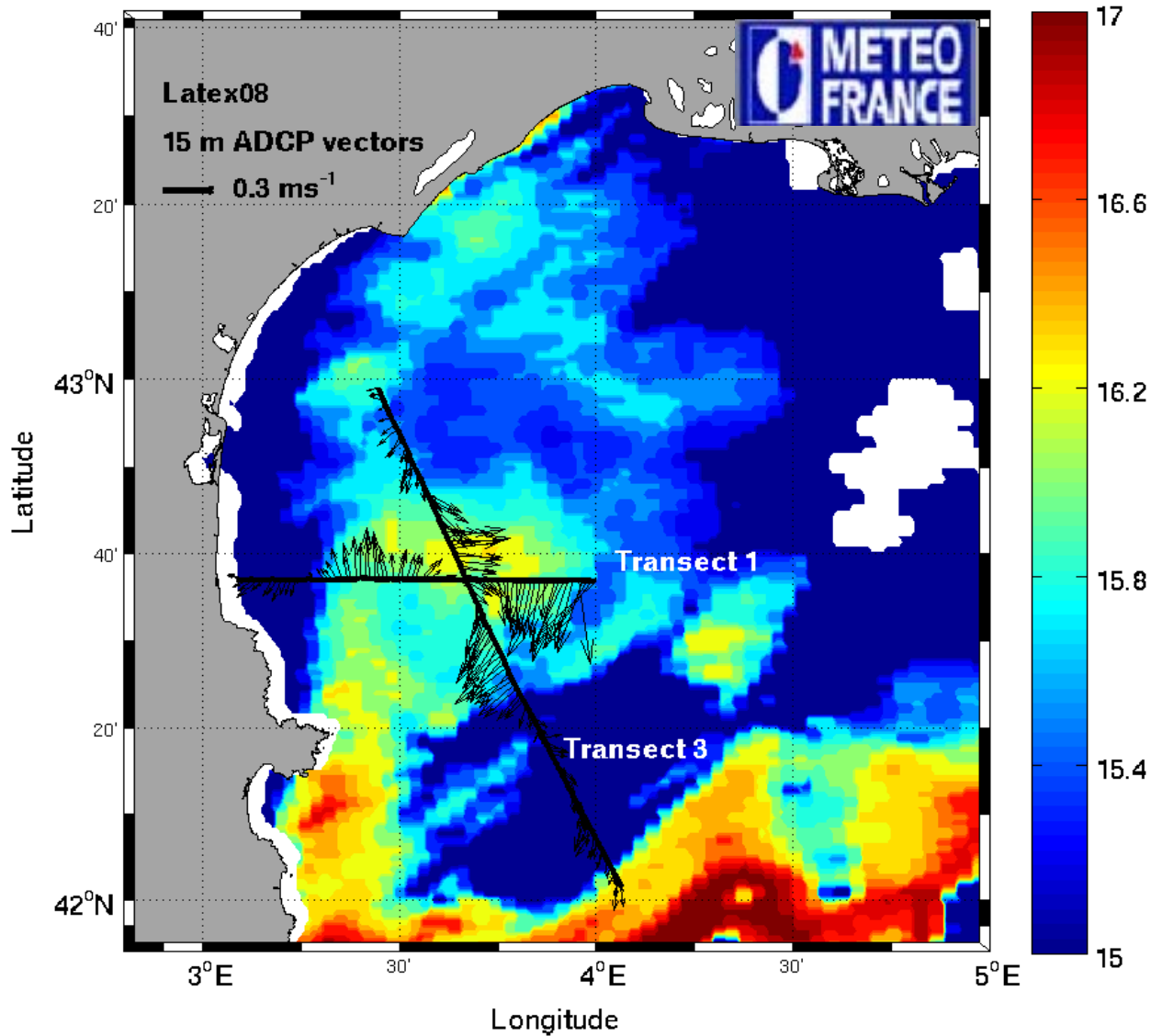


Latex08: 1 – 6 septembre, 2008



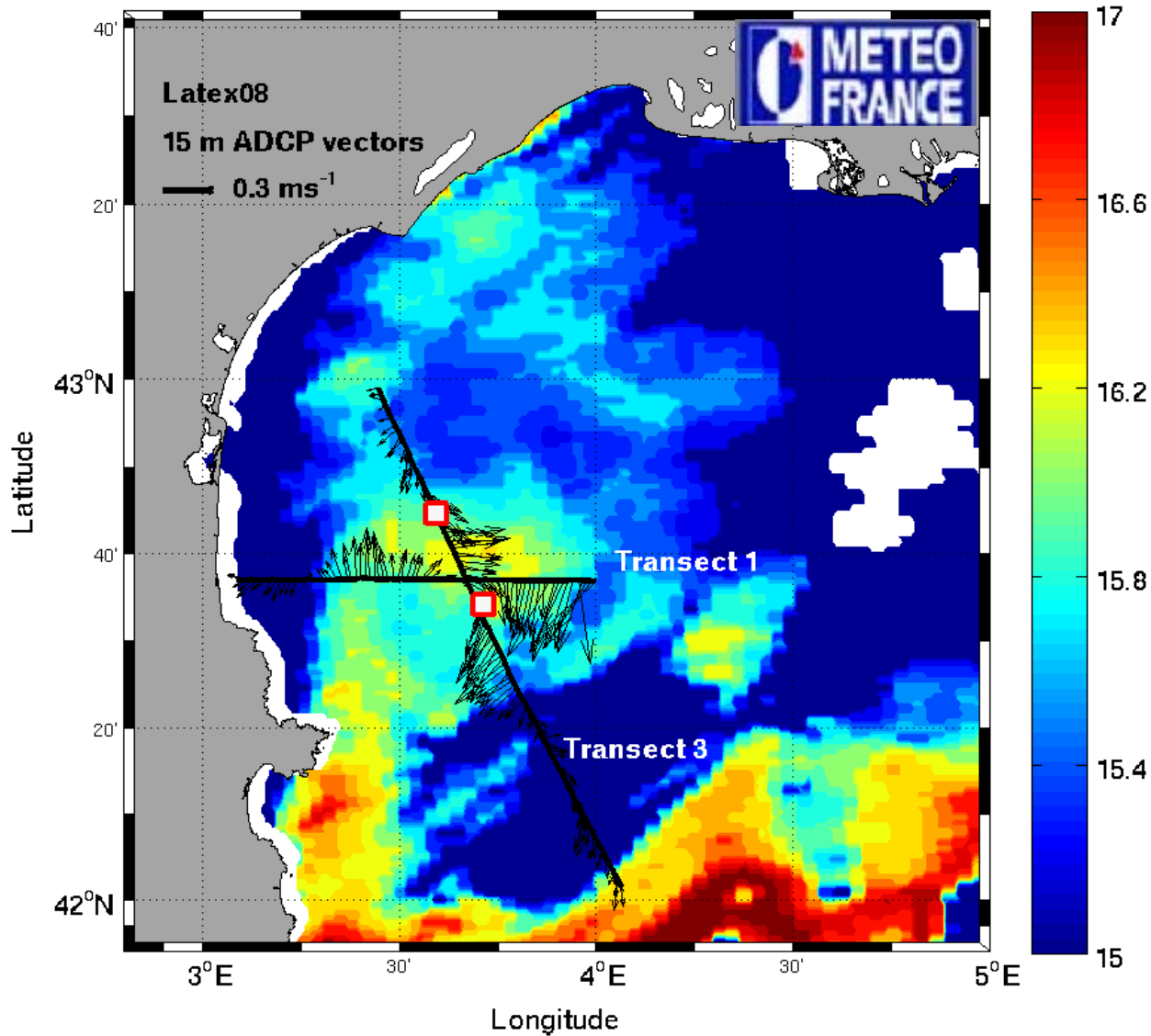
Vecteurs du courant
mesuré par ADCP à 15 m

Latex08: 1 – 6 septembre, 2008



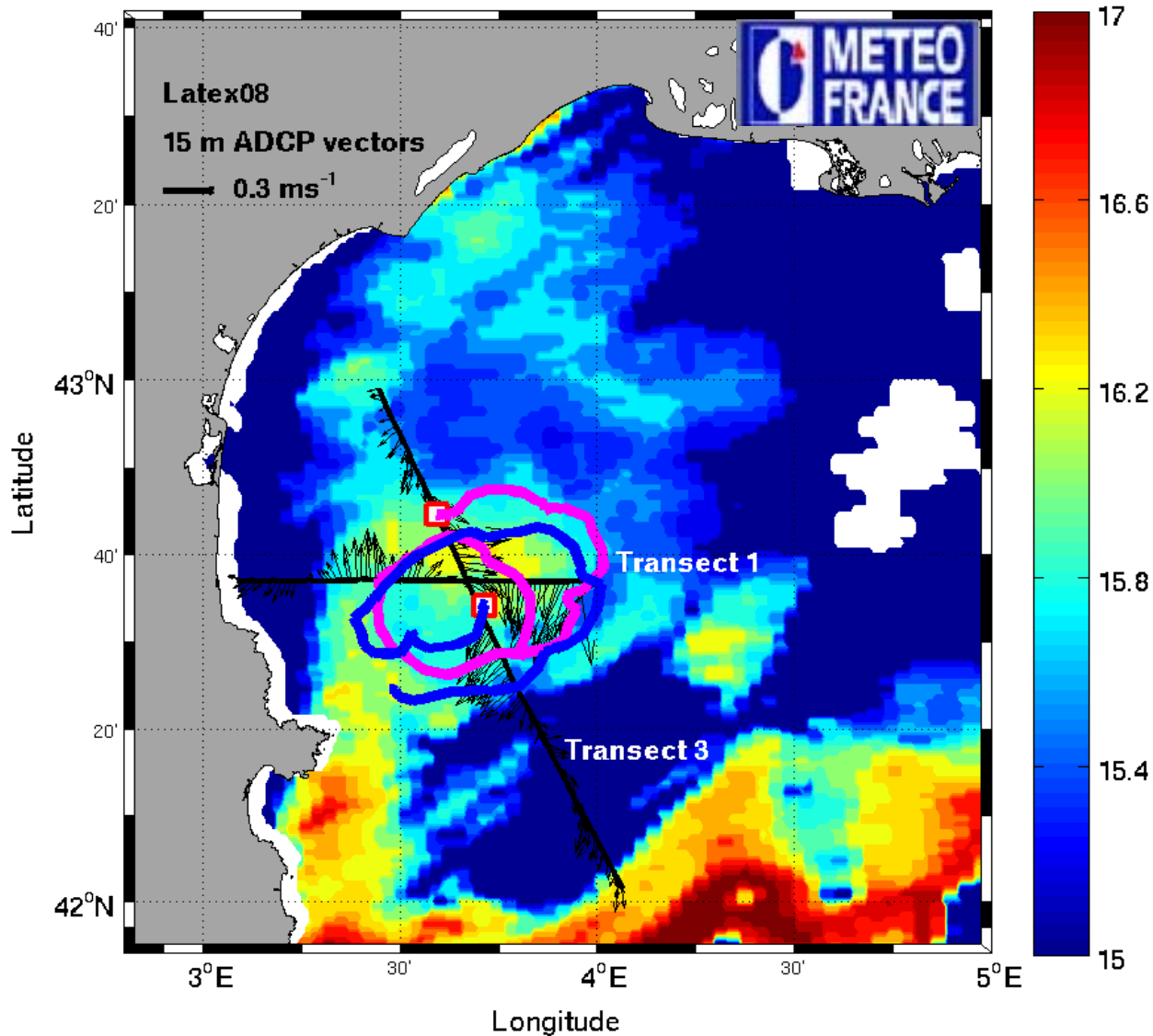
Vecteurs du courant
mesuré par ADCP à 15 m
+
SST

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

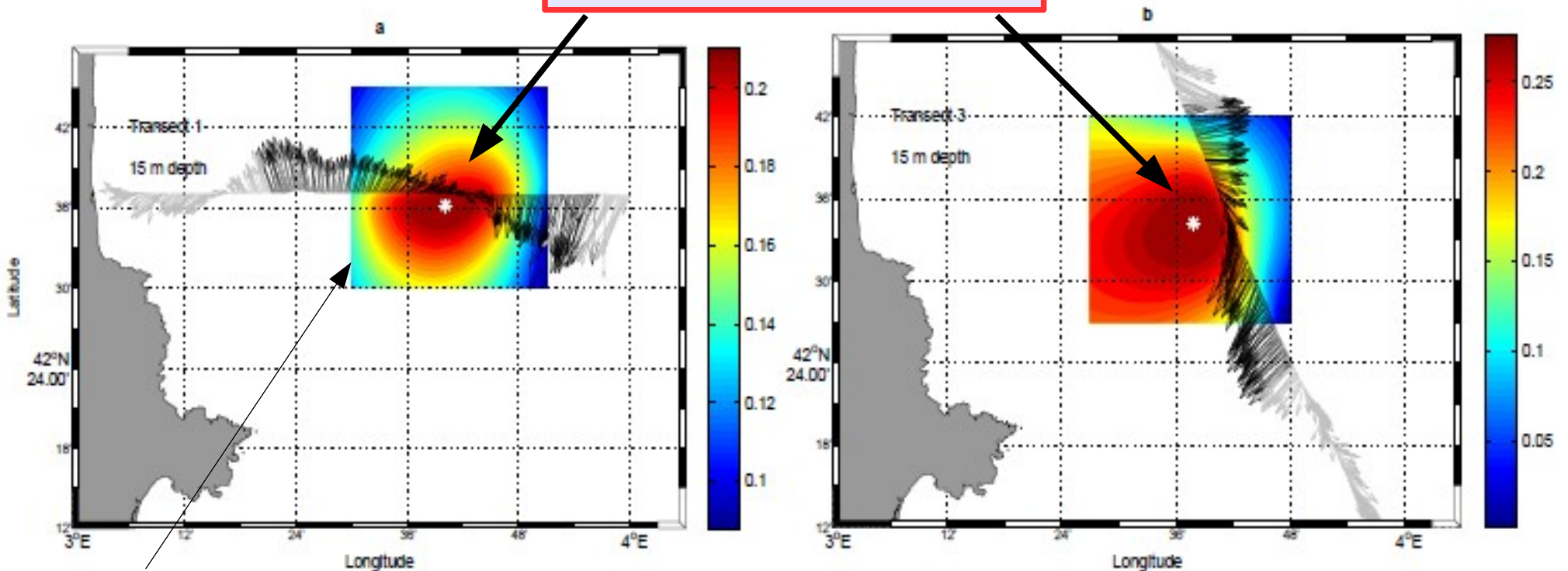
Rayon $\sim 20 - 30 \text{ km}$

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

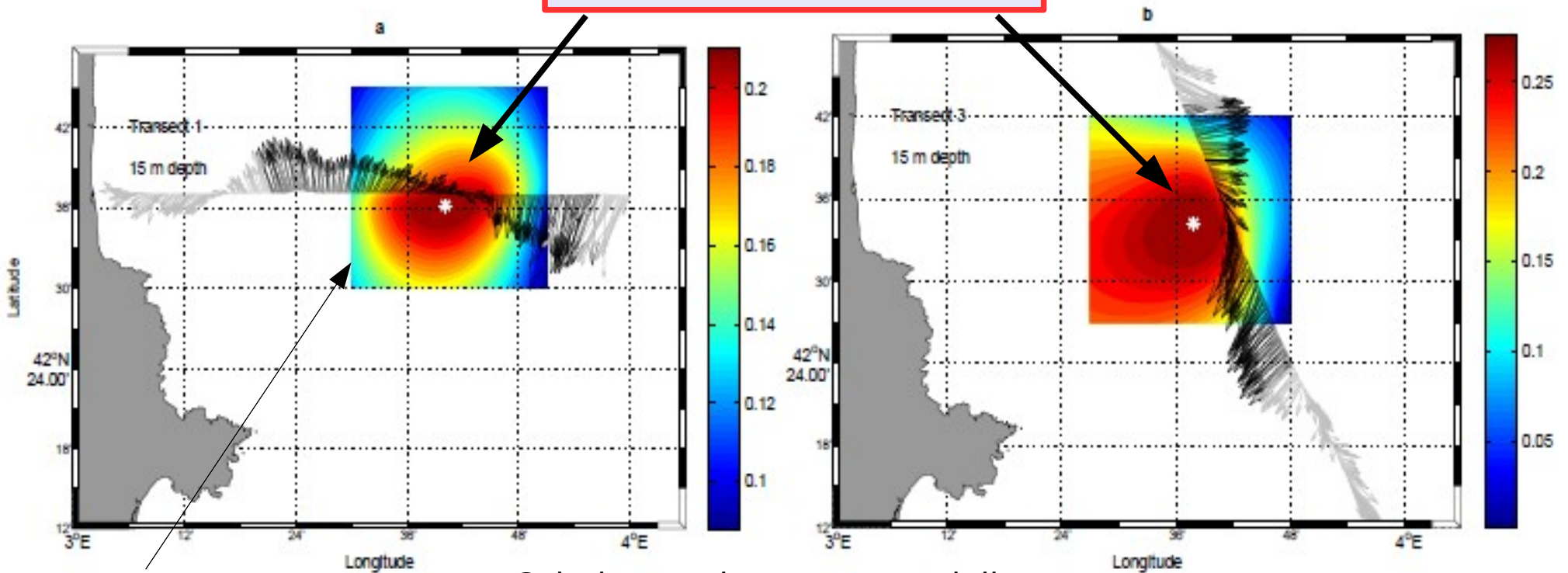
[Hu et al., 2010, JMS, accepté]

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

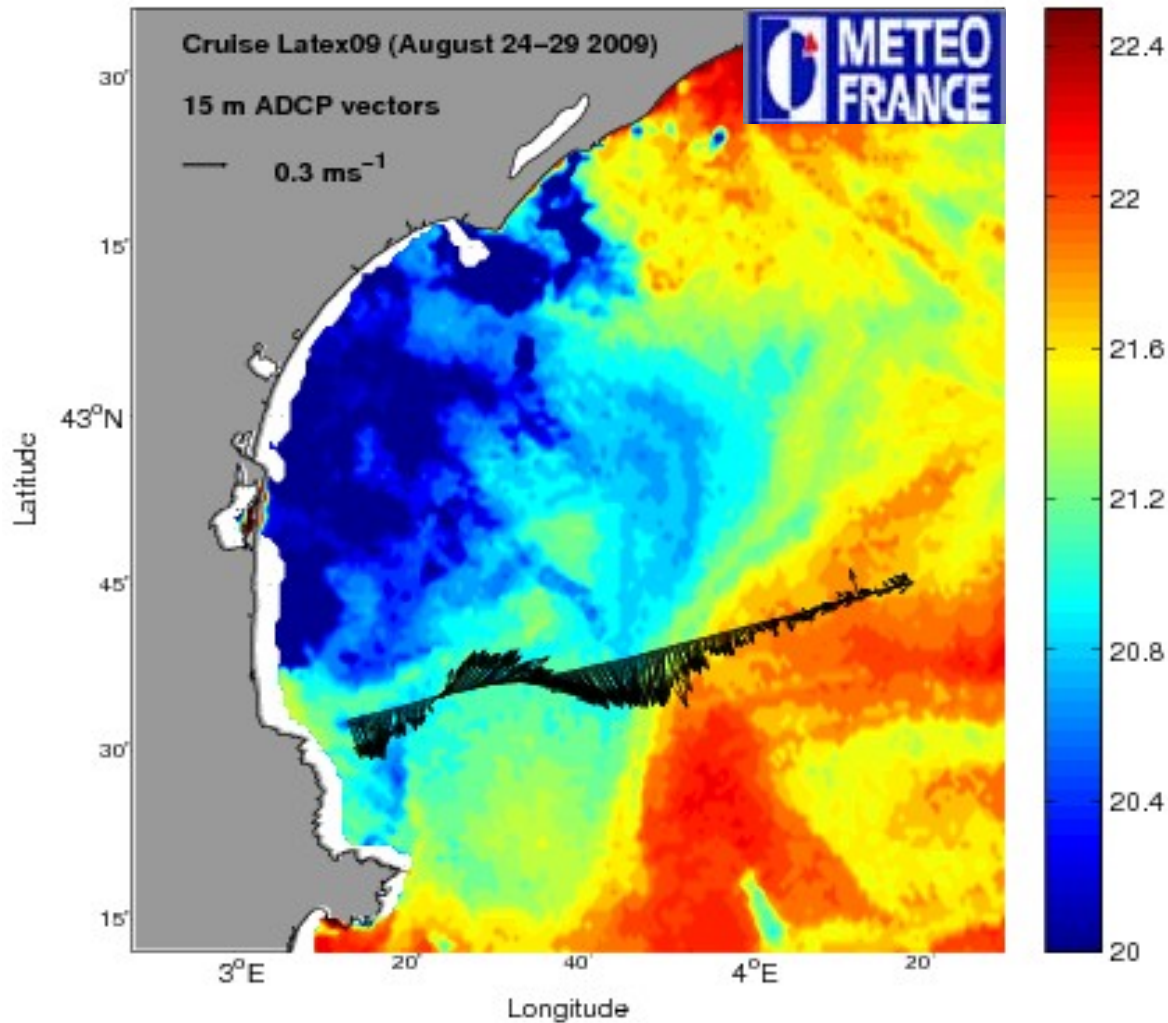


Carré: 30 x 30 pixels

Colorbars - vitesse tangentielle

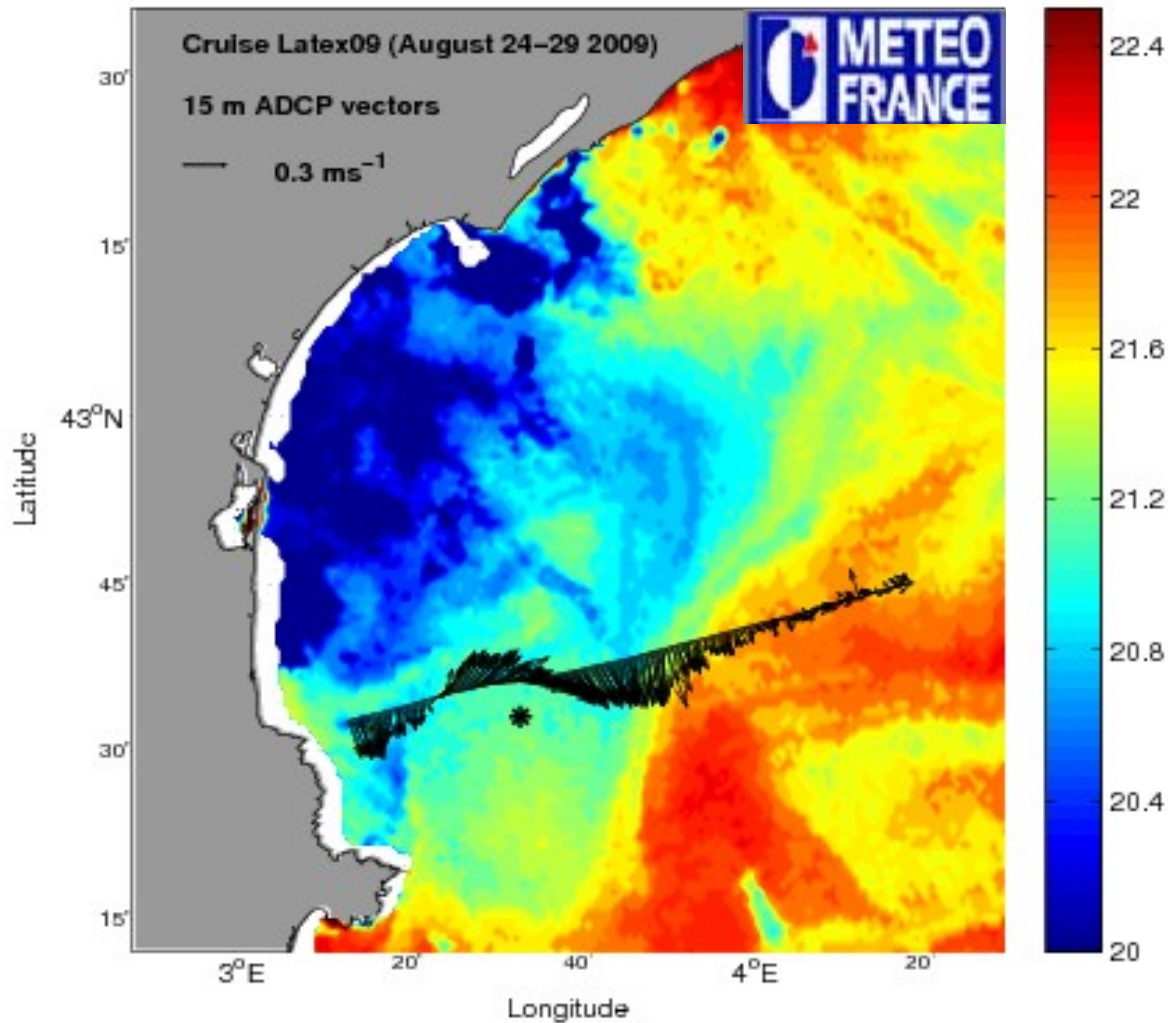
[Hu et al., 2010, JMS, accepté]

Latex09: 24 – 29 août, 2009



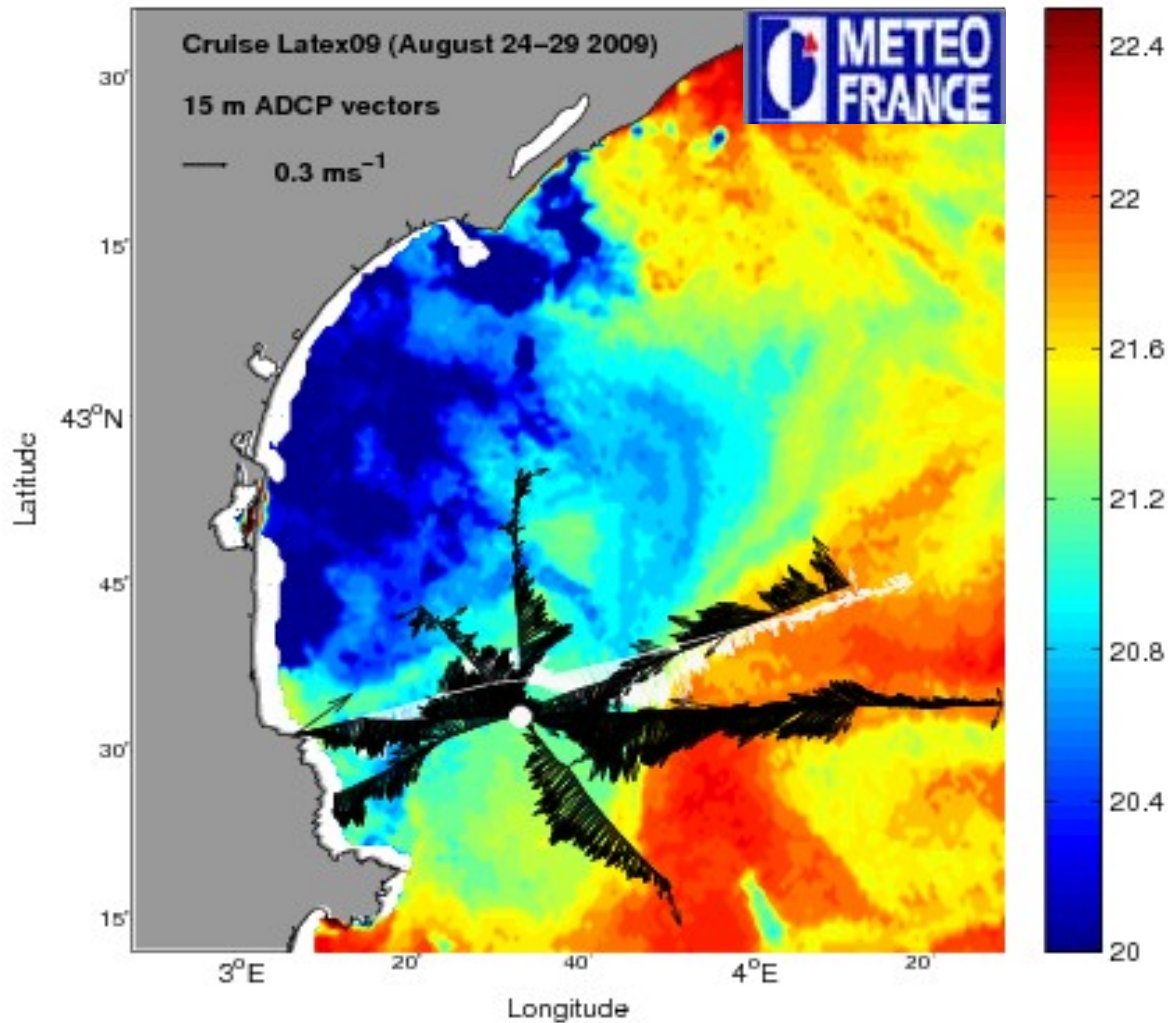
Vecteurs du courant
mesuré par ADCP à 15 m
+
SST

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

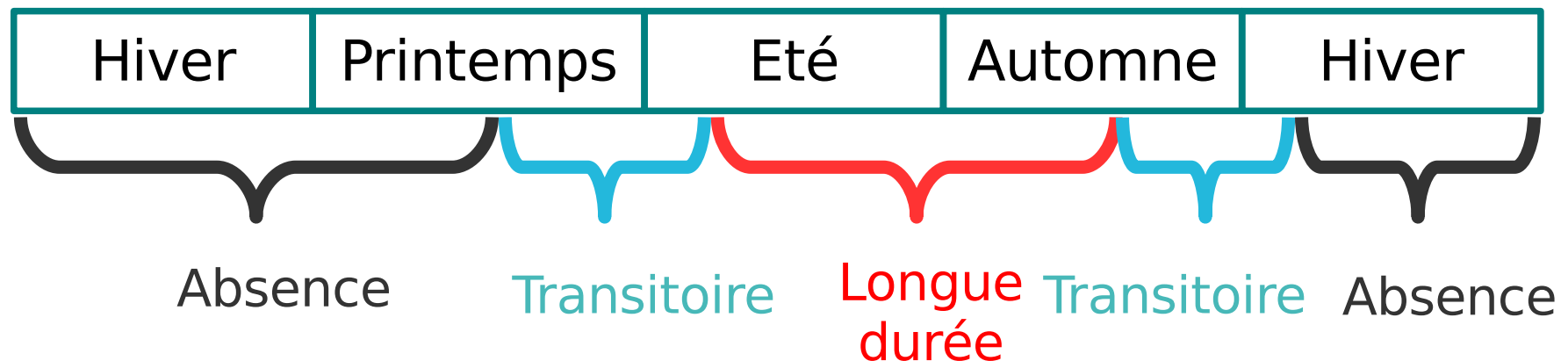
IV. Mécanisme de la génération des tourbillons

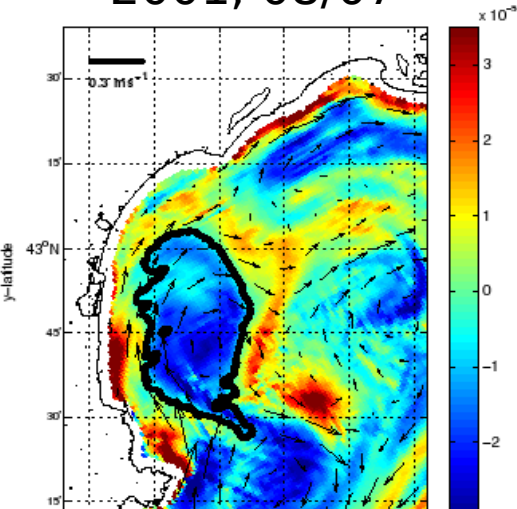
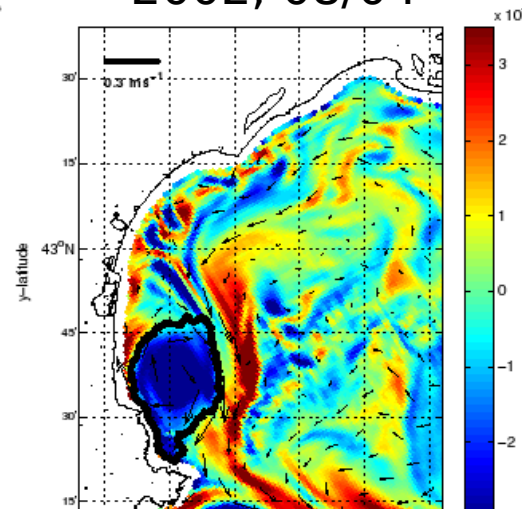
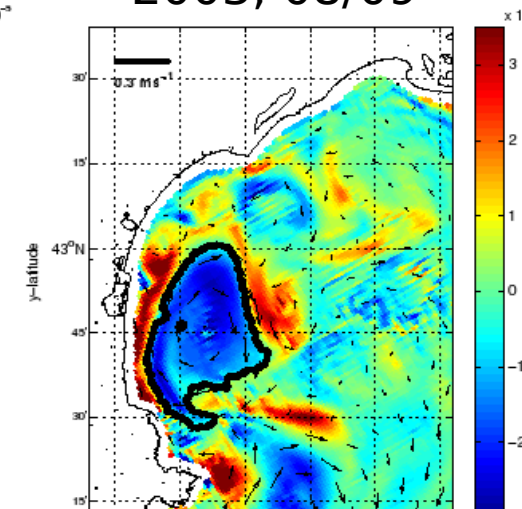
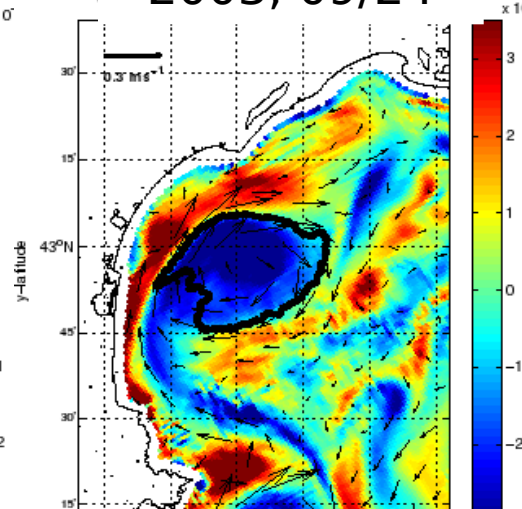
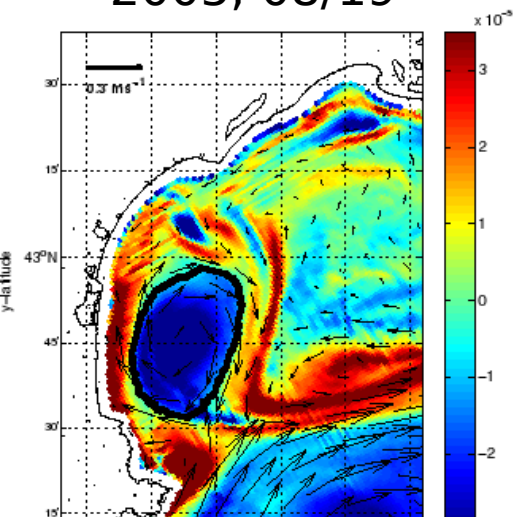
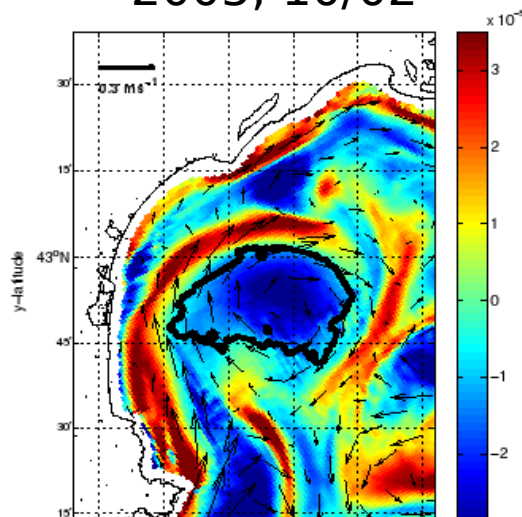
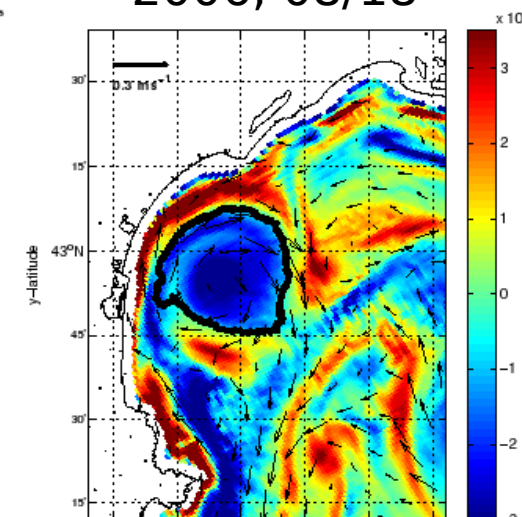
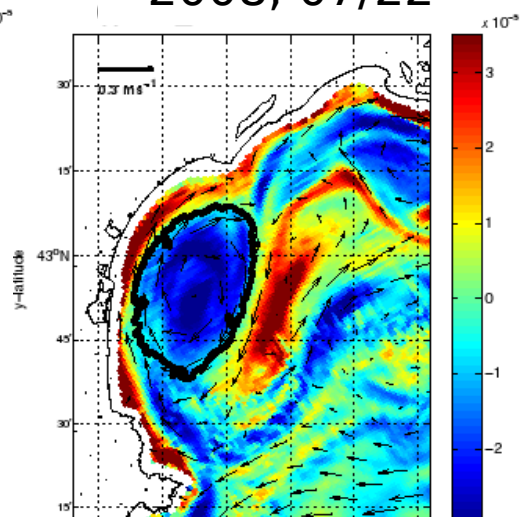
8 ans de simulations: 2001 – 2008

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

Tourbillon 'transitoire' : durée de vie < 15 jours

Présence des tourbillons

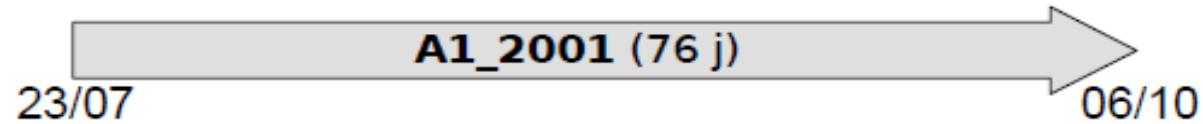


A1_2001
2001, 08/07A1_2002
2002, 08/04A1_2003
2003, 08/09A1_2003
2003, 09/24A1_2005
2005, 08/19A2_2005
2005, 10/02A1_2006
2006, 08/18A1_2008
2008, 07/22

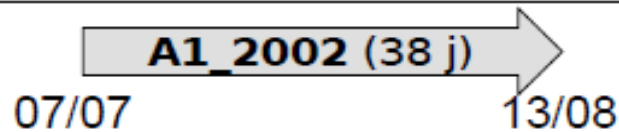
Présence des tourbillons de longue-durée

Année Juillet Août Septembre Octobre

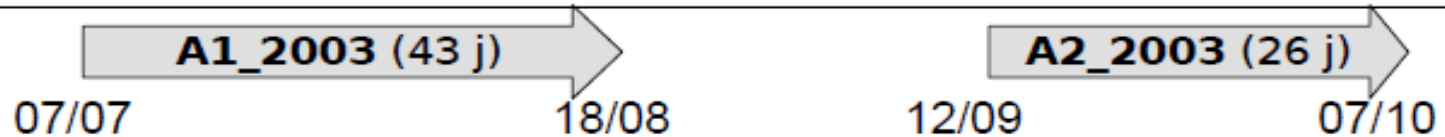
2001



2002



2003

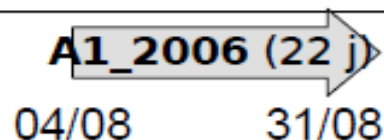


2004

2005

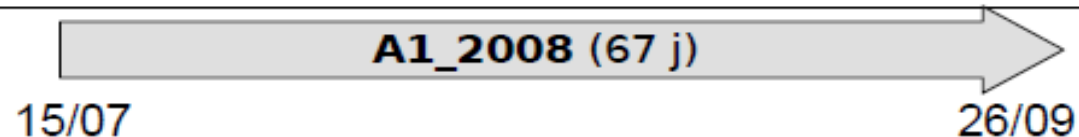


2006



2007

2008



Présence des tourbillons de longue-durée

Année

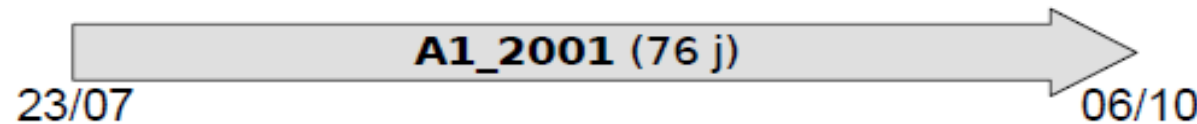
Juillet

Août

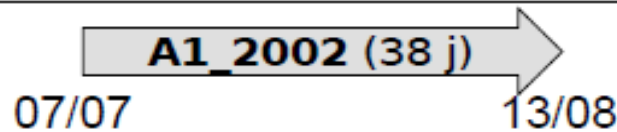
Septembre

Octobre

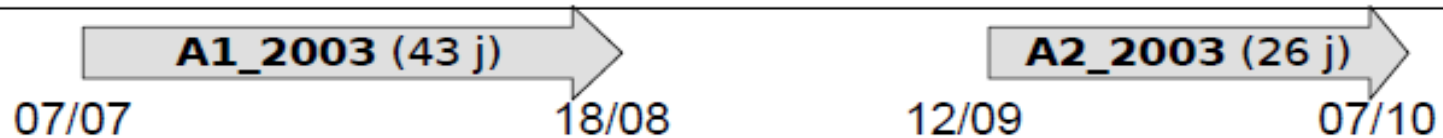
2001



2002



2003

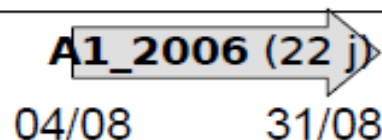
**2004**

Tourbillons transitoires

2005

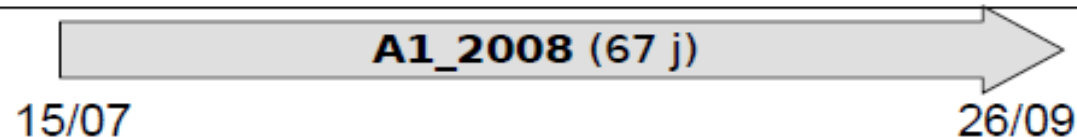


2006

**2007**

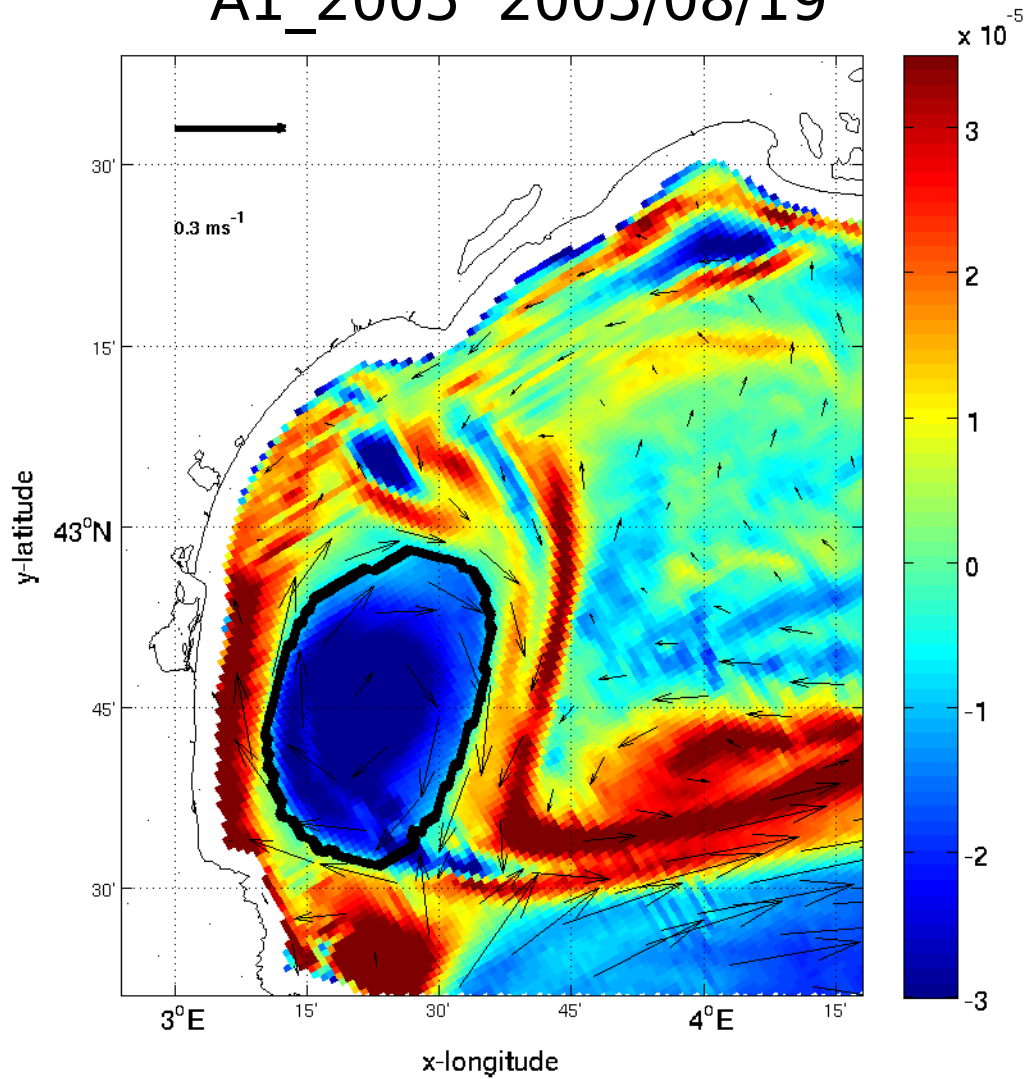
Circulation anticyclonique

2008



Vorticité relative
+
Champs du courant

A1_2005 2005/08/19

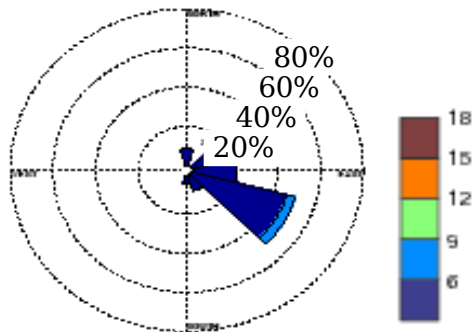


Ex: tourbillon longue-durée
A1_2005

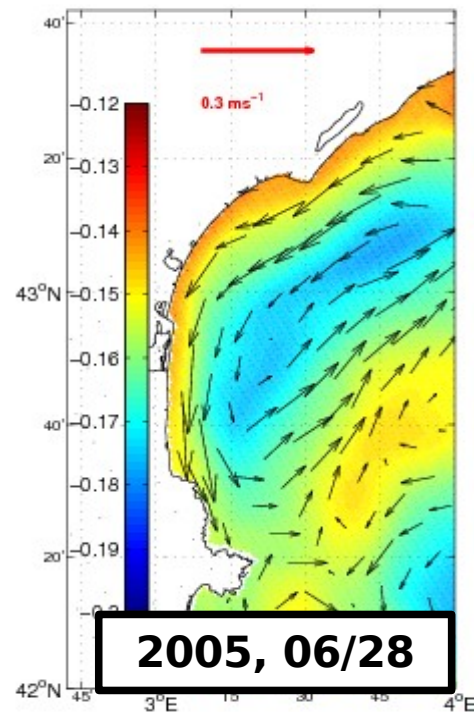
10 juillet → 4 septembre
57 jours

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

Rose du Vent:



2005, 06/26→28

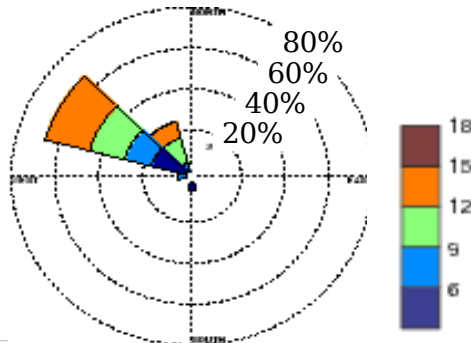


2005, 06/28

Surélévation
+
Courant de surface

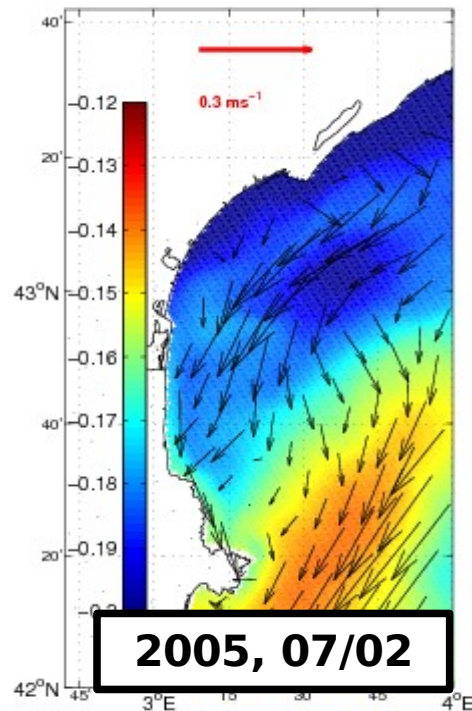
[Millot, 1979, 1982]

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

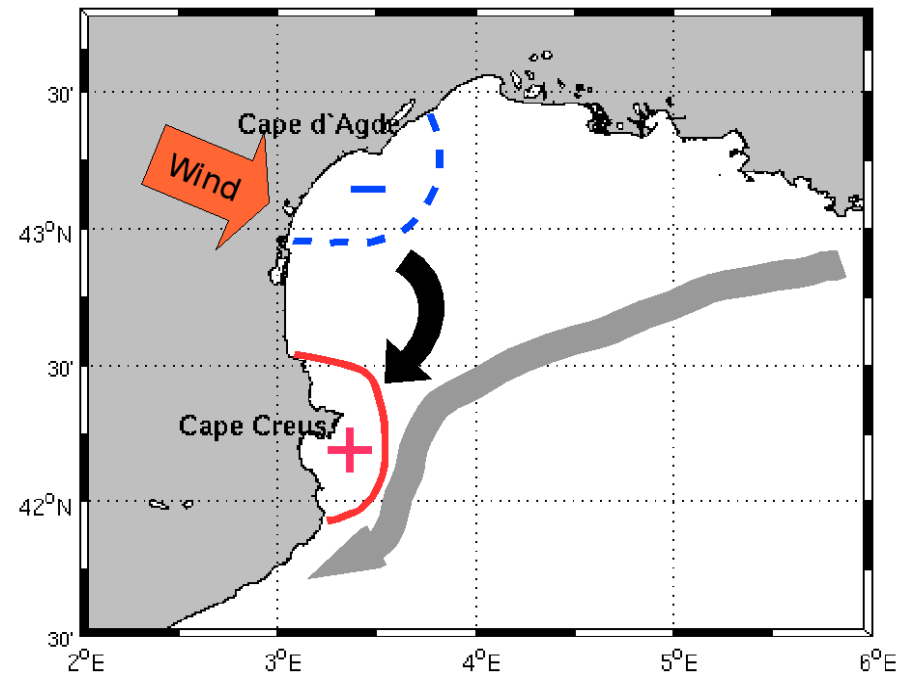


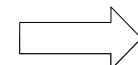



2005, 06/31→07/02

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



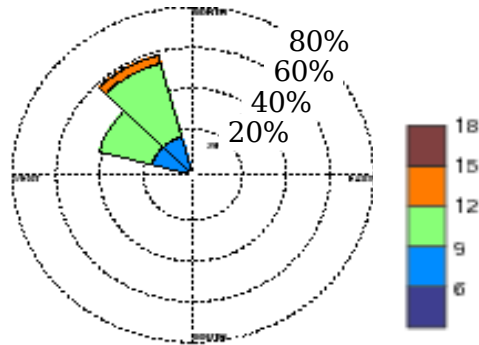
2005, 07/02



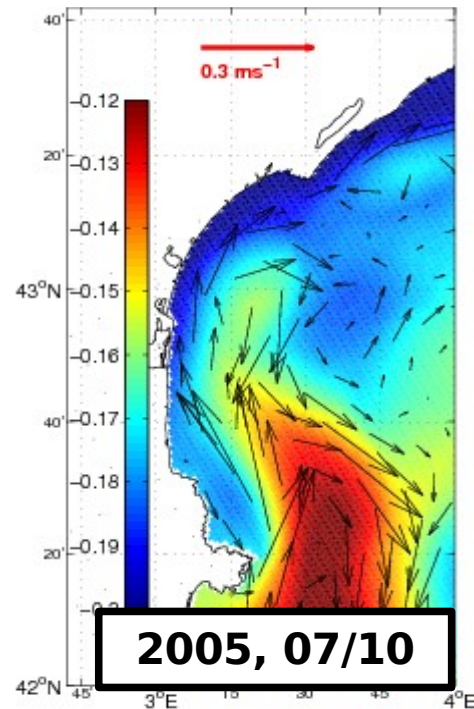
-  Wind
-  Surface current
-   Sea surface level

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

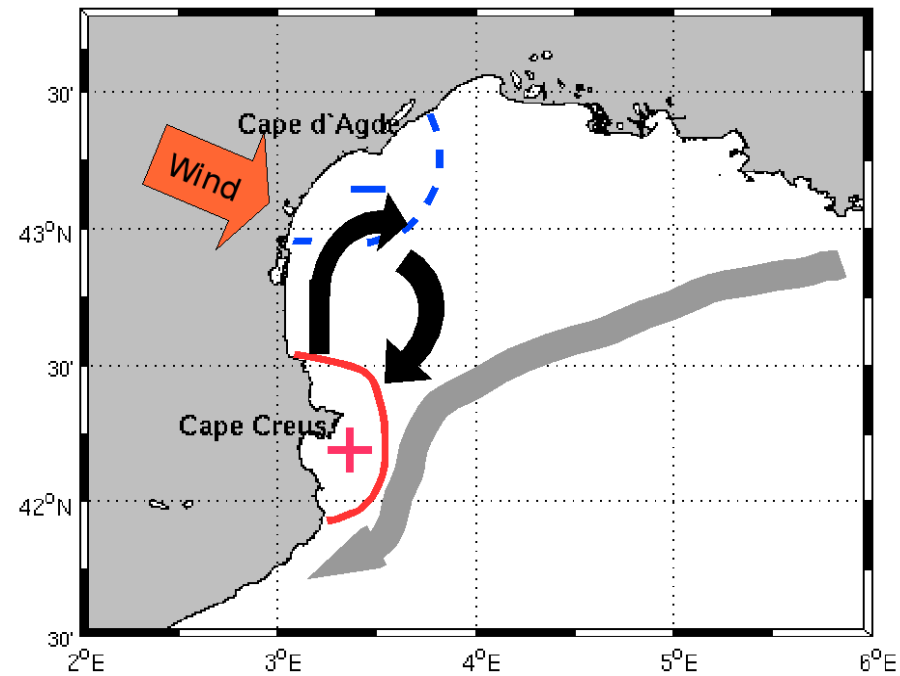
Influence du vent sur le tourbillon (A1_2005: 10/07 → 04/09, 2005)

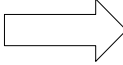
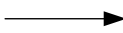



2005, 07/8→10



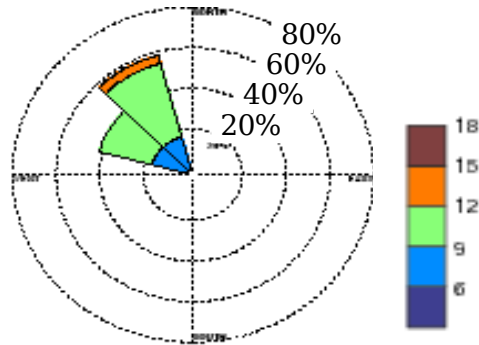
2005, 07/10



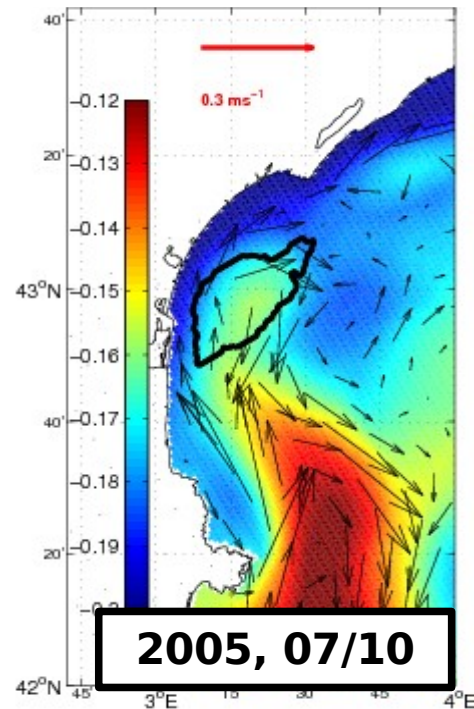
-  Wind
-  Surface current
-  Sea surface level

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

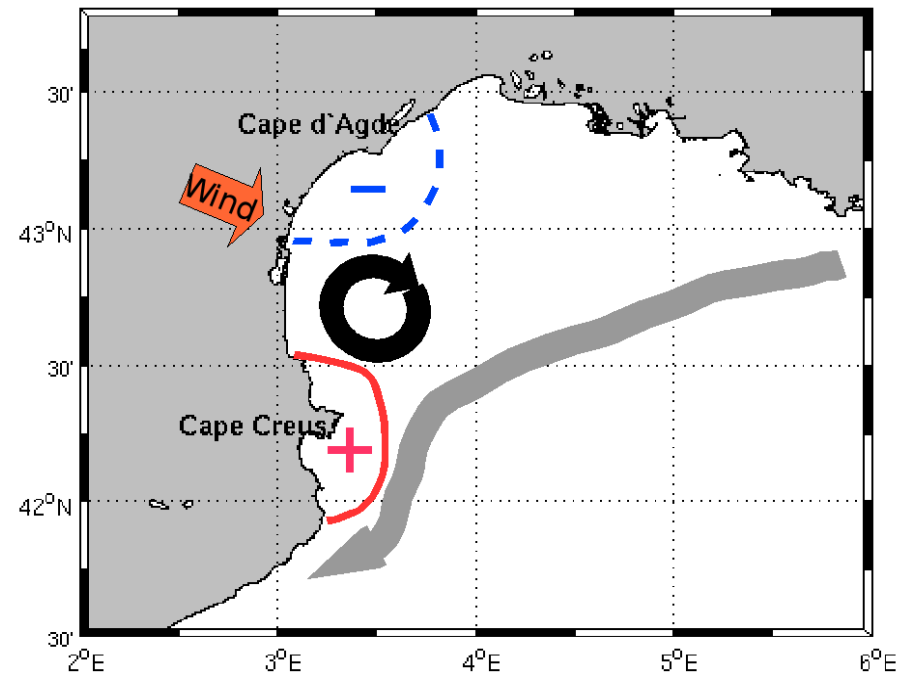
Influence du vent sur le tourbillon (A1_2005: 10/07 → 04/09, 2005)


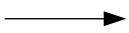



2005, 07/8→10



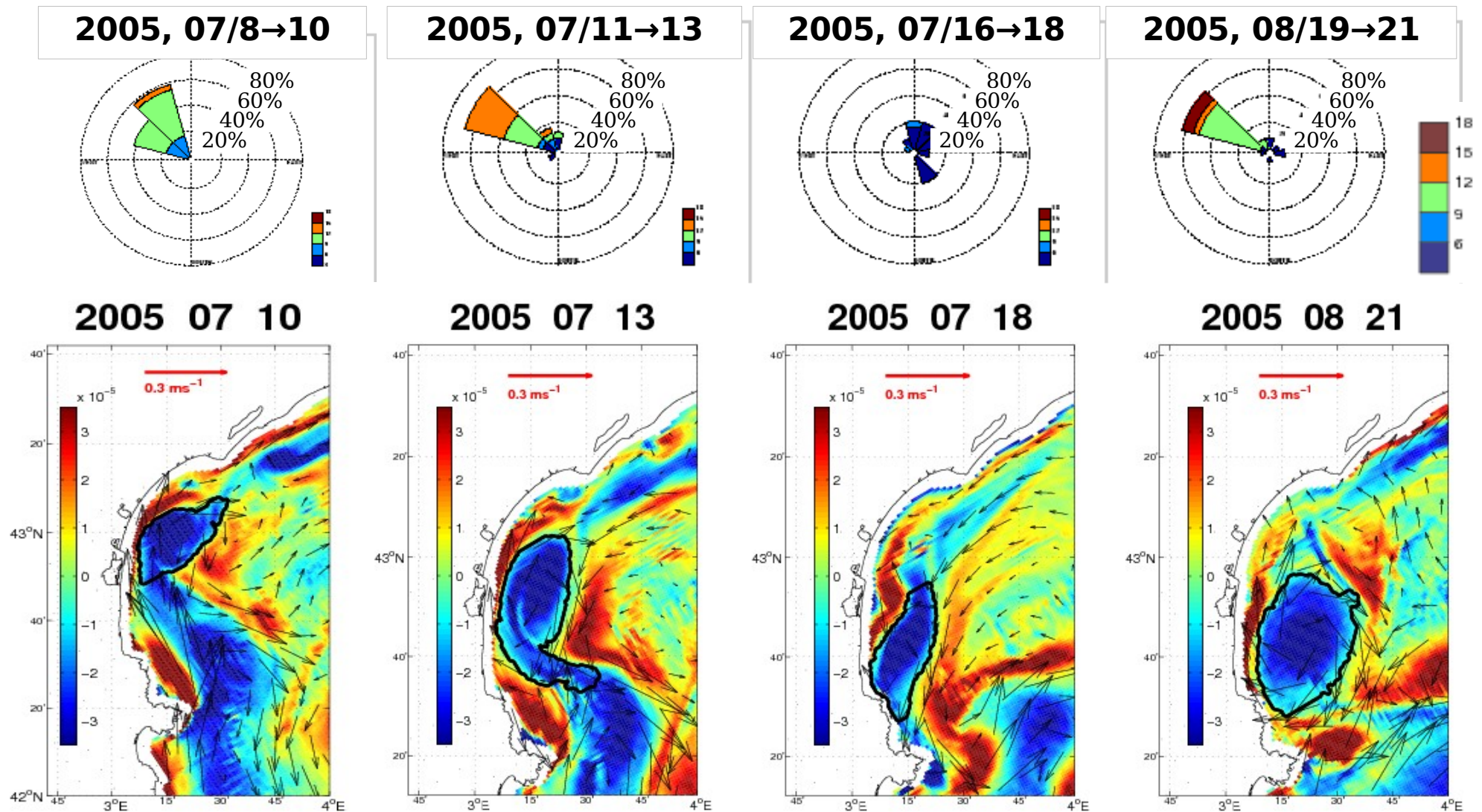
2005, 07/10



-  Wind
-  Surface current
-  Sea surface level

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

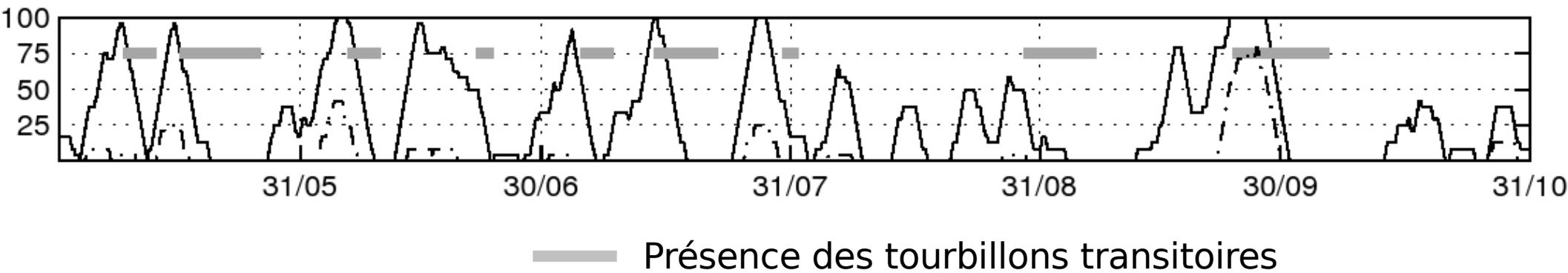
Influence du vent sur le tourbillon (A1_2005: 10/07 → 04/09, 2005)



Cas spécial 1: 2004 – Tourbillons transitoires

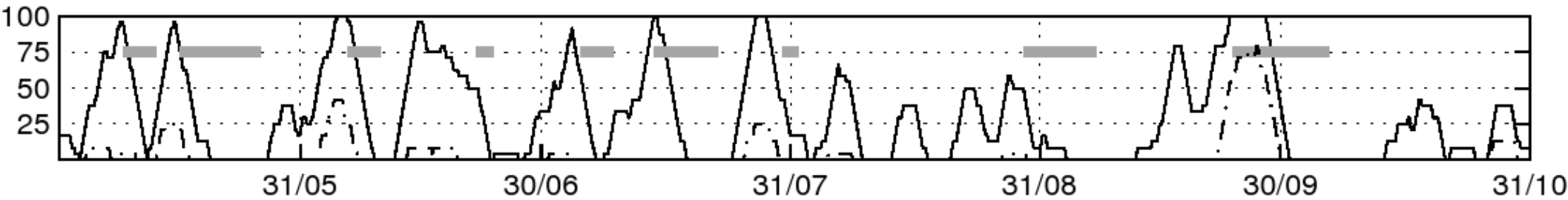
Cas spécial I: 2004 – Tourbillons transitoires

Pourcentage de la Tramontane en **2004**

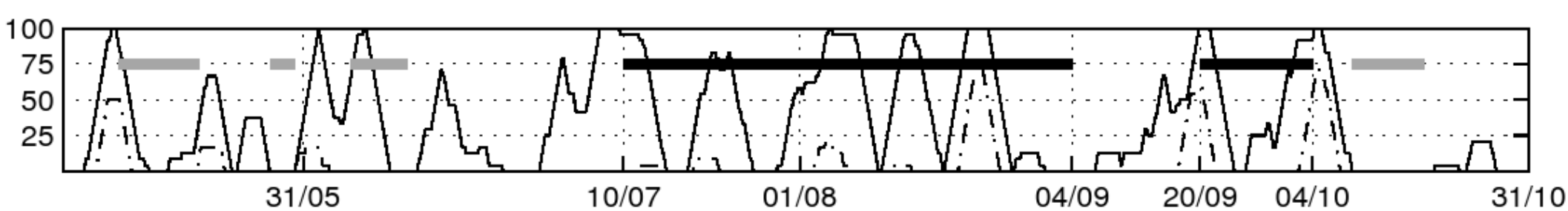


Cas spécial I: 2004 – Tourbillons transitoires

Pourcentage de la Tramontane en **2004**



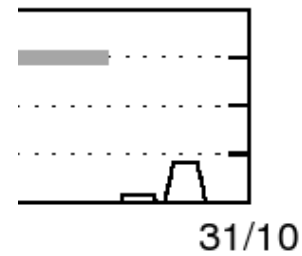
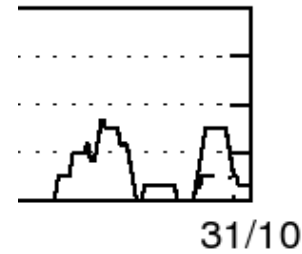
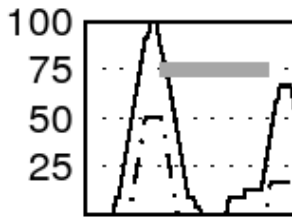
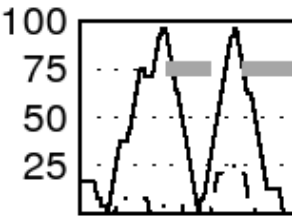
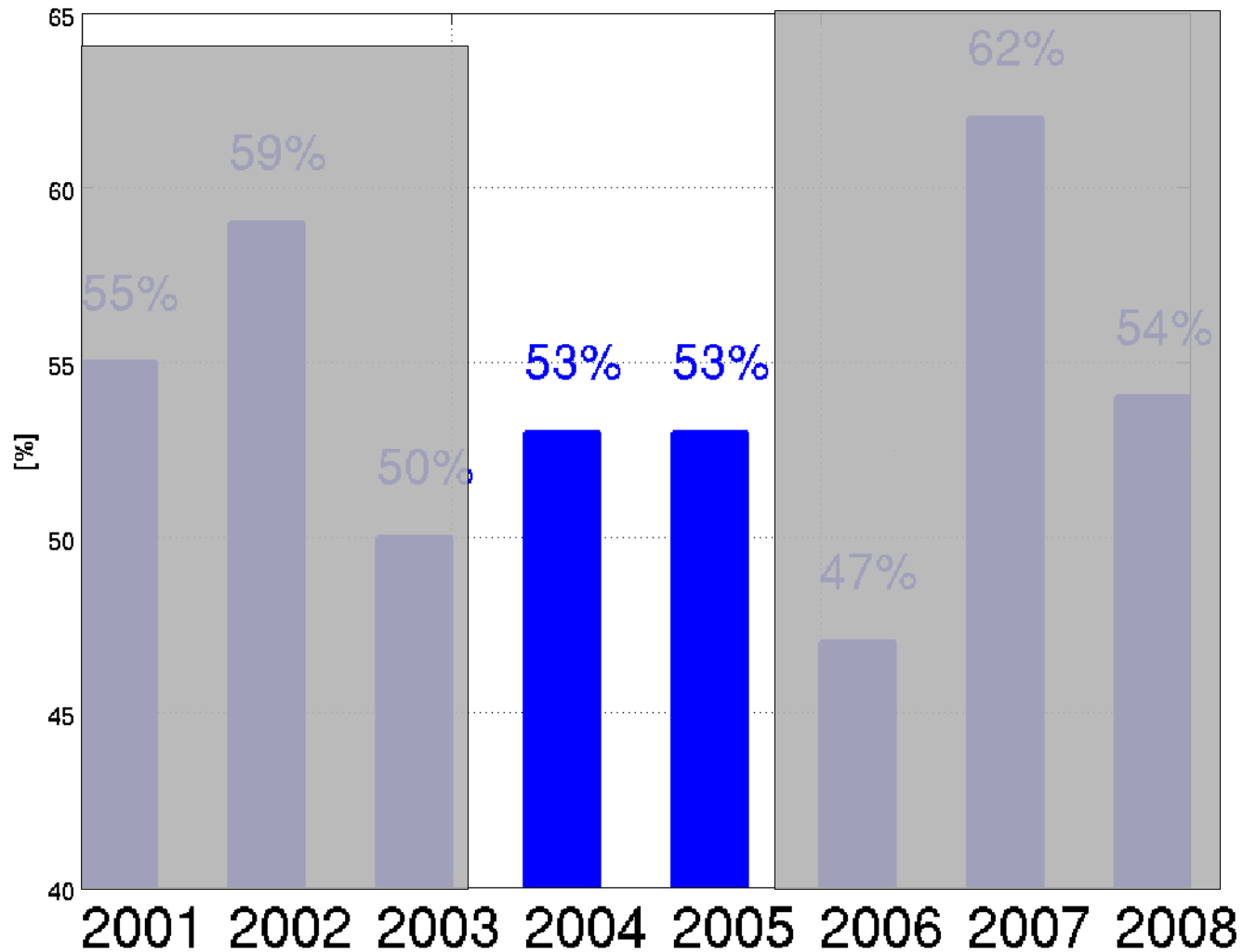
Pourcentage de la Tramontane en **2005**



— Tourbillons transitoires

— Tourbillons de longue-durée

pourcentage de la Tramontane [%]: Mai - Octobre



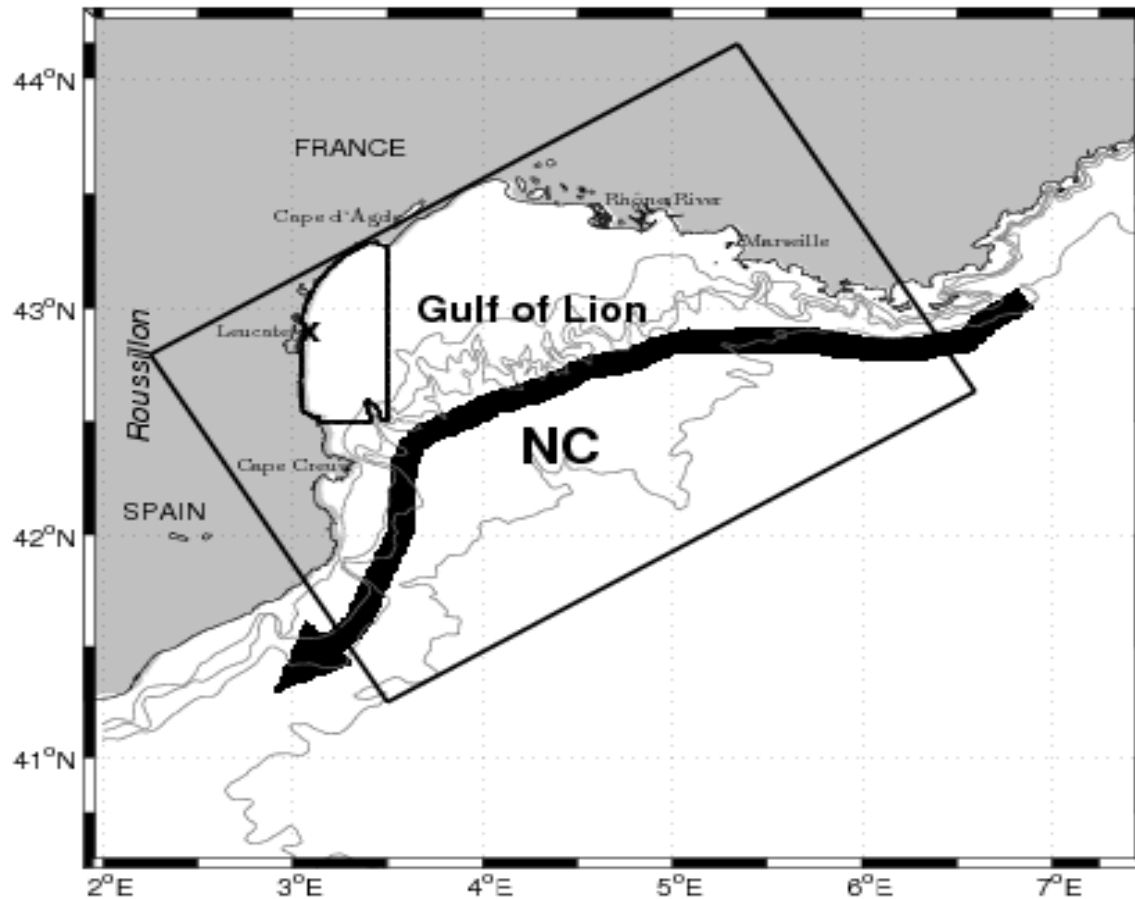
urée

Influence de la stratification sur le tourbillon

Anomalie d'énergie potentielle

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

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



Φ élevé



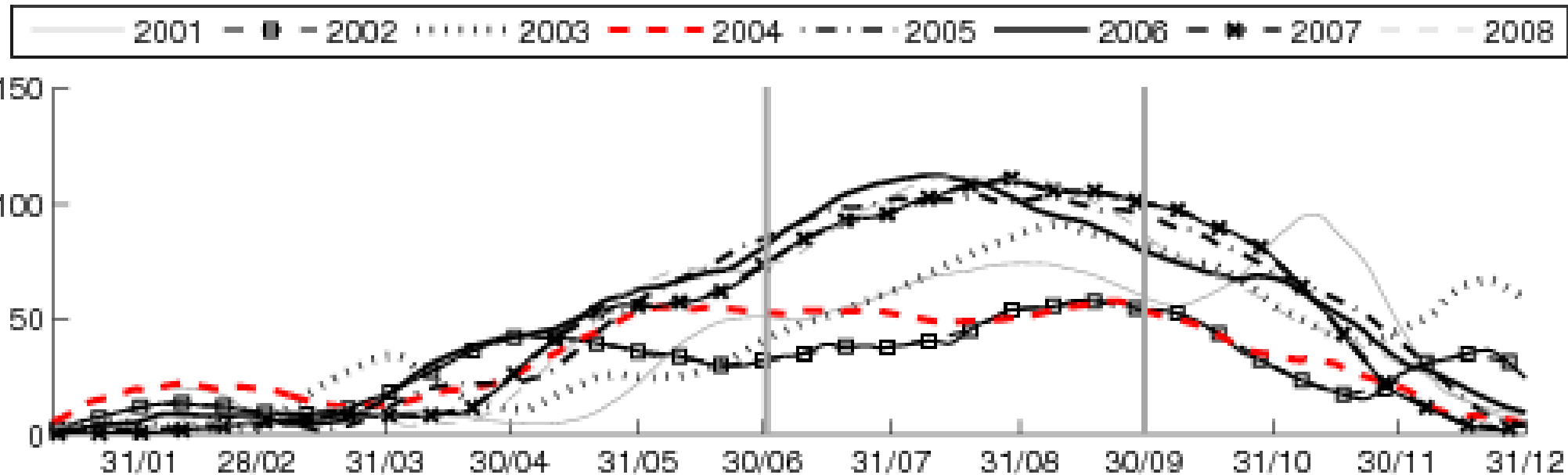
Stratification plus forte

Influence de la stratification sur le tourbillon

Anomalie d'énergie potentielle

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

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

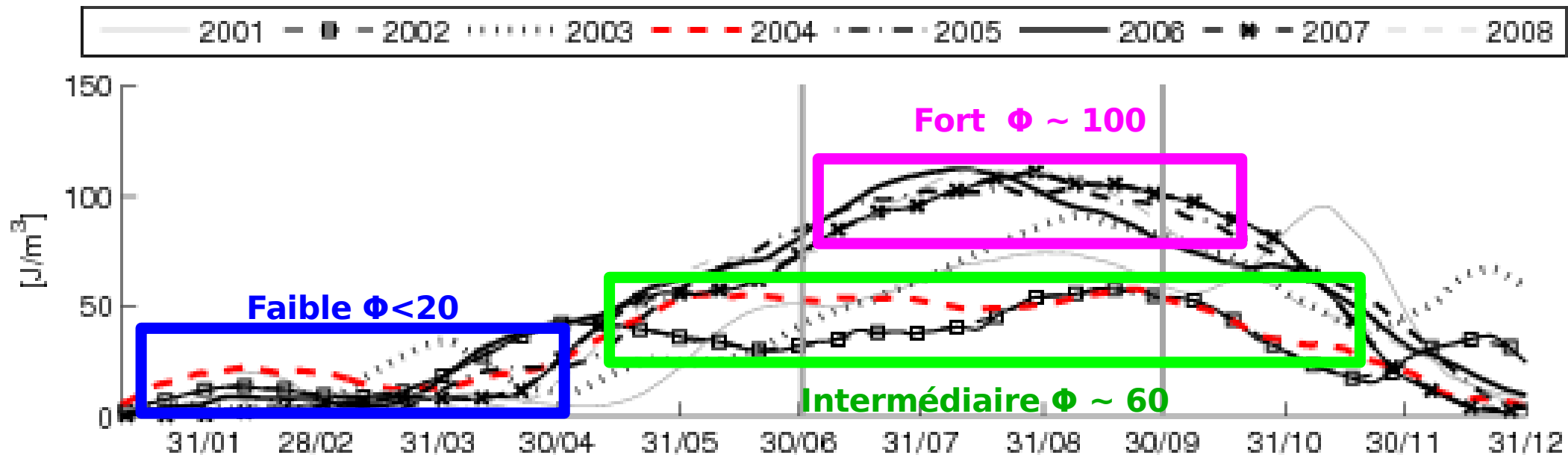


Influence de la stratification sur le tourbillon

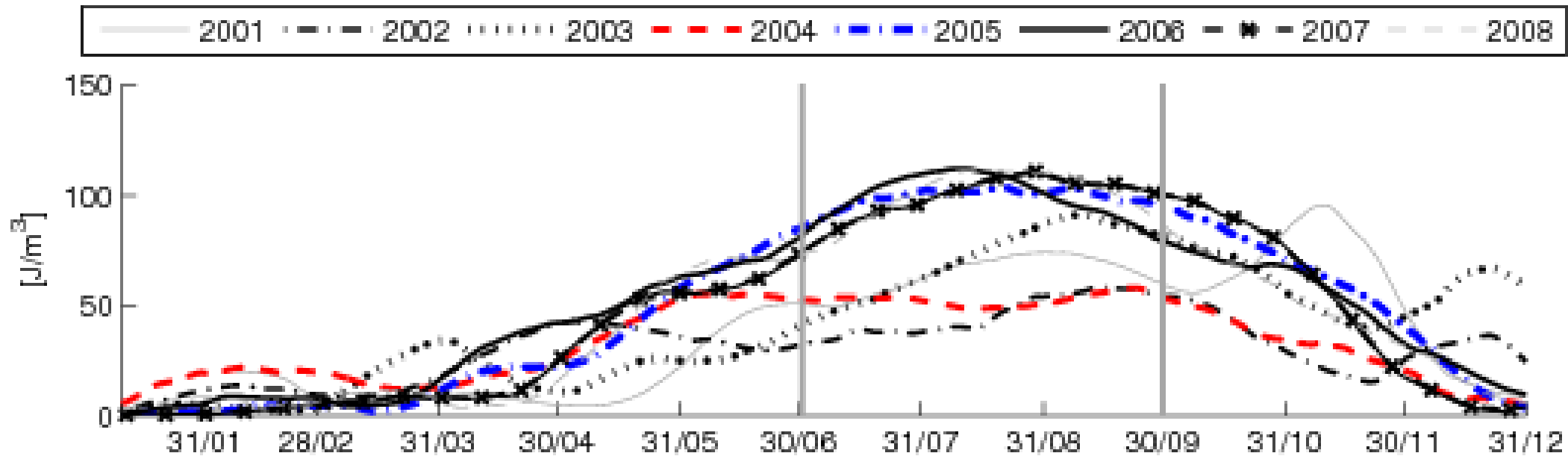
Anomalie d'énergie potentielle

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

[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

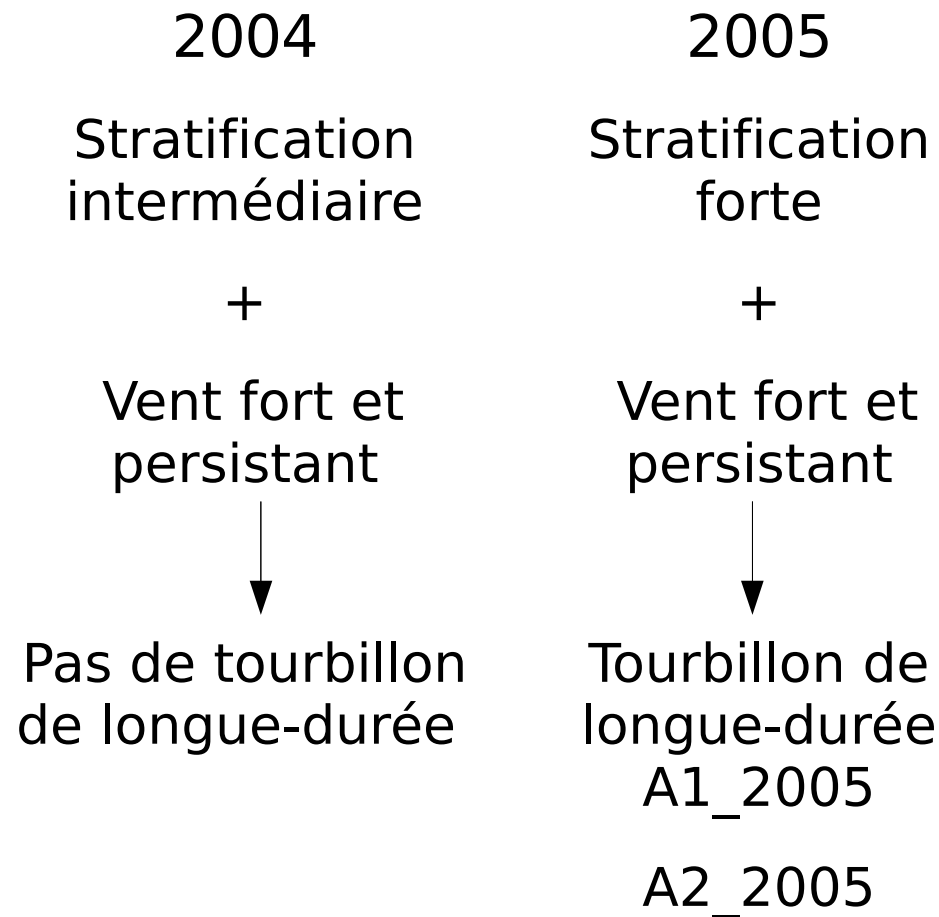
2004

Stratification intermédiaire

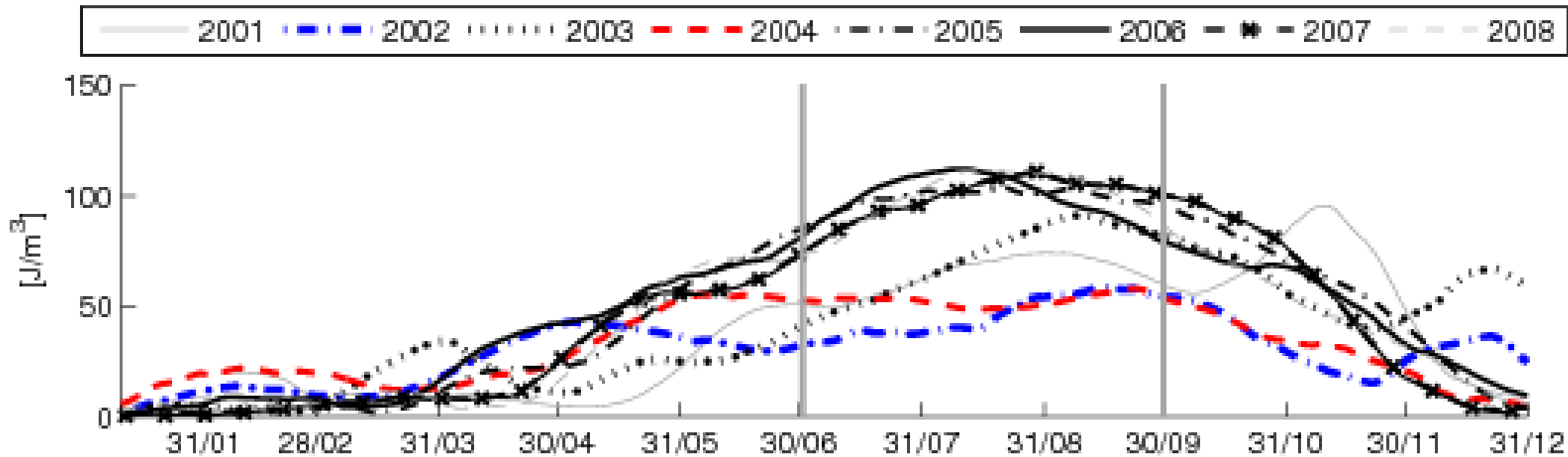


Pas de tourbillon de longue-
durée

Influence de la stratification sur le tourbillon



Influence de la stratification sur le tourbillon



2002

Stratification intermédiaire



Tourbillon de longue-durée
A1_2002

?

2004

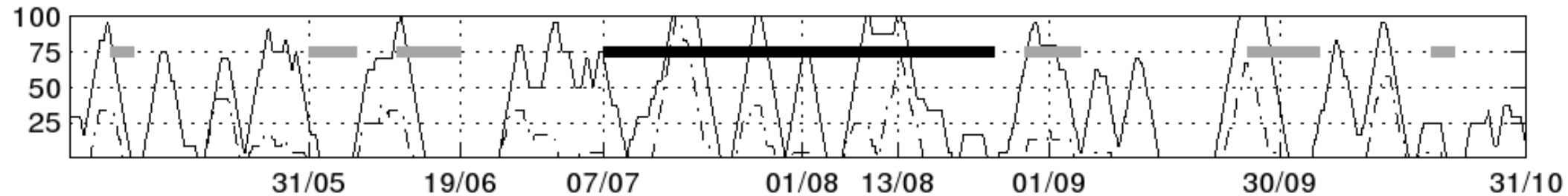
Stratification intermédiaire



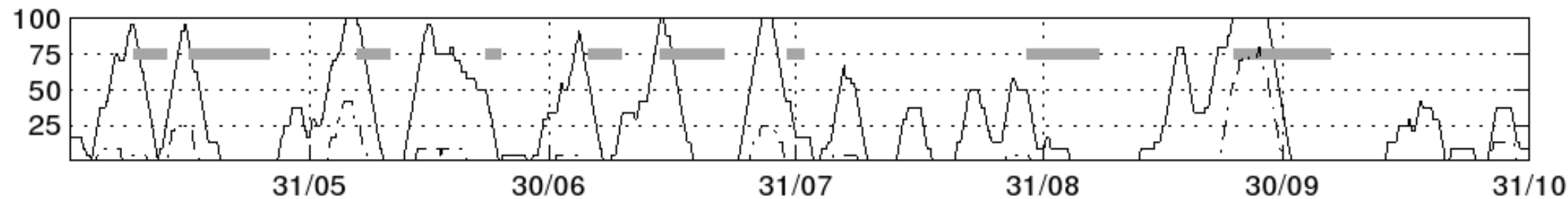
Pas de tourbillon de longue-
durée

Influence du vent et de la stratification sur le tourbillon

Pourcentage de la Tramontane en **2002**



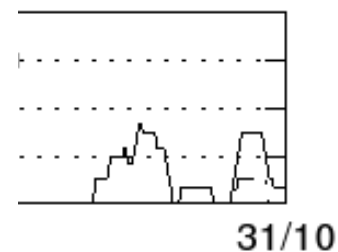
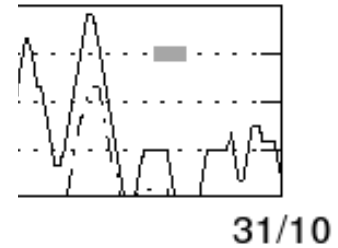
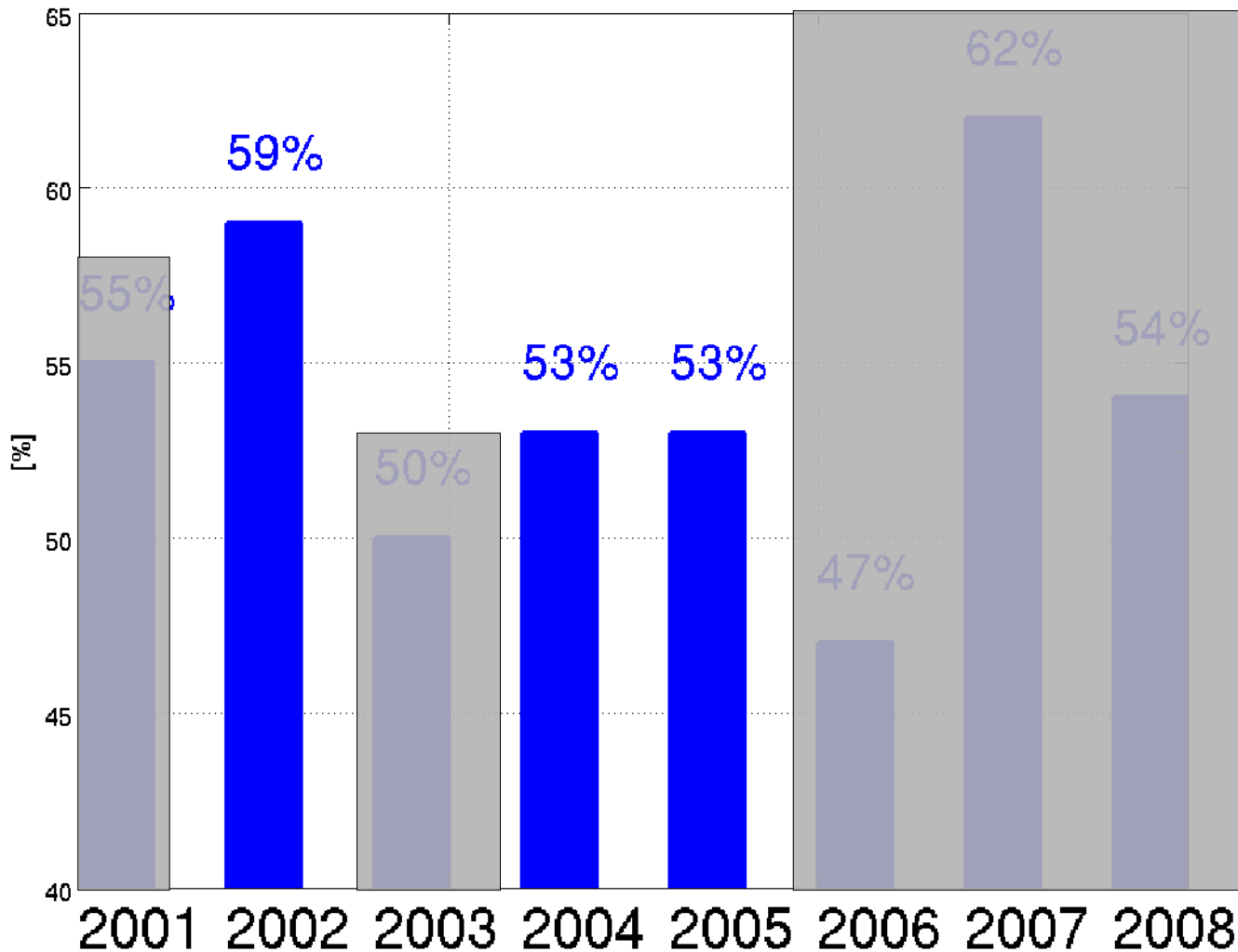
Pourcentage de la Tramontane en **2004**



— Tourbillons transitoires

— Tourbillons de longue-durée

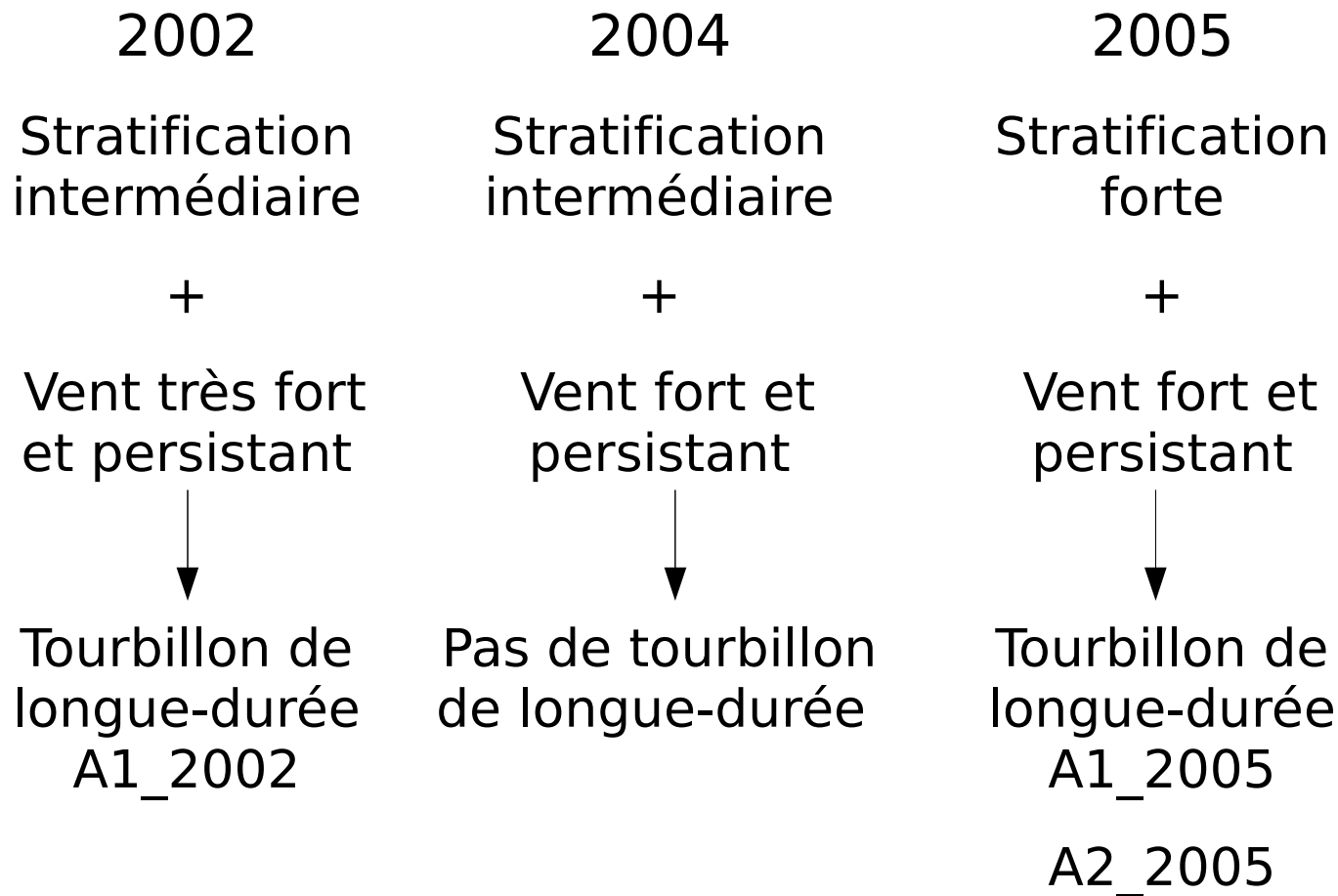
pourcentage de la Tramontane [%]: Mai - Octobre



durée

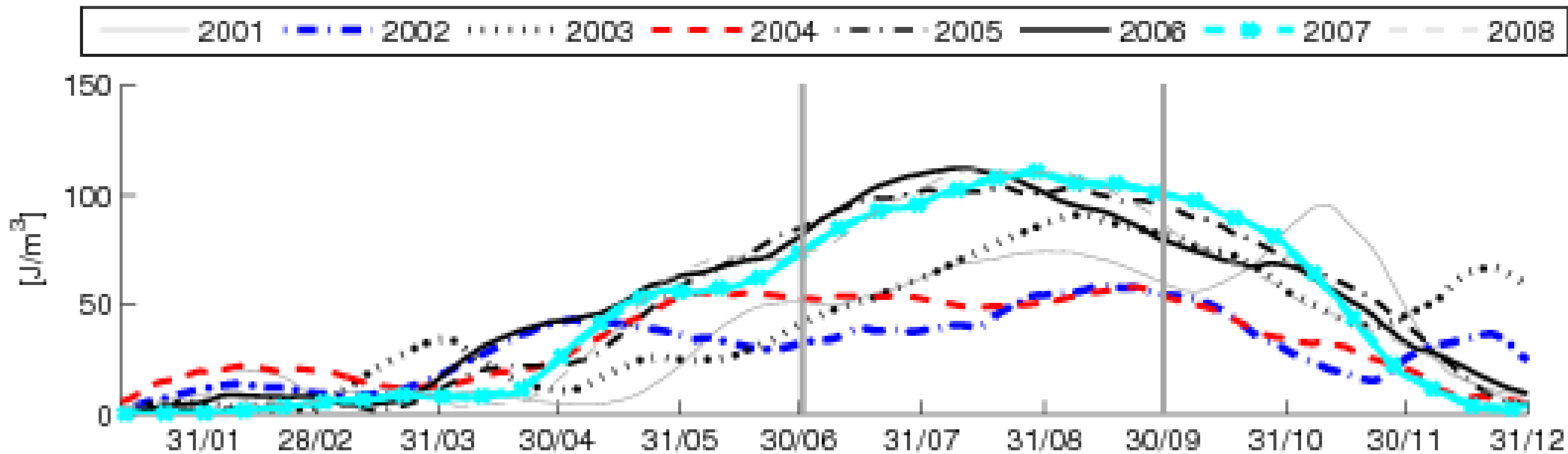
2002: Vent très fort et persistant

Influence du vent et de la stratification sur le tourbillon



Influence du vent et de la stratification sur le tourbillon

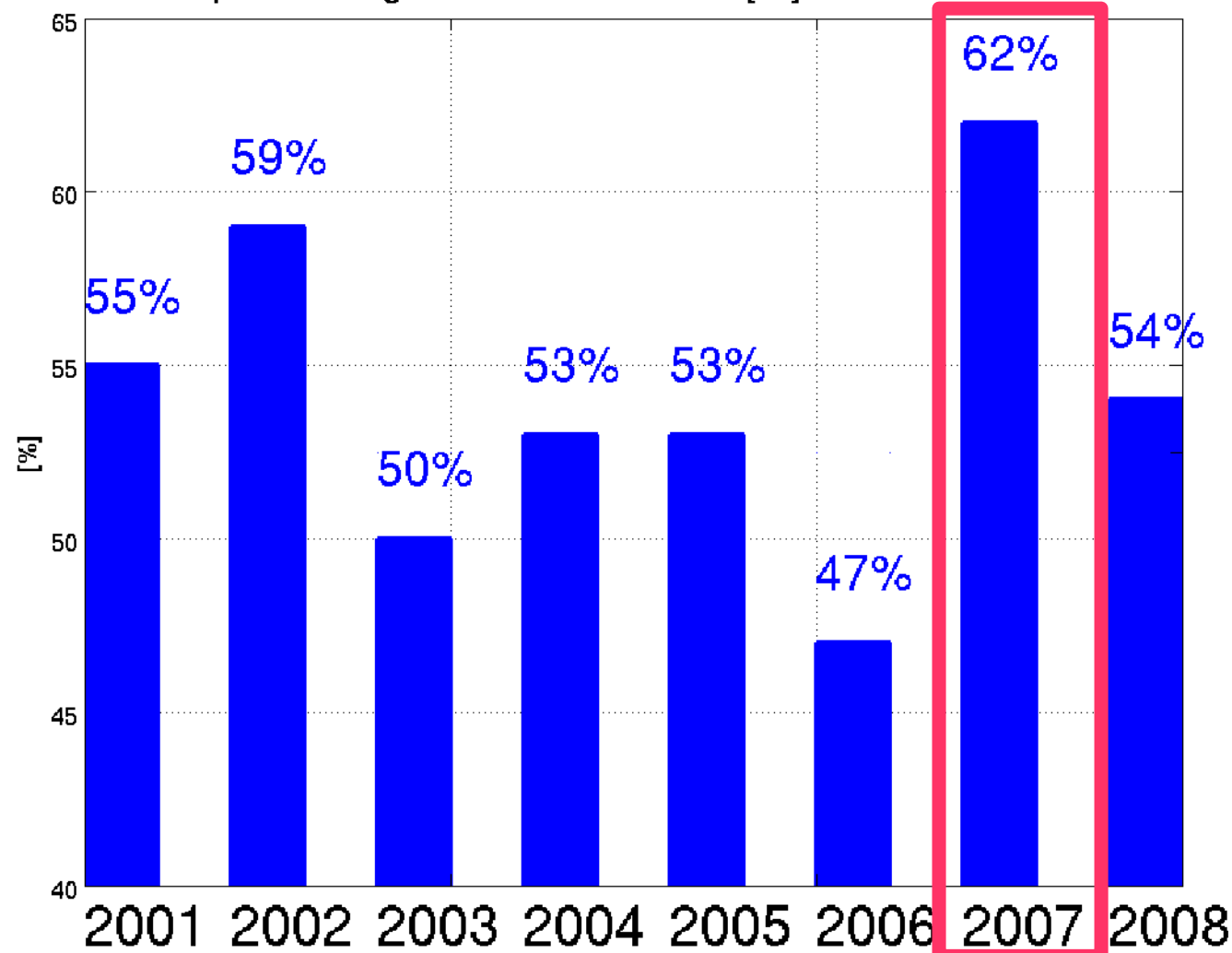
Cas spécial II: 2007 Stratification forte



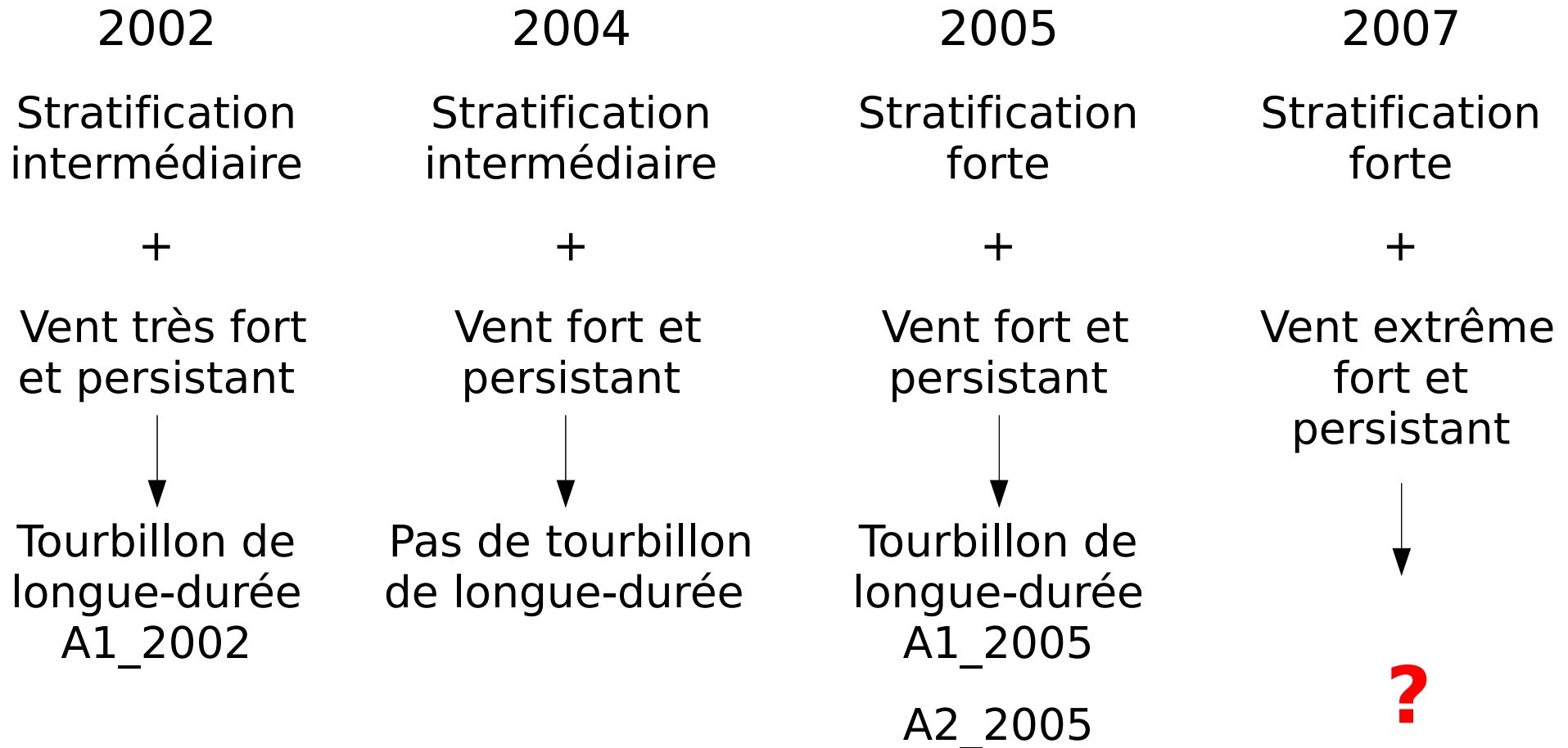
Influence du vent et de la stratification sur le tourbillon

Cas spécial II: 2007 Vent très fort et persistant

pourcentage de la Tramontane [%]: Mai - Octobre

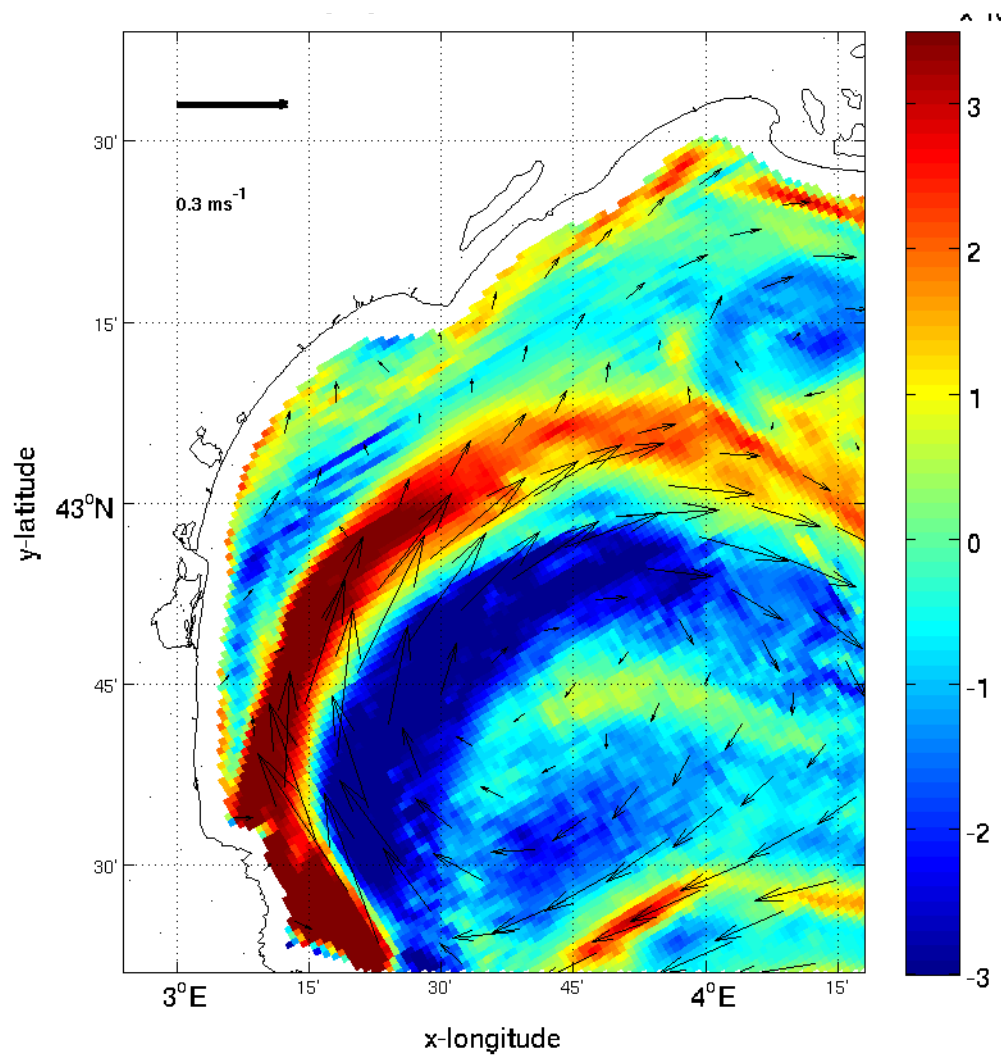


Influence du vent et de la stratification sur le tourbillon



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

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

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

Loaboratoires 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....

.....