

# Modélisation des tourbillons méso-échelles anticycloniques en mer de Ligure - CROCO

[OPB205] Modélisation 3D Océanique

**M1 - Sciences de la Mer**

*Océanographie physique et biogéochimique*

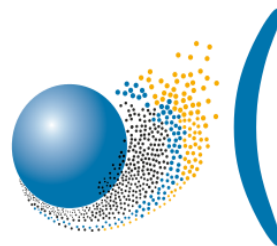
07 avril 2023

**Présenté par :**  
Benoit CHAMBON

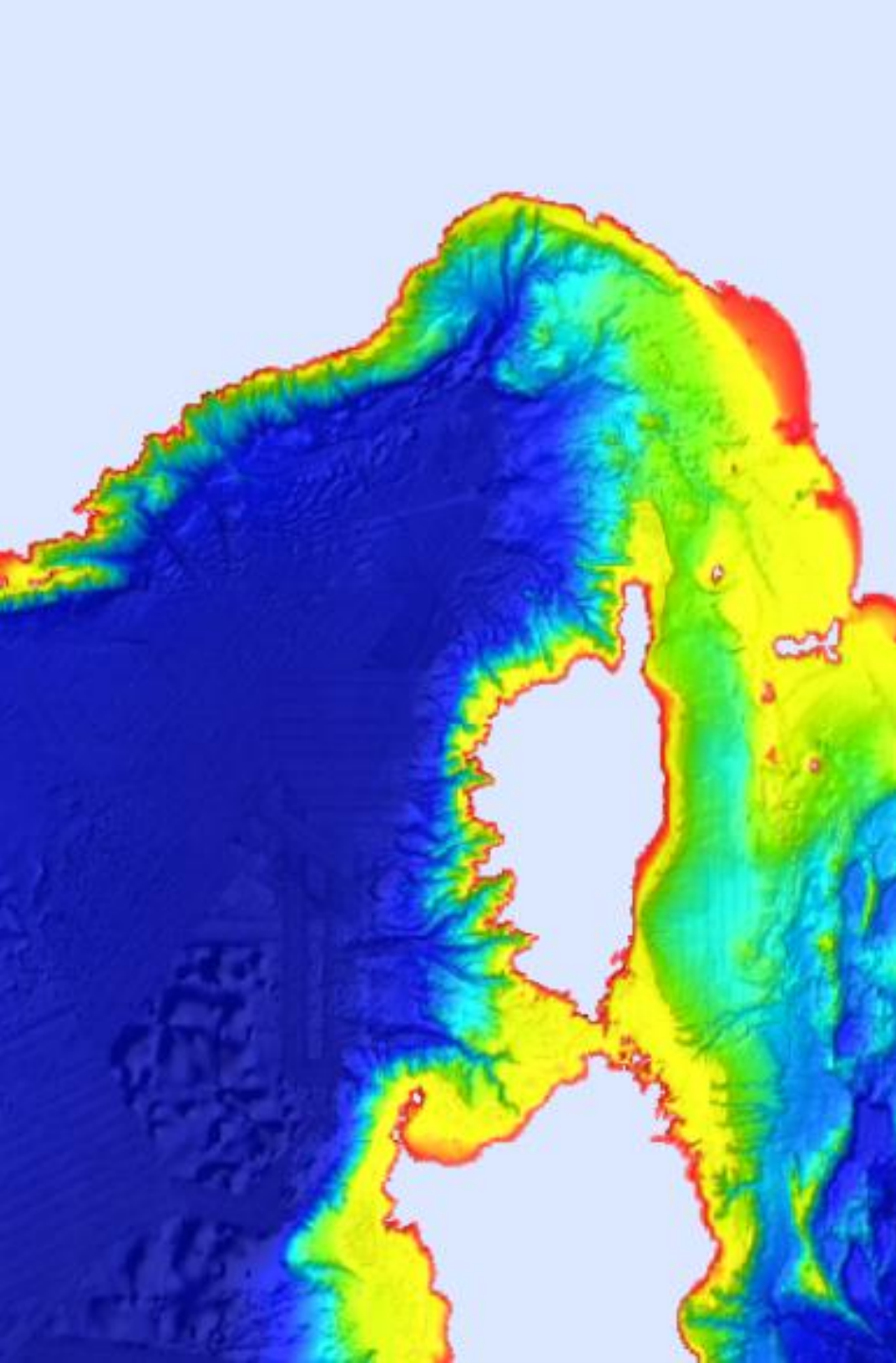
**Enseignant :**  
Andrea DOGLIOLI



Coastal and Regional Ocean COmmunity model



**Institut Pythéas**  
**Observatoire des Sciences de l'Univers**  
Aix-Marseille Université



## Article référent :

Journal of Marine Systems 88 (2011) 12–19

Contents lists available at ScienceDirect

 **ELSEVIER**

**Journal of Marine Systems**

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/jmarsys](http://www.elsevier.com/locate/jmarsys)



---

Mesoscale vortices in the Ligurian Sea and their effect on coastal upwelling processes

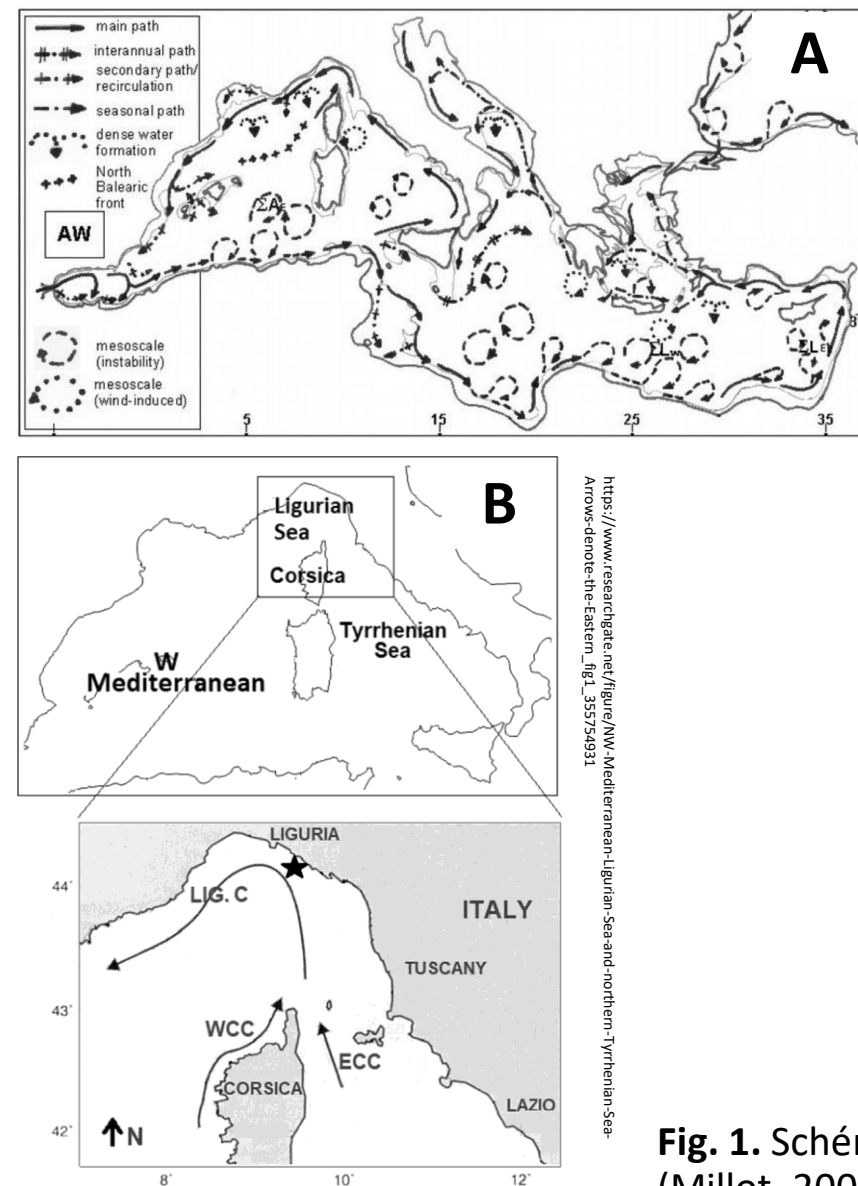
Elisa Casella <sup>a,\*</sup>, Anne Molcard <sup>b</sup>, Antonello Provenzale <sup>c</sup>

<sup>a</sup> CIMA Research Foundation, University Campus, Via Armando Magliotto 2, I-17100 Savona, Italy

<sup>b</sup> Laboratoire de Sondages Electromagnétiques de l'Environnement Terrestre (LSEET), Université du Sud Toulon-Var, Batiment F, BP 20132, 83957 La Garde Cedex, France

<sup>c</sup> Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima (ISAC), Consiglio Nazionale delle Ricerche, Corso Fiume 4, I-10133 Torino, Italy

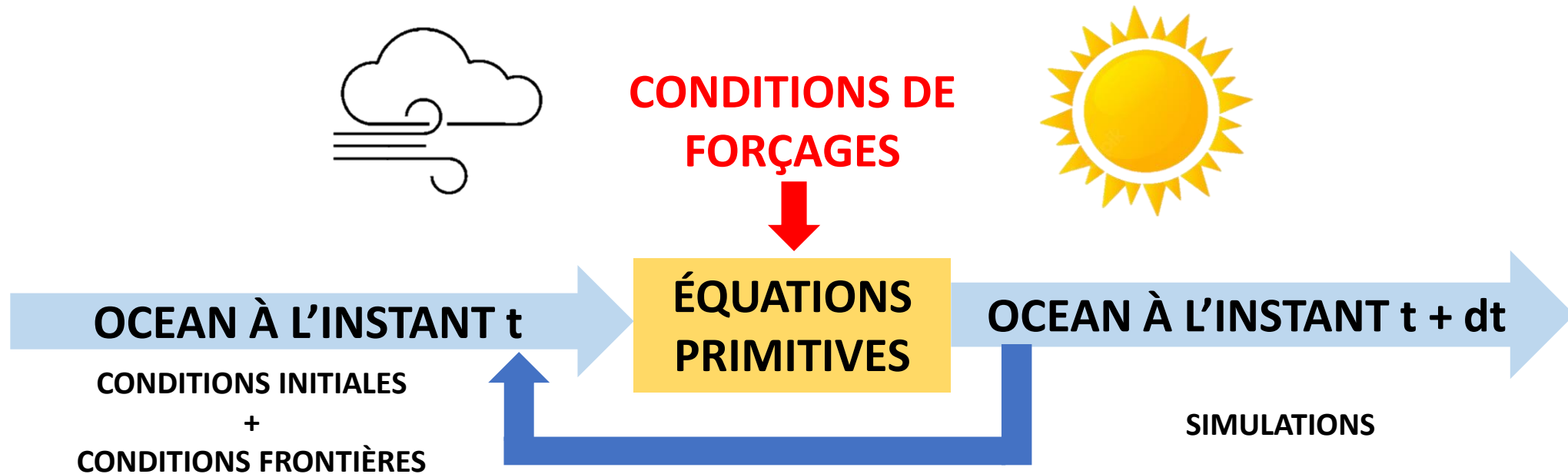
## Bassin occidental : caractéristiques de la mer de Ligurie



- Courant nord Liguro-Provençal-Catalan  
→ **Circulation cyclonique** le long de la pente côtière
- Variabilités spatiales et temporelles du vent  
→ Génère des **tourbillons de méso-échelles**
- Detection de tourbillons intenses anticycloniques  
→ **Intenses vitesses verticales** → Upwelling côtiers
- Casella (2011) : modèle LS-ROMS  
→ **MFS** (2006) : température, salinité, vitesse  
→ **COADS** et **COSMO-17** : forçage du vent  
→ Resolution plus fine + variabilité du stress du vent
- Visualisation : **surélévation** + **Okubo-Weiss** + **vitesse verticale**

**Fig. 1.** Schéma de la dynamique océanique de la mer Méditerranée. **A.** Circulation générale (Millot, 2005). **B.** Mer de Ligurie (Mistic, 2022).

## Principe de modélisation océanique – Modèle CROCO



## VISUALISATION DES TOURBILLONS ANTICYCLONIQUES EN MER DE LIGURE

Données climatologiques moyennées

Conditions forçages du vent : COADS 2005

Conditions initiales : WOA 2009



## Modèle CROCO : Définition – Hypothèses/Approximations – Equations primitives

**Modèle climatologique CROCO** → Résolution à petites échelles des **équations primitives** : mouvement (1 et 2), continuité (3), conservation quantité de chaleur (4) et de sel (5) et état de la mer (6)

## ÉQUATIONS PRIMITIVES

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \nabla p + \frac{\partial P}{\partial x} + f v - \frac{\partial \overline{u'u'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \nabla p + \frac{\partial P}{\partial y} - f u - \frac{\partial \overline{v'u'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{v'v'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} T = -\frac{\partial \overline{(T'u')}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{(T'v')}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{(T'w')}}{\partial z} + \frac{H_c}{\rho_0 C_p} \frac{\partial I}{\partial z} \quad (4)$$

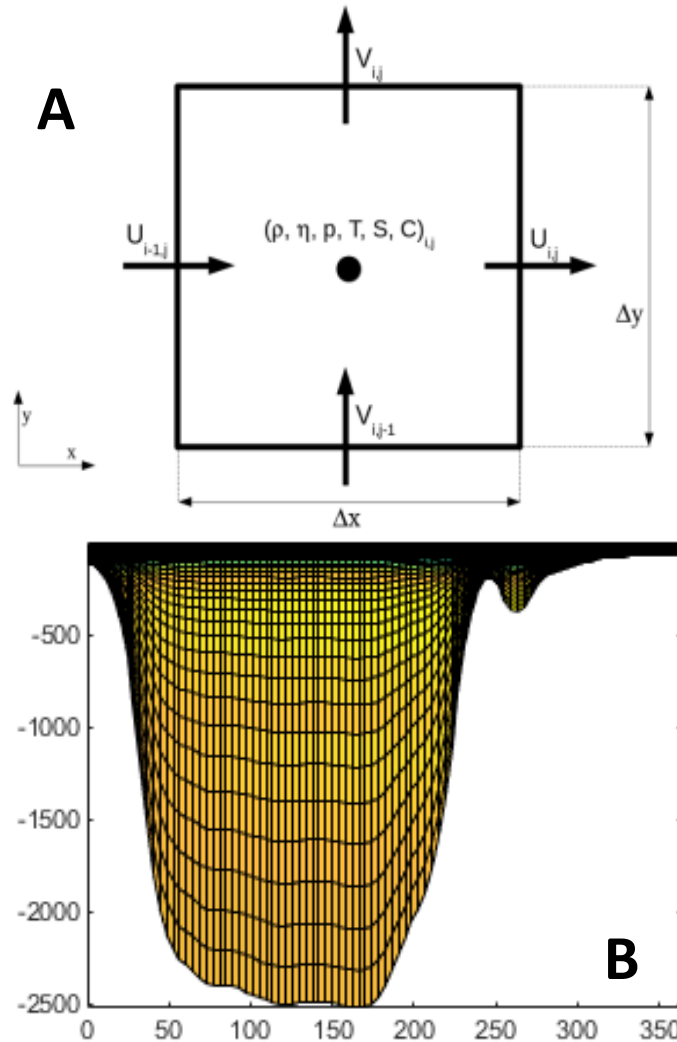
$$\frac{\partial S}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} S = -\frac{\partial \overline{(S'u')}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{(S'v')}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{(S'w')}}{\partial z} \quad (5)$$

$$\rho = \rho(T, S, p) \quad (\text{d'après TEOS-10}) \quad (6)$$

## HYPOTHÈSES / APPROXIMATIONS

- Hypothèse d'**incompressibilité**
- Hypothèse **hydrostatique**
- Hypothèse de **Reynolds**
- Approximation **Boussinesq**

## Modélisation CROCO : Discrétisation et condition CFL



- Maillage horizontal selon la grille d'**Arakawa type C**
- Maillage vertical selon les **coordonnées  $\sigma$**  : 32 niveaux verticaux
- **Condition Courant-Friedrichs-Levy CFL** :
  - Processus rapides : **barotropes**  $\rightarrow$  ondes de gravité
  - Processus lents : **baroclines**  $\rightarrow$  tourbillons
  - **Time splitting** : temps externe et interne

$$\Delta t_E \leq \frac{1}{c_0} \sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2}} \quad c_0 = \sqrt{g \cdot h_{\max}}$$

**Fig. 2.** Maillage horizontal et vertical. **A.** Grille d'Arakawa type C. **B.** Coordonnées  $\sigma$  sur 32 niveaux verticaux de la mer de Ligure.

Modélisation CROCO : Implémentation zone d'étude

**Tab. 1.** Caractéristiques spatiales du maillage de la mer de Ligure dans le modèle CROCO.

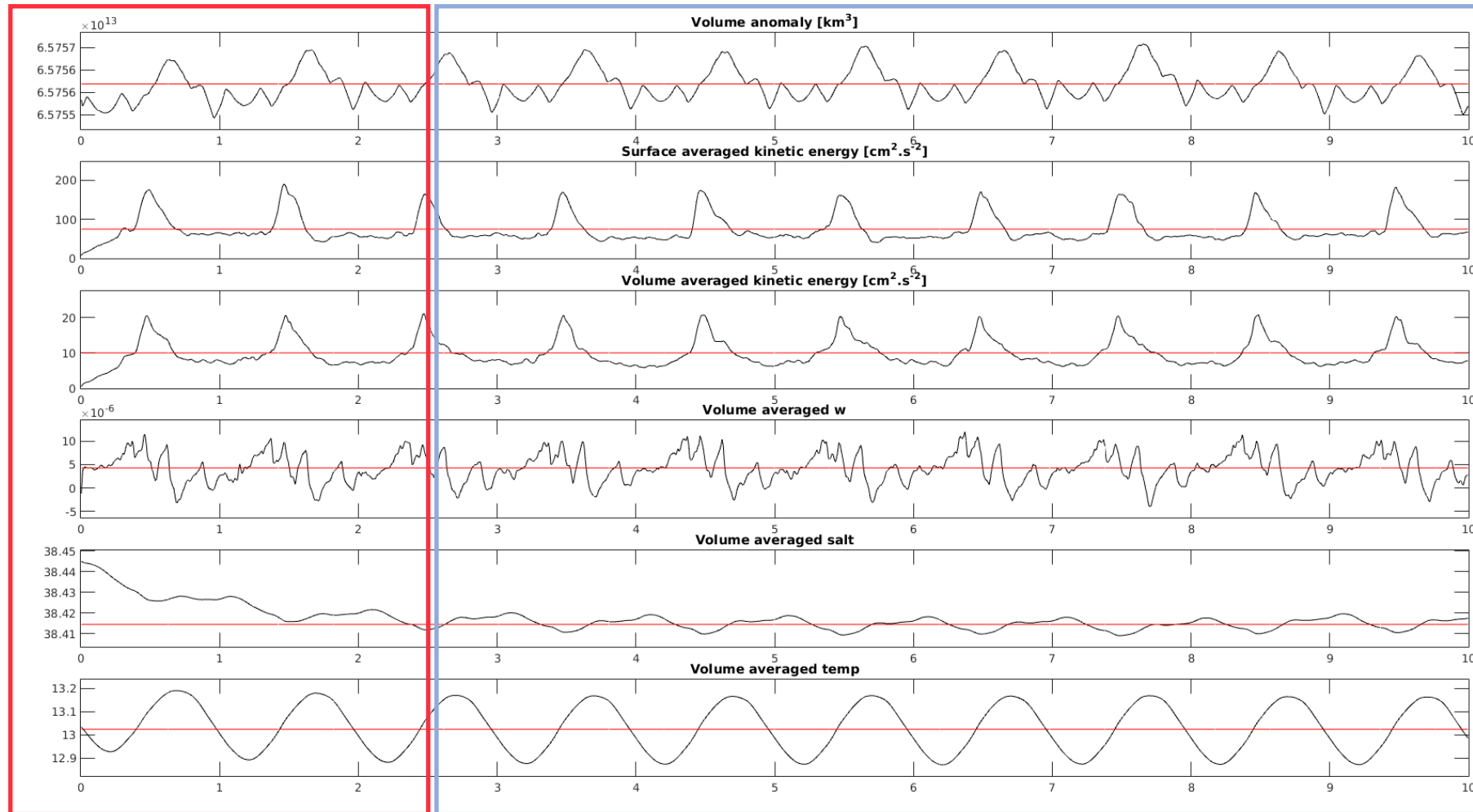
Long min	Long max	Lat min	Lat max	Frontières ouvertes	Résolution maillage
6.5°E	11.0°E	42.5°N	44.5°N	Sud, Est et Ouest	$dl = \frac{1}{20}^{\circ}$
LLm	MMm	$Dx_{min}$ (km)	$Dx_{max}$ (km)	$Dy_{min}$ (km)	$Dy_{max}$ (km)
89	55	3.9612	4.0968	3.9648	4.0956

**Tab. 2.** Caractéristiques de temporalité du modèle : temps interne et externe suite au *time splitting*.

NTIMES	NTDFAST	$\Delta t_E$ (s)	$\Delta t_I$ ( $NTDFAST \times \Delta t_E$ ) (s)	AVG (jours)
7200	60	6	$60 \times 6 = 360$	3



## Diagnostic du modèle



Spin up

Stabilité

Durée de spin up : 1-2 ans

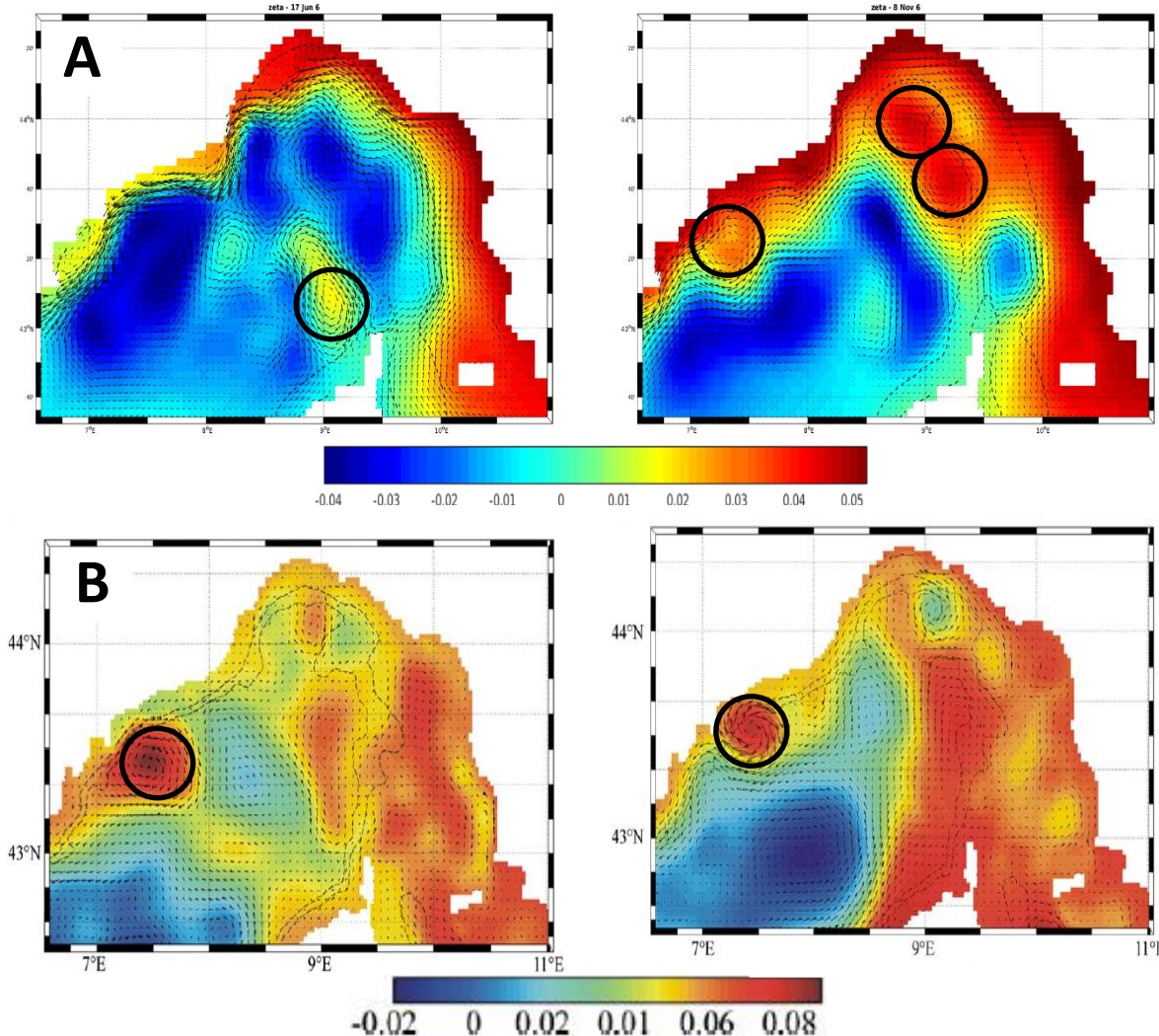
→ Méthode dynamique

Analyse de la 6<sup>ème</sup> année  
climatologique simulée

**Fig. 3.** Diagnostic de la stabilité de la simulation sur une période de 10 ans : la valeur moyenne est représenté par la ligne rouge pour chaque variable.



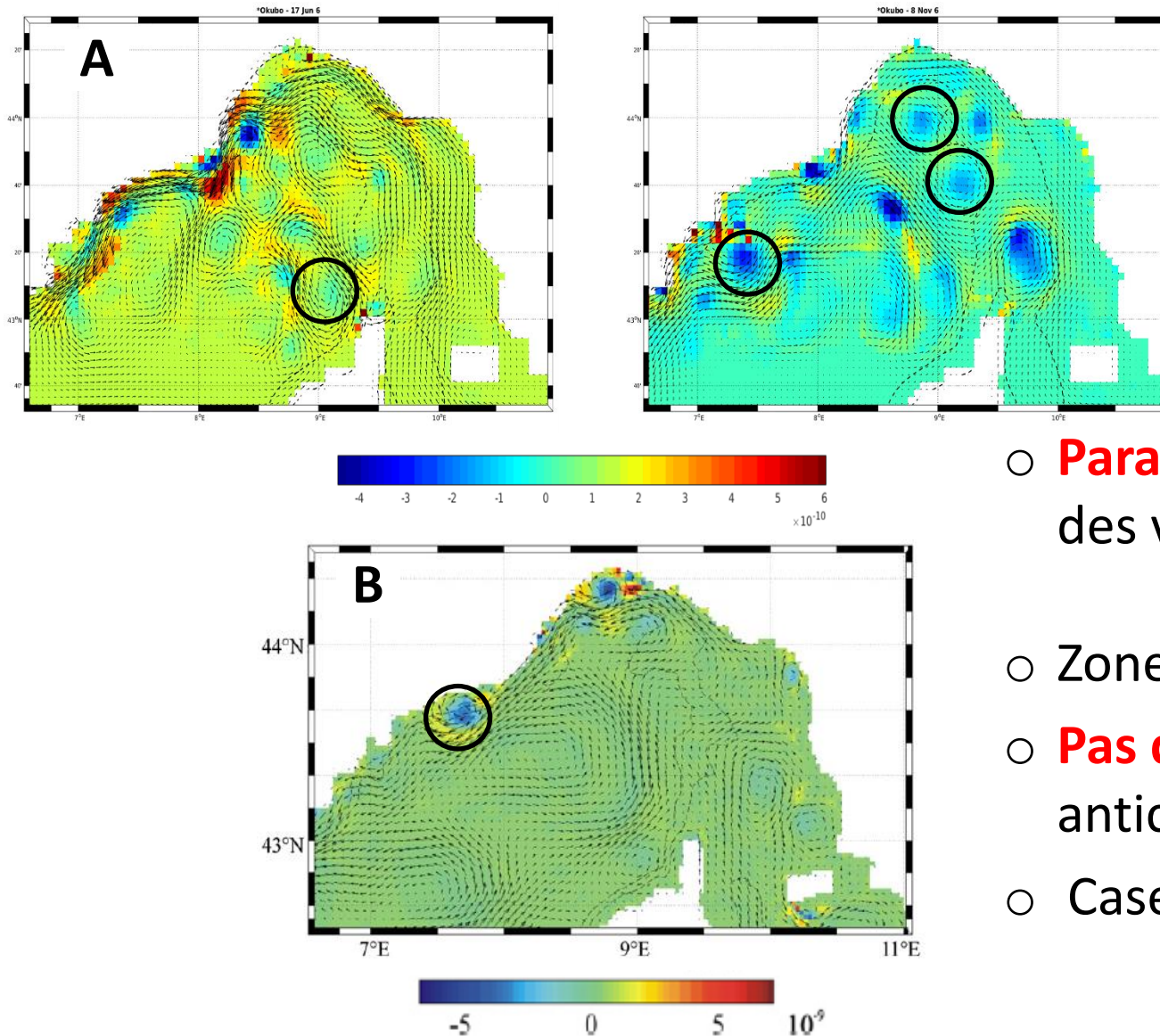
## Variation de la surface de la mer au niveau des tourbillons



**Fig. 4.** Surélévation de la surface libre  $\eta$  au niveau des tourbillons anticycloniques en mer de Ligurie (à gauche : juin ; à droite : novembre). **A.** Simulation à l'aide du modèle CROCO avec COADS. **B.** Simulation à l'aide du modèle LS-ROMS avec COSMO-17 (Casella, 2011).

- **Surélévation du niveau marin**
  - Au cœur des vortex anticycloniques
  - Zone côtière : circulation courant
- Abondance en période **automnale/hivernale**
- Vorticité **peu intense** pour le modèle CROCO
  - 1 – 2 cm en moyenne
- Casella (2011) :
  - Tourbillons intenses par COSMO-17
  - Conformité avec COADS

### Paramètre d'Okubo-Weiss : cisaillement du courant et vorticité relative



**Fig. 5.** Paramètre d'Okubo-Weiss : détection des vortex des tourbillons anticycloniques en mer de Ligure ( $s^{-2}$ ). **A.** Simulation à l'aide du modèle CROCO avec COADS (à gauche : juin ; à droite : novembre). **B.** Simulation à l'aide du modèle LS-ROMS avec COSMO-17 (Casella, 2011).

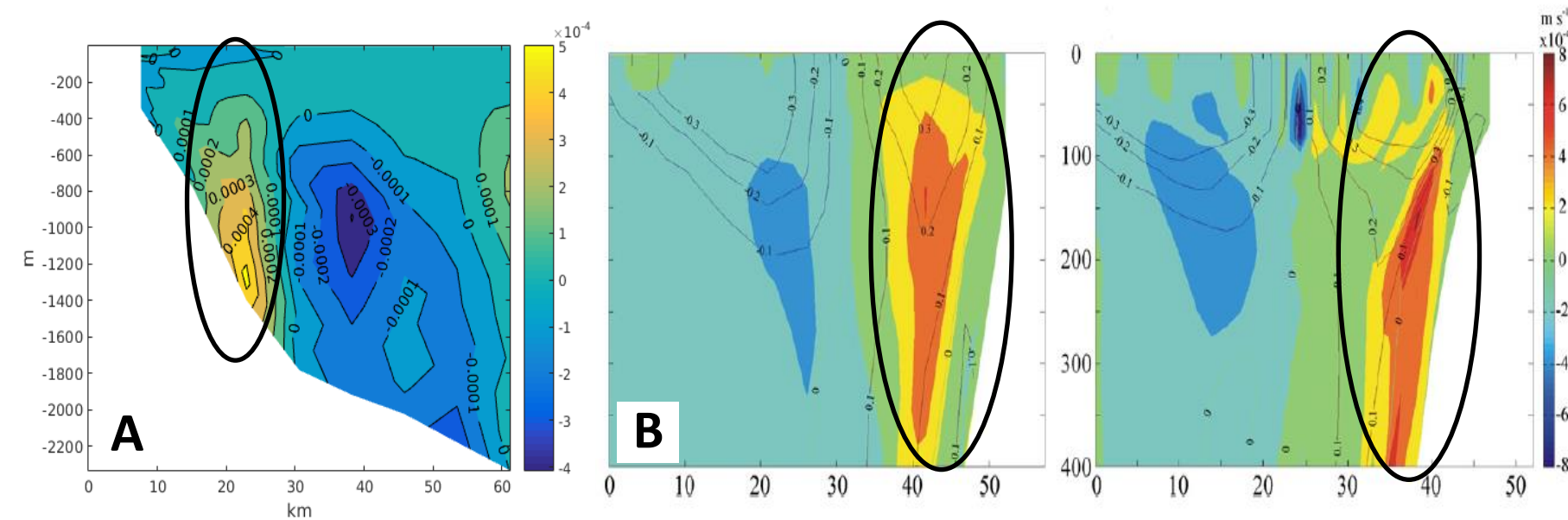
- **Paramètre d'Okubo-Weiss** avec détection cœur des vortex :

$$W = s^2 - \xi^2 \quad \begin{array}{l} \rightarrow \xi^2 \text{ vorticité relative} \\ \rightarrow s^2 \text{ déformation totale} \end{array}$$

- Zone bleue  $\rightarrow$  **Vorticité intense**
- **Pas de distinction** : sens cyclonique et anticyclonique
- Casella (2011) :
  - $\rightarrow$  Tourbillons intenses par COSMO-17
  - $\rightarrow$  Corrélation avec la SSH



## Étude de la vitesse verticale au niveau des tourbillons anticycloniques



**Fig. 6.** Coupe méridienne de la vitesse verticale au niveau des tourbillons anticycloniques côtier en mer de Ligurie ( $10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$ ). **A.** Simulation à l'aide du modèle CROCO avec COADS. **B.** Simulation à l'aide du modèle LS-ROMS avec COSMO-17 : à gauche *parent grid* ; à droite *child grid* (Casella, 2011).

- Detection de mouvement **ascendant (positive)** et **descendant (négative)**
- Vitesse verticale
  - Positive : **upwelling côtier**
  - Négative : **downwelling au cœur** du vortex
- Casella (2011) :
  - Forte vitesse verticale avec COSMO-17 vs faible avec COADS
  - **Apport en nutriments** en eau superficielle : zone euphotique

## Approche future du modèle CROCO

## MODELE CROCO

- **Résolution spatiale** :
    - Horizontale :  $1/20^\circ$
    - Verticale : 32 niveaux
  - **Résolution temporelle** :
    - 3 jours moyennés
  - **Conditions initiales** : WOA 2009
  - **Conditions forçage** : COADS 2005
- 
- Visualisation des tourbillons anticycloniques côtiers → **upwellings côtiers**
  - Tourbillons et vitesses verticales → peu intenses

## AMÉLIORATION

- **Haute résolution spatiale et temporelle** :
  - modèle de simulation
  - forçage de surface
- **Variabilité importante** des contraintes du vent
  - Changement des conditions de forçage COADS
- Visualisation **plus précise** des tourbillons + upwellings associés

# RÉFÉRENCES

Baklouki, M., Initialisation aux méthodes numériques de résolution des équations aux dérivées partielles, 2022, Aix-Marseille Université.

Casella, E., Molcard, A. et Provenzale, A. (2011). Mesoscale vortices in the ligurian sea and their effect on coastal upwelling processes. *Journal of Marine Systems*, 88(1):12–19.

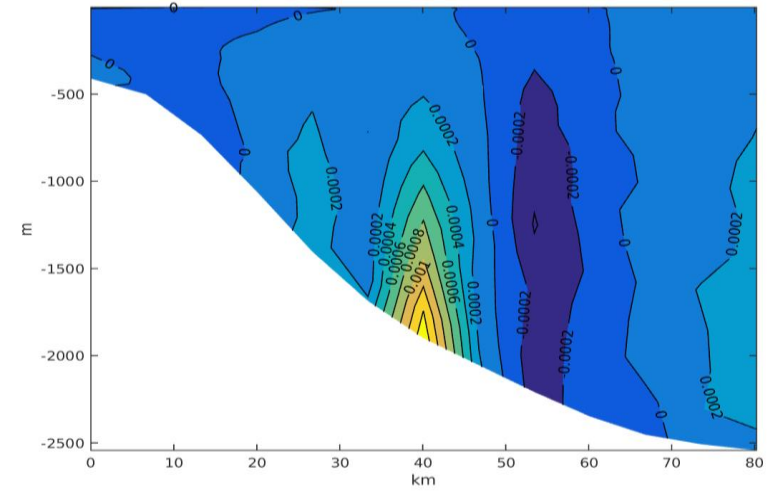
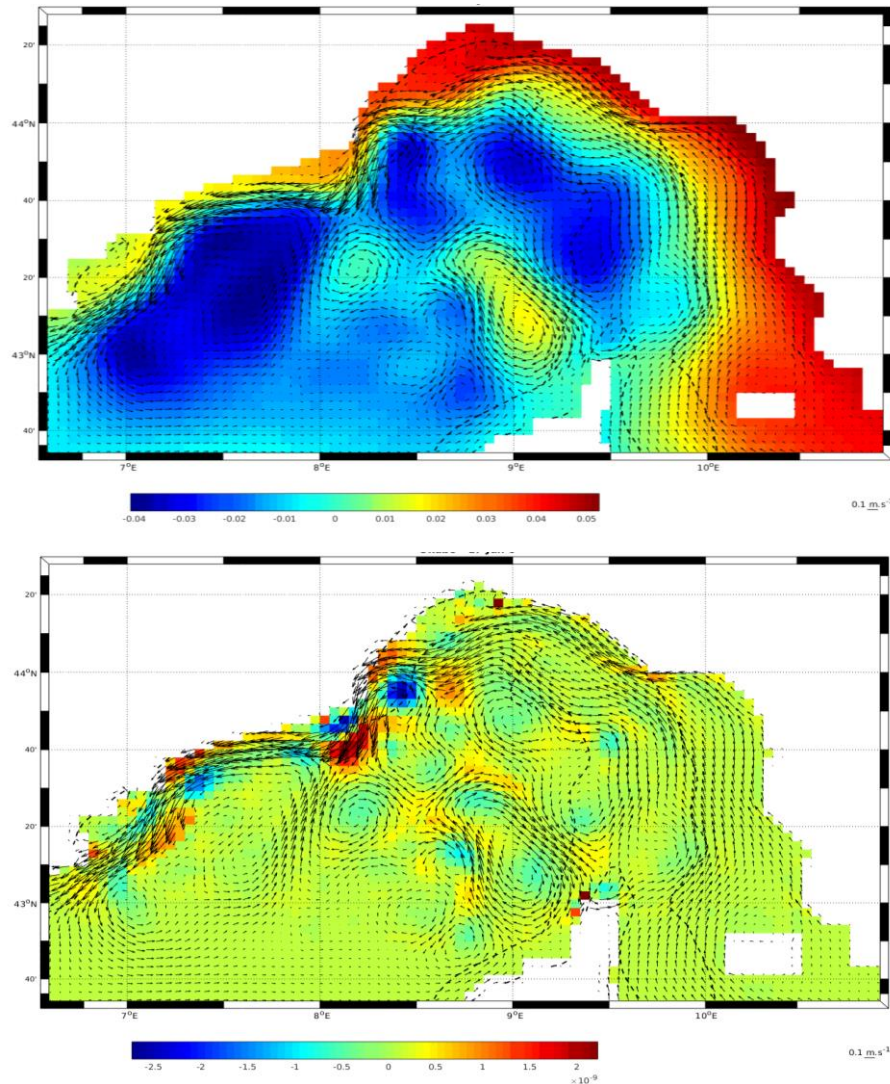
Doglioli, A., et Mazoyer, C., Notes de cours et travaux dirigés de modélisation 3D océanique, 2022, Aix-Marseille Université.

Millot, C. et Taupier Letage, I. (2005), Circulation in the Mediterranean Sea, *The Handbook of Environmental Chemistry*, Volume K, May 2005, Pages 29-66.

Misic, Cristina & Capone, Alessandro & Petrillo, Mario. (2022). Meteorological and climatic variability influences anthropogenic microparticle content in the stomach of the European anchovy *Engraulis encrasicolus*. *Hydrobiologia*.

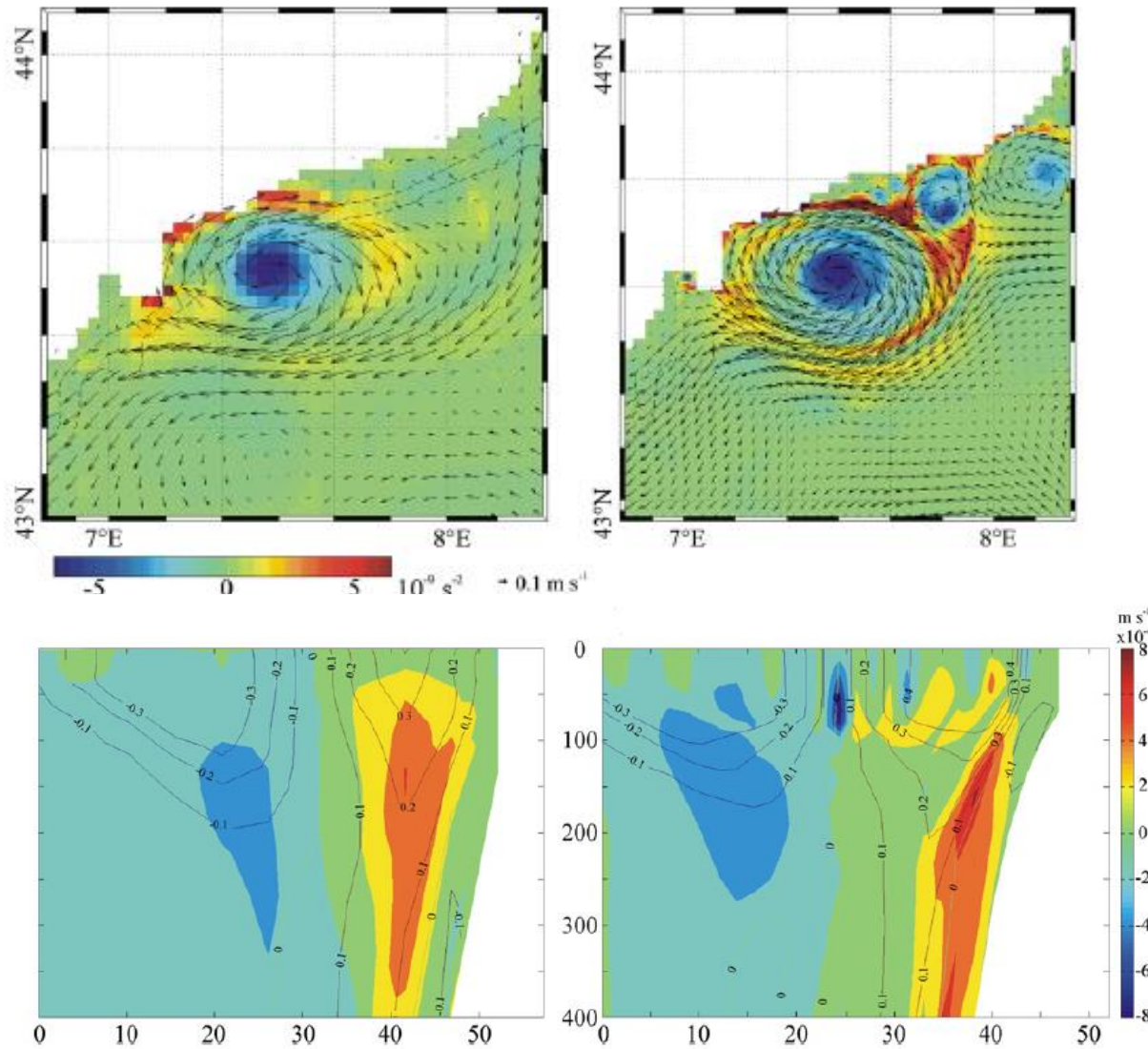


# ANNEXES



**Fig. 6.** Simulation des tourbillons anticycloniques en mer de Ligurie. **A.** Hauteur d'eau marin SSH. **B.** Paramètre d'Okubo-Weiss. **C.** Coupe méridienne du tourbillon côtier de la vitesse verticale ( $10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$ ).

# ANNEXES



**Fig. 7.** D'après Casella (2011). **A.** Paramètre d'Okubo-Weiss sur une grille *parent grid* (gauche) et une *child grid* (droite). **B.** Coupe méridienne du tourbillon côtier de la vitesse verticale ( $10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$ ) associé au tourbillon anticyclonique précédent