

# Modélisation de la circulation océanique dans le sud-ouest de l'Océan Indien



Yvergniaux Nolwenn

OPB205 – Modélisation 3D océanique  
M1 Sciences de la Mer - parcours OPB 2021/2022

10 mai 2022

## Sud-ouest de l'Océan Indien

## Courants :

- SEC
- NECM
- SECM
- SICC

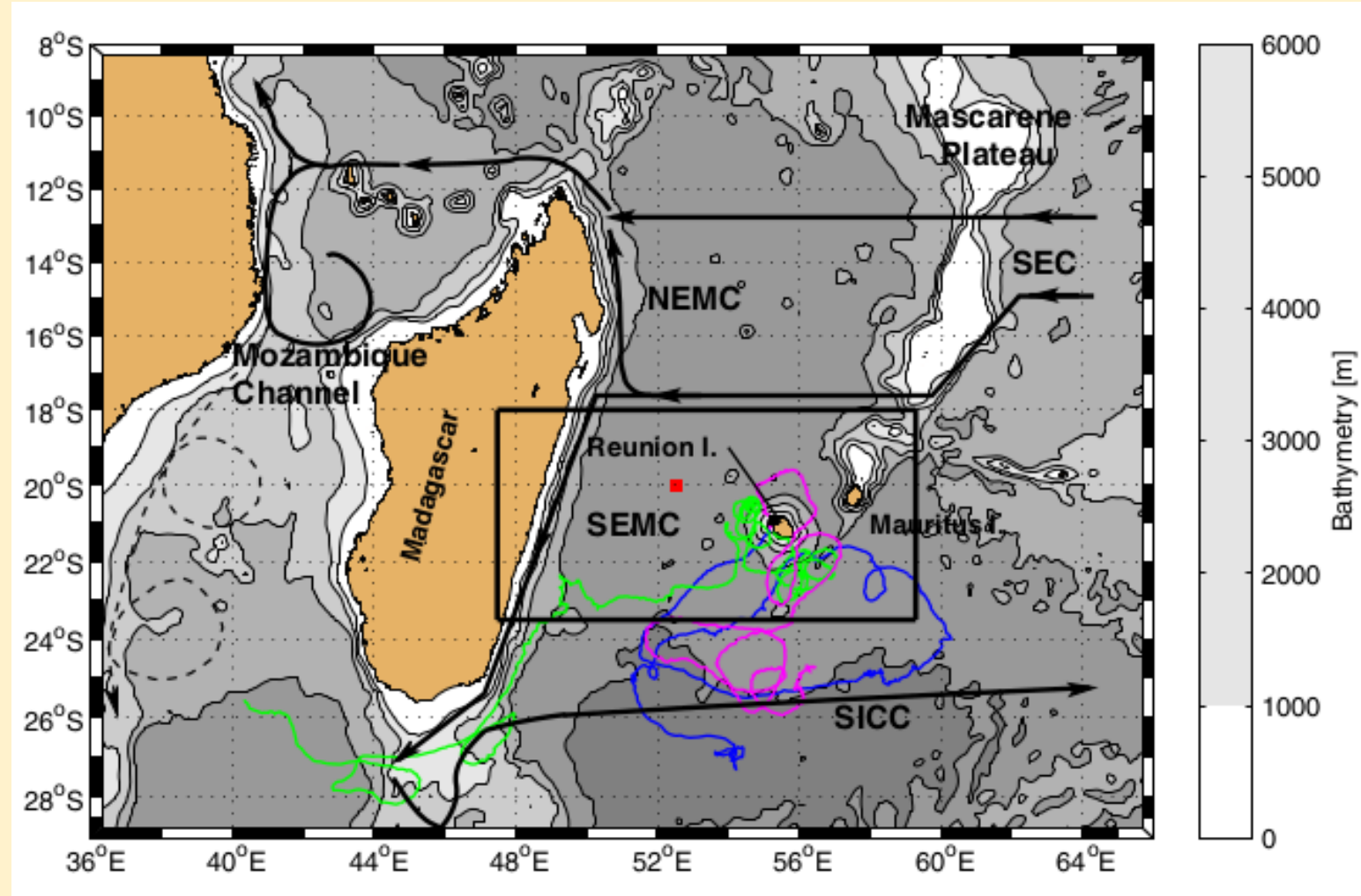


Fig. 1 – Principaux courants du sud-ouest de l'Océan Indien (Pous et al. 2014)

## Sud-ouest de l'Océan Indien

### Courants :

- SEC
- NECM
- SECM
- SICC

### Zone d'étude :

- Sud-ouest de l'Océan Indien
- Archipel des Mascareignes
- Côte est de Madagascar

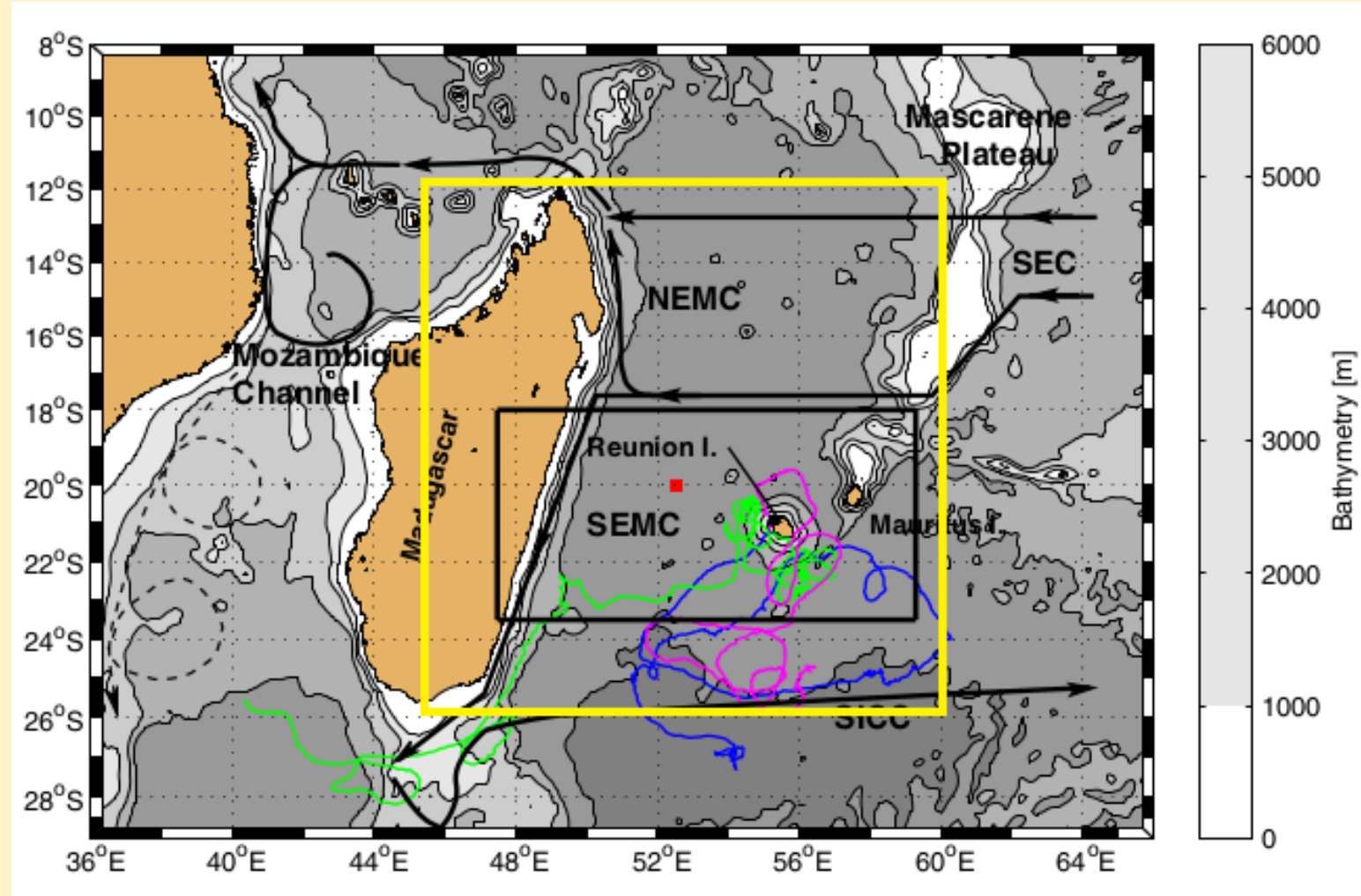


Fig. 1 – Principaux courants du sud-ouest de l'Océan Indien (Pous et al. 2014)  
Zone d'étude encadrée en jaune



## Sud-ouest de l'Océan Indien

### Courants :

- SEC
- NECM
- SECM
- SICC

### Zone d'étude :

- Sud-ouest de l'Océan Indien
- Archipel des Mascareignes
- Côte est de Madagascar



### Objectifs :

- Visualiser les principaux courants
- Caractériser la circulation

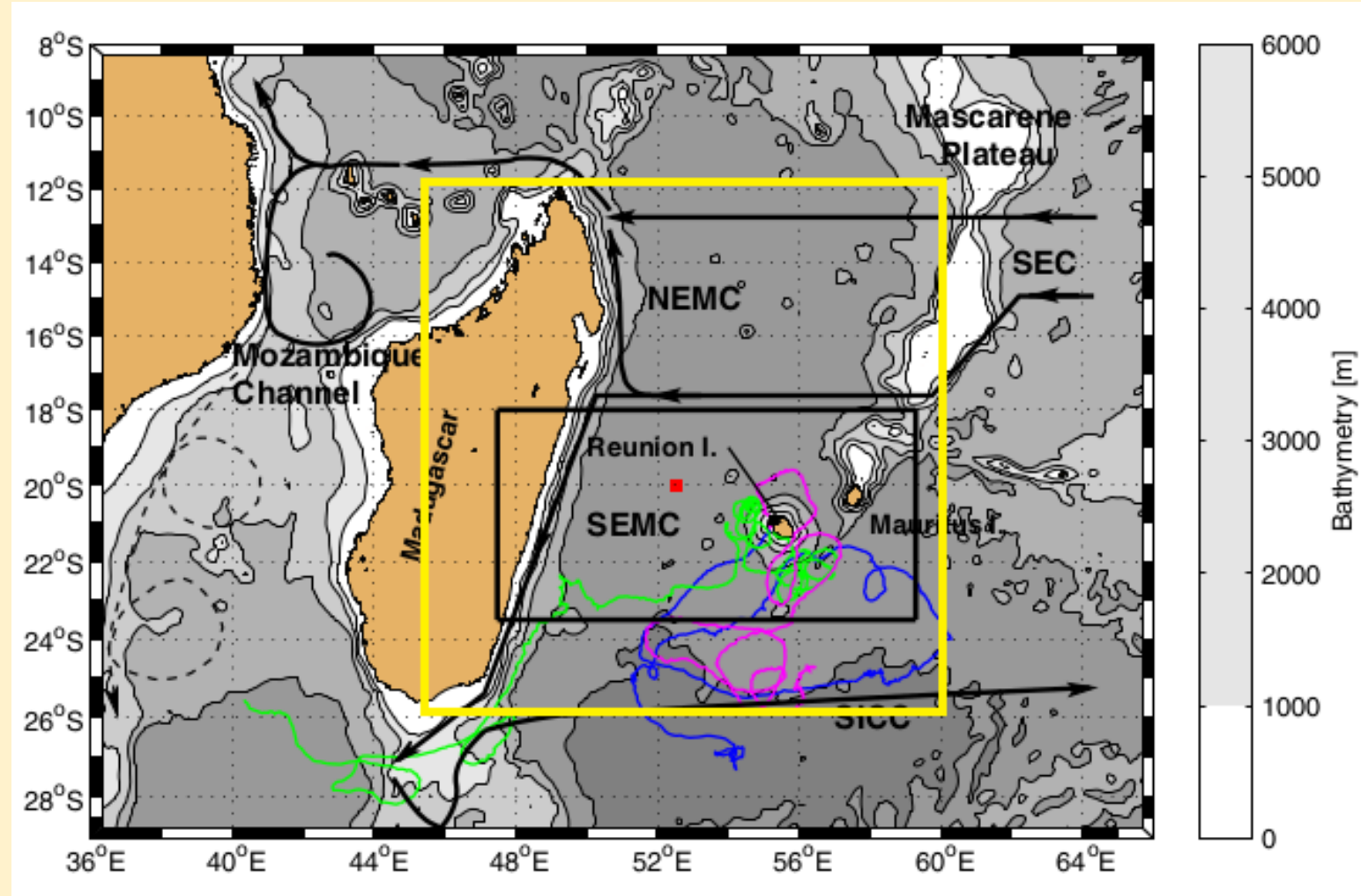


Fig. 1 – Principaux courants du sud-ouest de l'Océan Indien (Pous et al. 2014)  
Zone d'étude encadrée en jaune

## Modèles numériques en océanographie

Océan à  $t$

```
graph LR; A([Océan à t]) --> B([Océan à t + Δt]);
```

The diagram illustrates the temporal progression of a numerical ocean model. It features two white ovals with orange borders. The left oval is labeled 'Océan à  $t$ ' and the right oval is labeled 'Océan à  $t + \Delta t$ '. A thick orange arrow points from the left oval to the right oval, indicating the flow of time and the update of the model state.

Océan à  $t + \Delta t$

## Modèles numériques en océanographie

Océan à  $t$ Les équations  
primitivesOcéan à  $t + \Delta t$ 

Equations du mouvement

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} u = -\frac{1}{\rho_0} + fv + A_h \nabla_h^2 u + A_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} v = -\frac{1}{\rho_0} - fu + A_h \nabla_h^2 v + A_z \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}$$

L'équation de continuité : conservation de la masse

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Les équations de conservation : de la chaleur et de la salinité

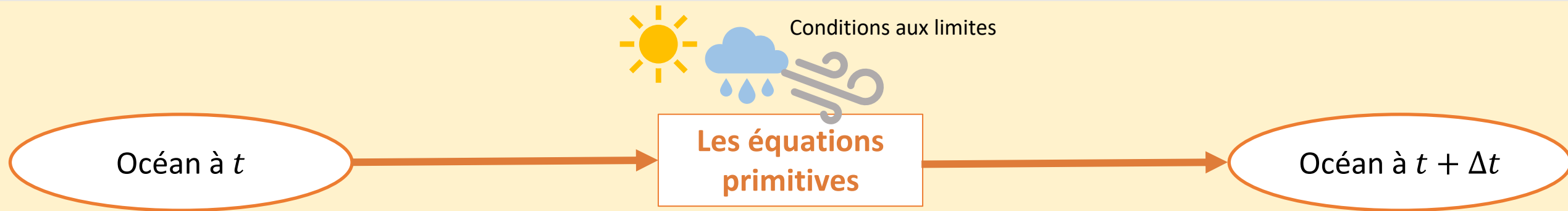
$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} T = A_h \vec{\nabla}_h^2 T + A_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} S = A_h \vec{\nabla}_h^2 S + A_z \frac{\partial^2 S}{\partial z^2}$$

L'équation d'état de l'eau de mer

$$\rho = \rho(T, S, p)$$

## Modèles numériques en océanographie



### Hypothèses :

- Approximation hydrostatique
- Approximation de Boussinesq :  $\rho = \rho_0 + \rho'$
- Mouvement quasi-horizontal
- Approche de Reynolds pour la fermeture turbulente

## Le modèle CROCO : discrétisation numérique et stabilité

### CROCO :

- Réaliste climatologique
- 3D



## Le modèle CROCO : discrétisation numérique et stabilité

### CROCO :

- Réaliste climatologique
- 3D

### Discrétisation des équations primitives :

- Spatiale  $\rightarrow$  32 niveaux  $\sigma$

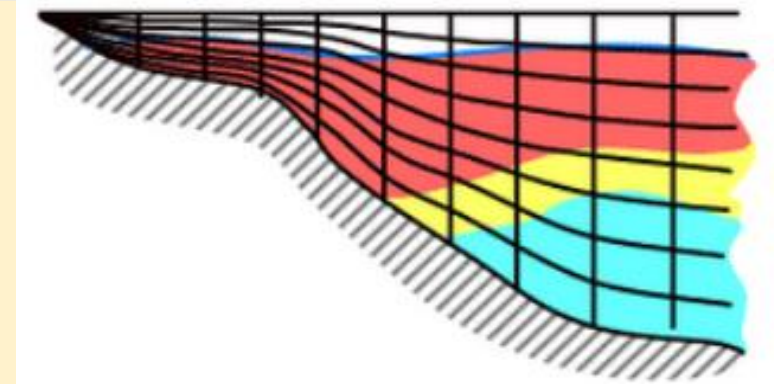


Fig. 2 – Coordonnées  $\sigma$  (M. Baklouti, cours OPB204, 2022)

## Le modèle CROCO : discrétisation numérique et stabilité

### CROCO :

- Réaliste climatologique
- 3D

### Discrétisation des équations primitives :

- Spatiale  $\rightarrow$  32 niveaux  $\sigma$
- Temporelle  $\rightarrow$  grille d'Arakawa C

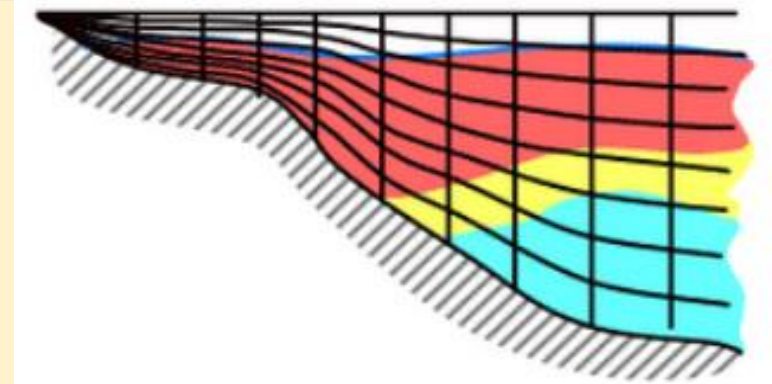


Fig. 2 – Coordonnées  $\sigma$  (M. Baklouti, cours OPB204, 2022)

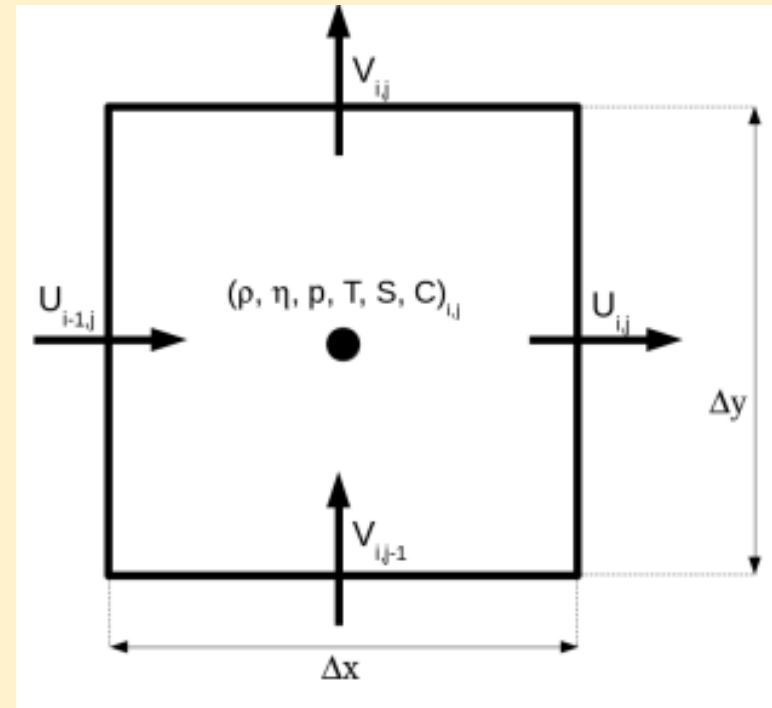


Fig. 3 – Grille de discrétisation d'Arakawa C (M. Baklouti, cours OPB204, 2022)

## Le modèle CROCO : discrétisation numérique et stabilité

### CROCO :

- Réaliste climatologique
- 3D

### Discrétisation des équations primitives :

- Spatiale  $\rightarrow$  32 niveaux  $\sigma$
- Temporelle  $\rightarrow$  grille d'Arakawa C

### Stabilité :

Lien entre  $\Delta x$  et  $\Delta t$  = critère CFL

$$\Delta t \leq \frac{1}{c} \left[ \frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right]^{-\frac{1}{2}}$$

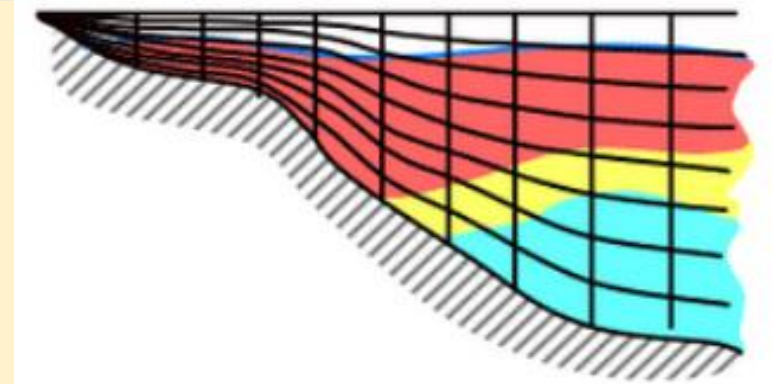


Fig. 2 – Coordonnées  $\sigma$  (M. Baklouti, cours OPB204, 2022)

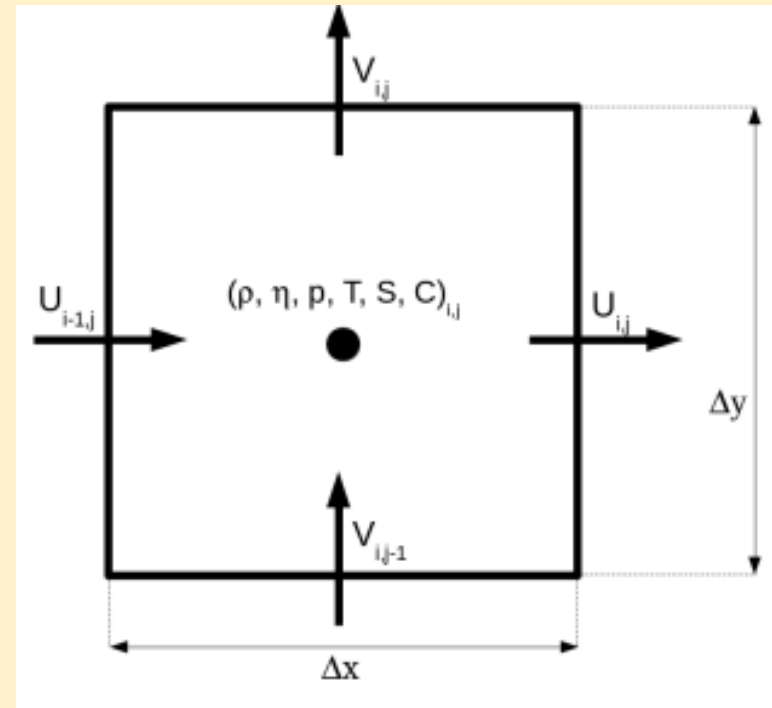


Fig. 3 – Grille de discrétisation d'Arakawa C (M. Baklouti, cours OPB204, 2022)

## Paramètres du modèle et bathymétrie

## Modèle pluriannuel : 10 ans

Parametres	Valeurs	
Longitude min et max [°E]	45	60
Latitude min et max [°S]	-26	-12
Résolution [°]	1/9	
Niveaux sigma verticaux N	32	
LLm ; MMm	134	133
NTIMES ; NDTFast	3600	60
dt [sec]	720	

Tab. 1 – Paramètres du modèle pluriannuel

## Paramètres du modèle et bathymétrie

### Modèle pluriannuel : 10 ans

Parametres	Valeurs	
Longitude min et max [°E]	45	60
Latitude min et max [°S]	-26	-12
Résolution [°]	1/9	
Niveaux sigma verticaux N	32	
LLm ; MMm	134	133
NTIMES ; NDTFAST	3600	60
dt [sec]	720	

Tab. 1 – Paramètres du modèle pluriannuel

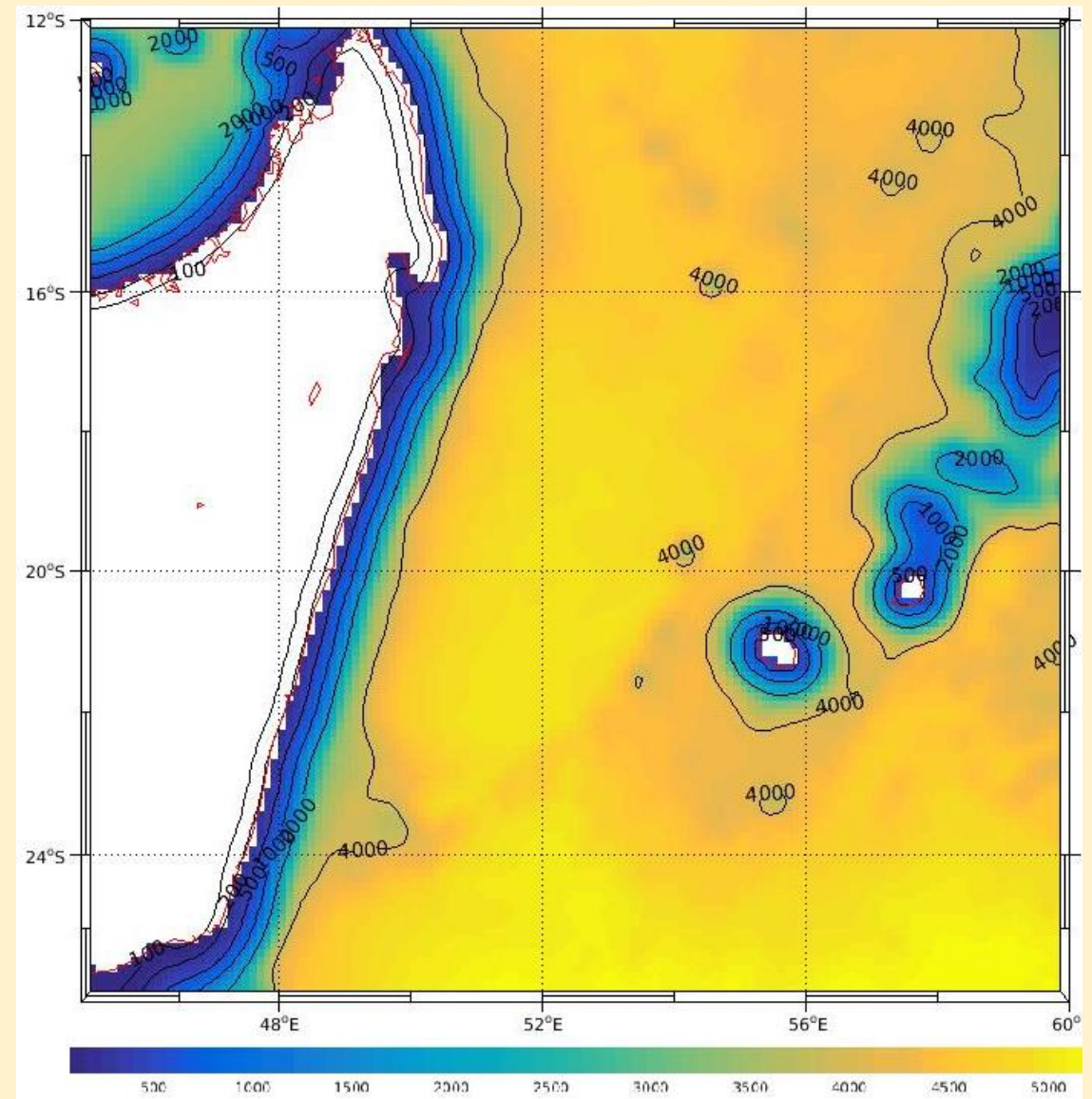


Fig. 4 – Bathymétrie du modèle

## Forçages et conditions aux limites

### Conditions aux limites:

- Conditions cinématiques : surface et fond
- Frontières latérales : toutes ouvertes



## Forçages et conditions aux limites

### Conditions aux limites:

- Conditions cinématiques : surface et fond
- Frontières latérales : toutes ouvertes

### Forçages climatologiques :

- T, vent, précipitation, ...

➔ Valeurs moyennées appliquées

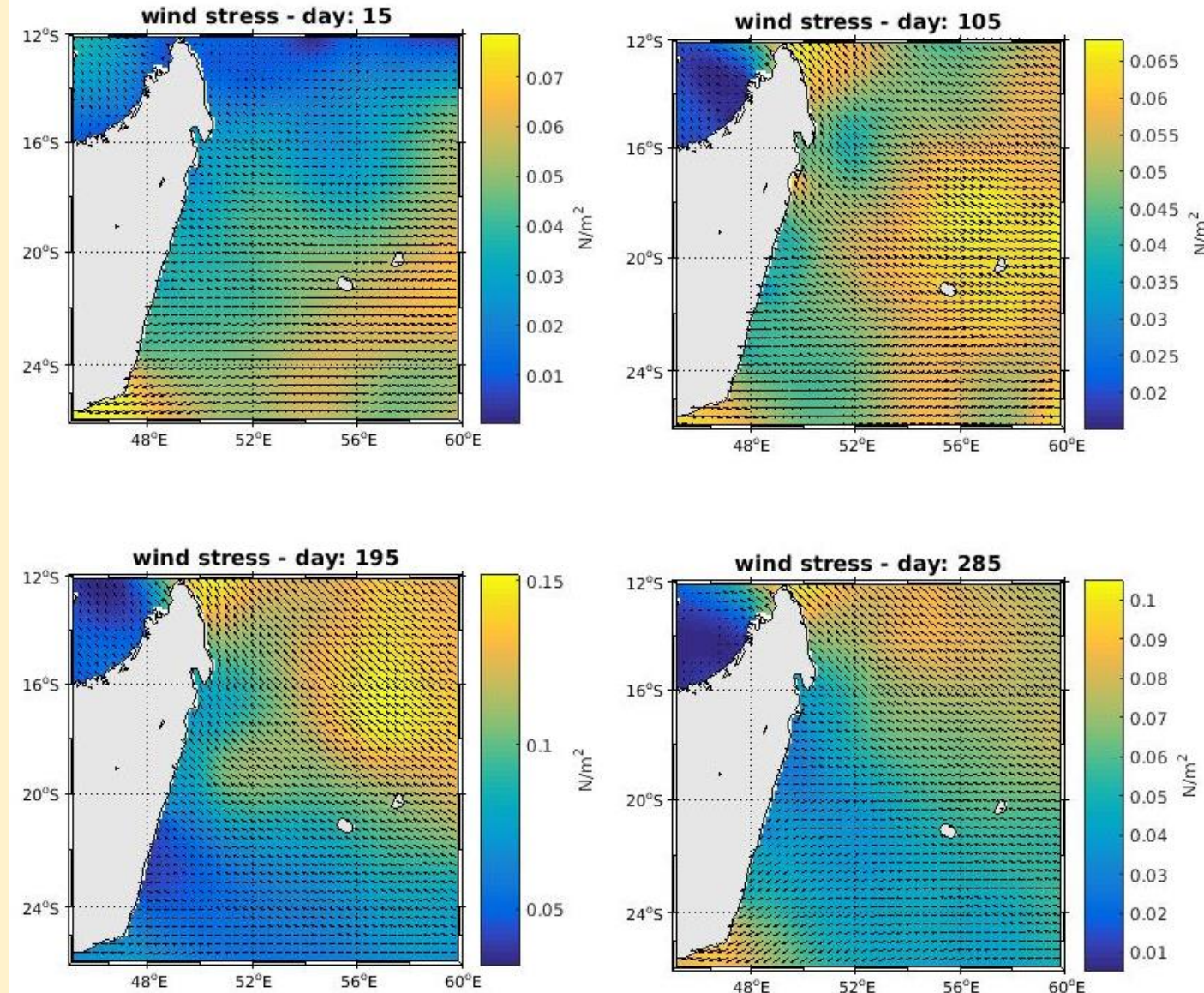


Fig. 5 – Tension du vent : intensification des alizés en hiver austral 5

## Diagnostic du modèle

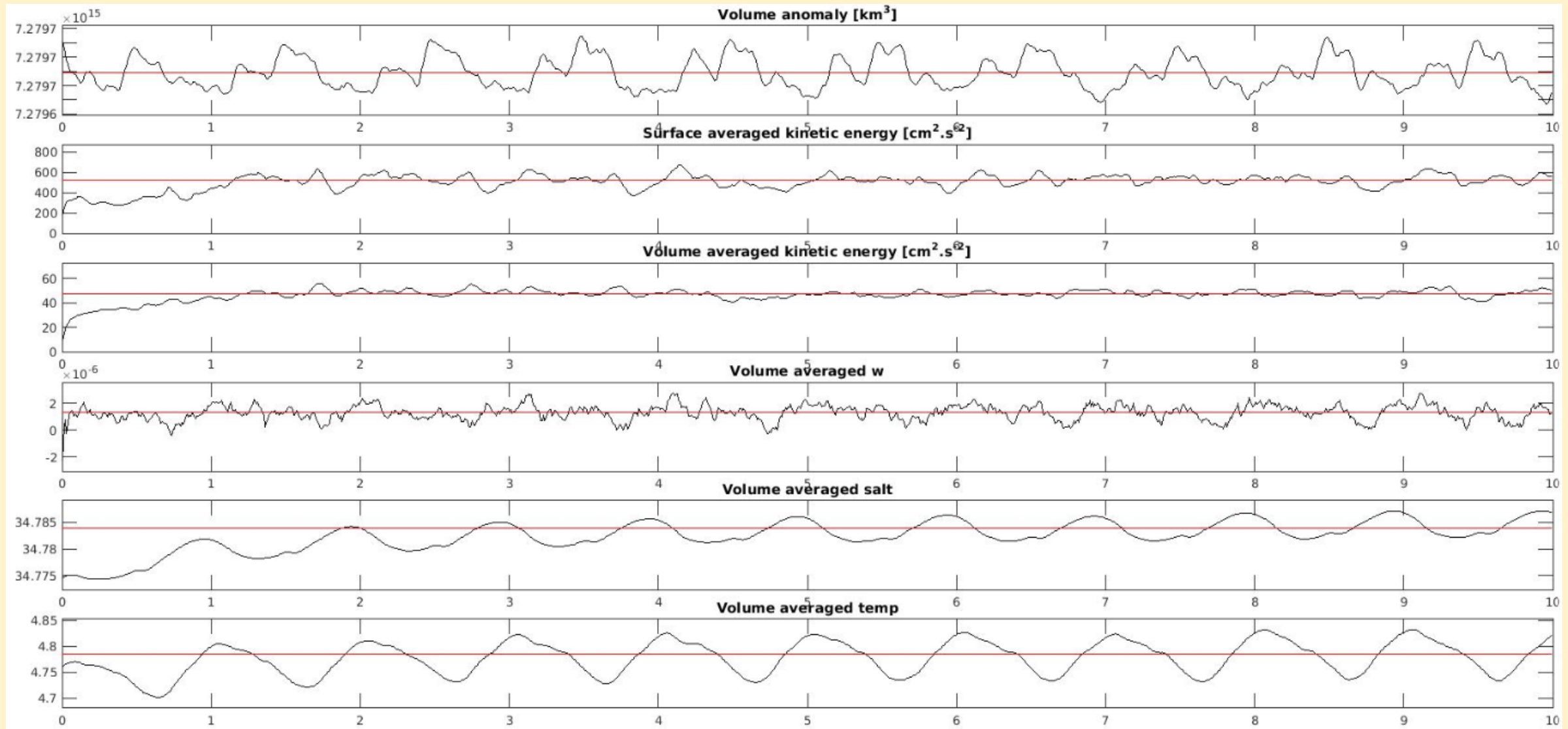


Fig. 6 – Diagnostic du modèle pluriannuel

## Diagnostic du modèle

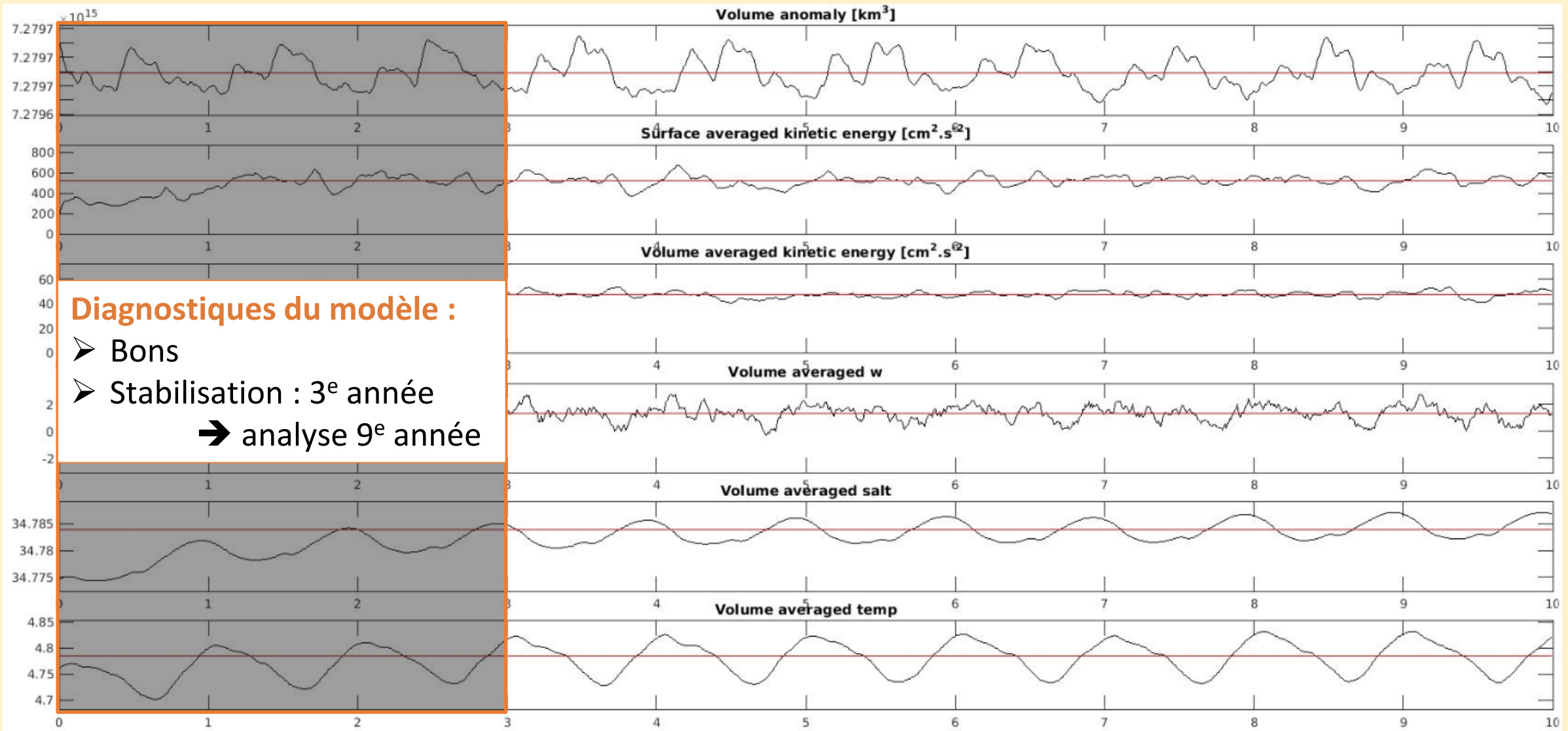


Fig. 6 – Diagnostic du modèle pluriannuel



## Courants de surface et surélévation $\eta$

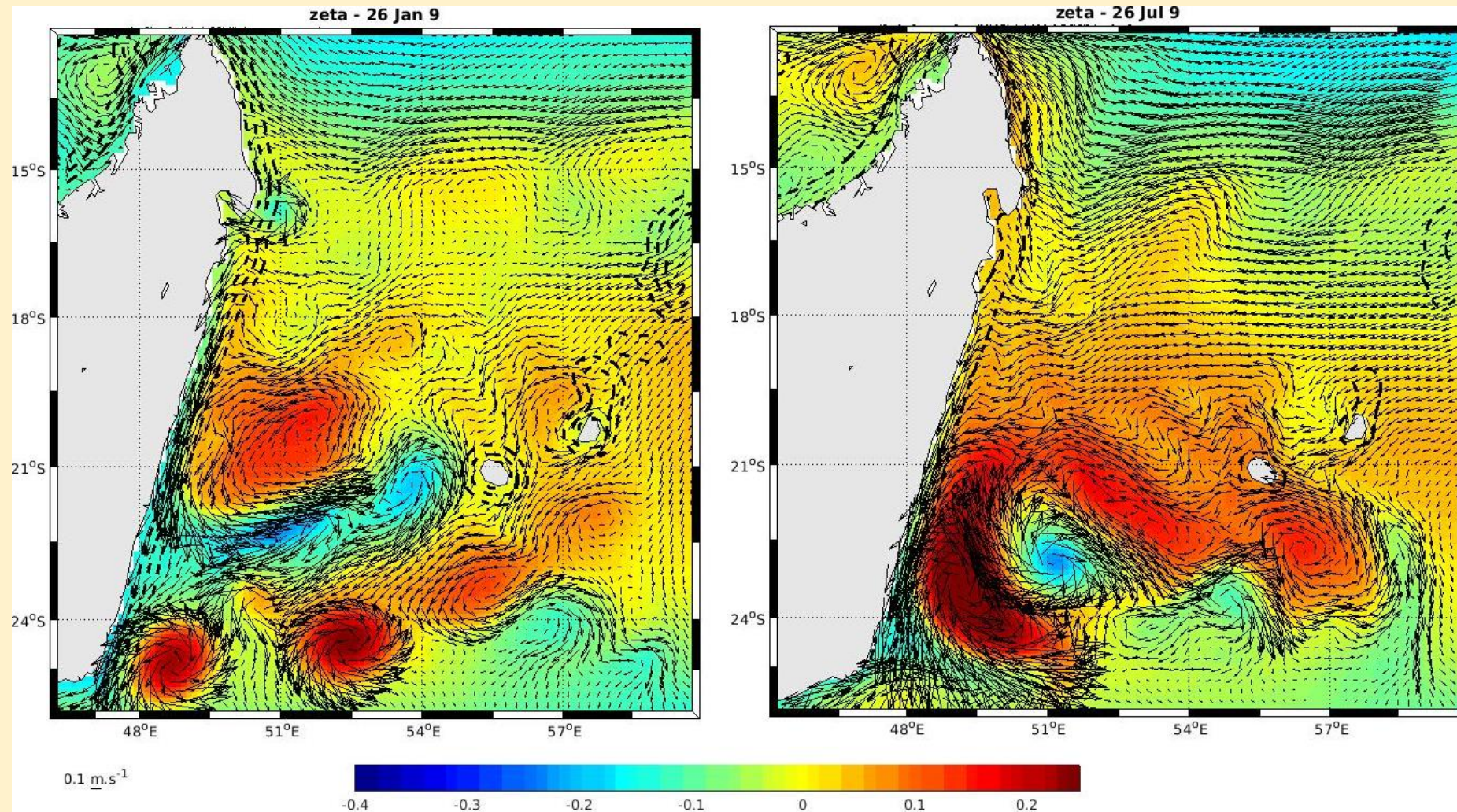


Fig. 7 – Variations de la surface libre et courants de surface en été (gauche) et en hiver (droite)



## Courants de surface et surélévation $\eta$

### Courants de surface :

- Vers l'ouest en général
- Intensification en hiver

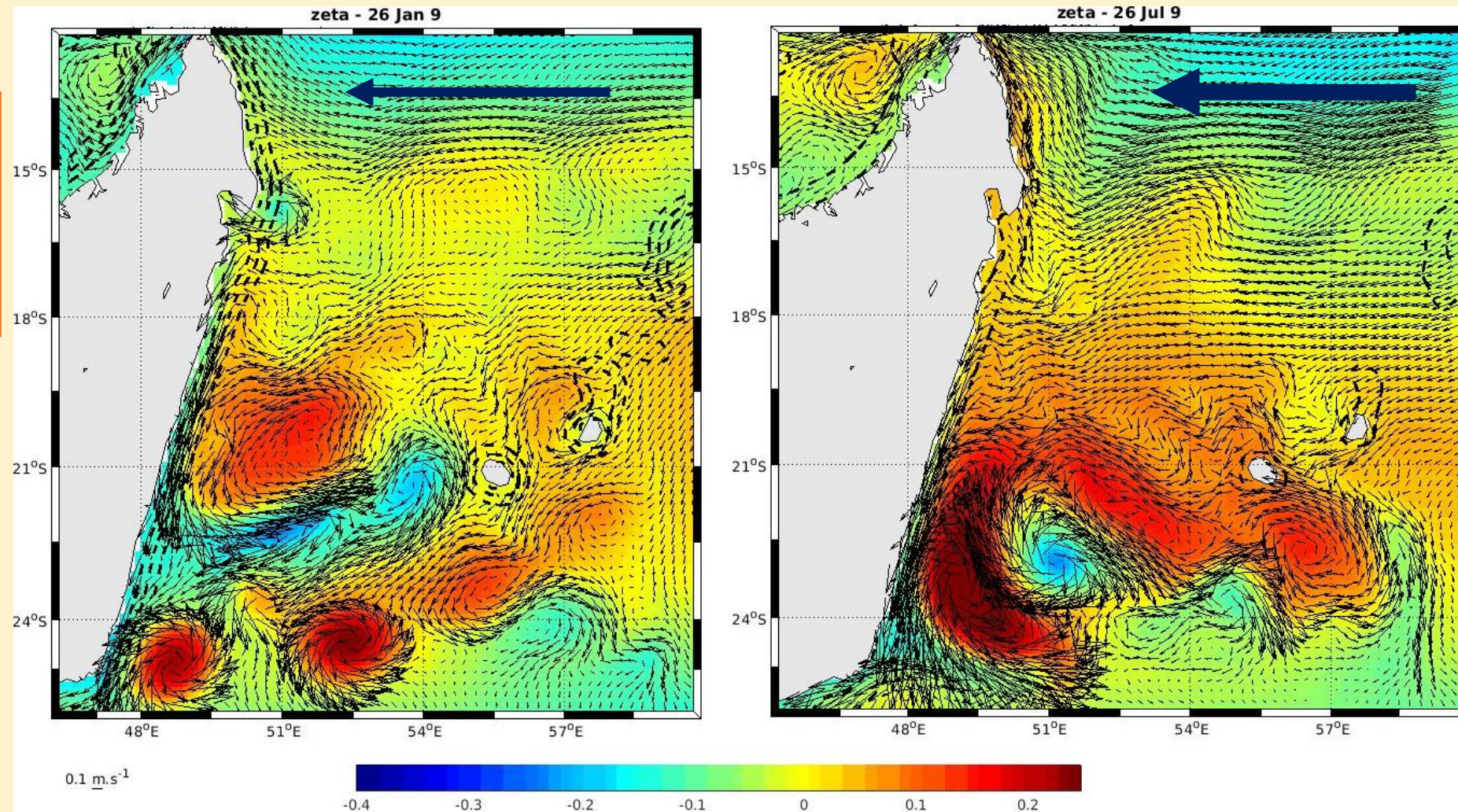


Fig. 7 – Variations de la surface libre et courants de surface en été (gauche) et en hiver (droite)



## Courants de surface et surélévation $\eta$

### Courants de surface :

- Vers l'ouest en général
- Intensification en hiver

### Surélévation $\eta$ :

- Tourbillons :
  - Cyclones (bleu)
  - Anticyclones (rouge)

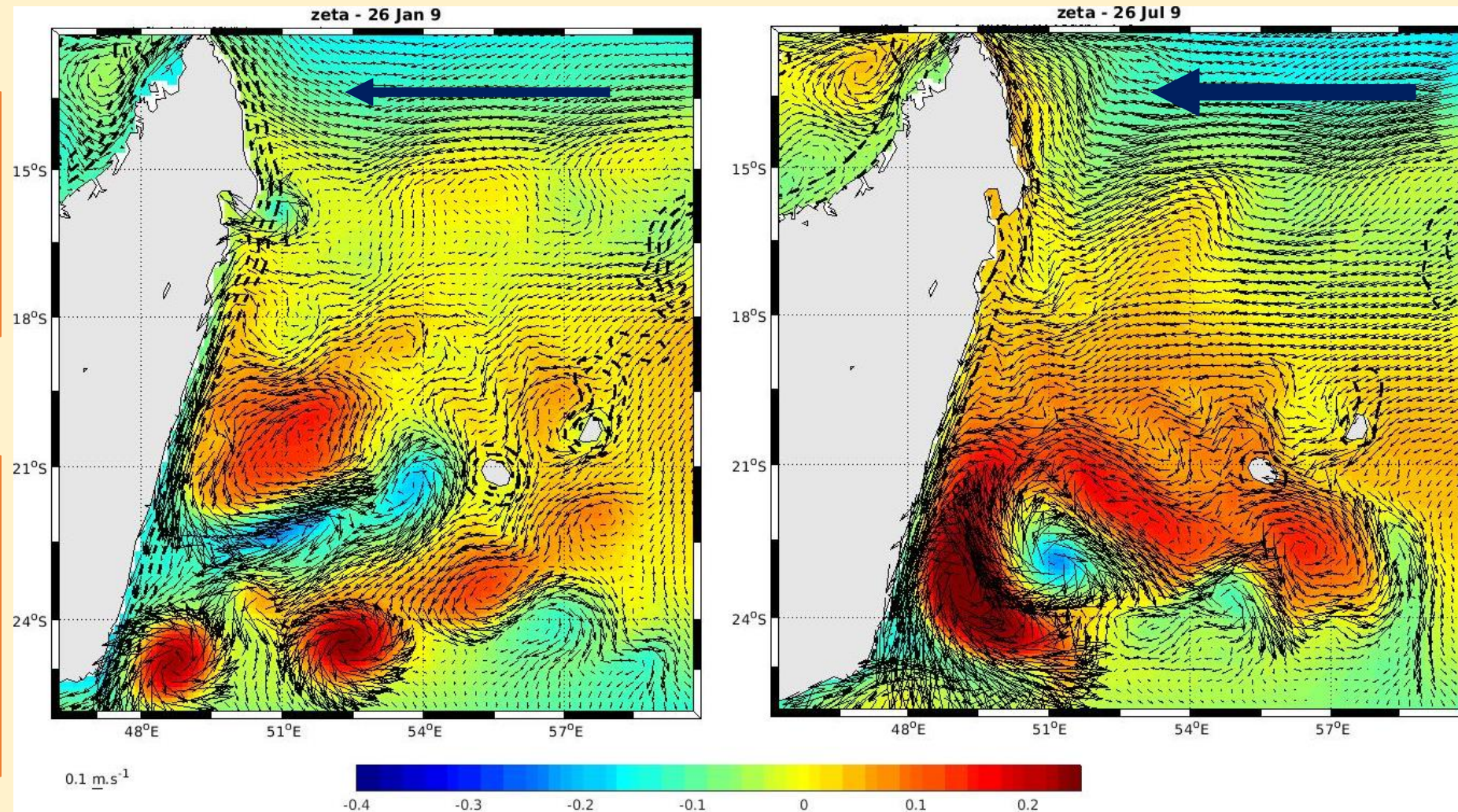


Fig. 7 – Variations de la surface libre et courants de surface en été (gauche) et en hiver (droite)



## Température

## En surface :

- Saisonnalité
- Alizés (sud-sud-est)

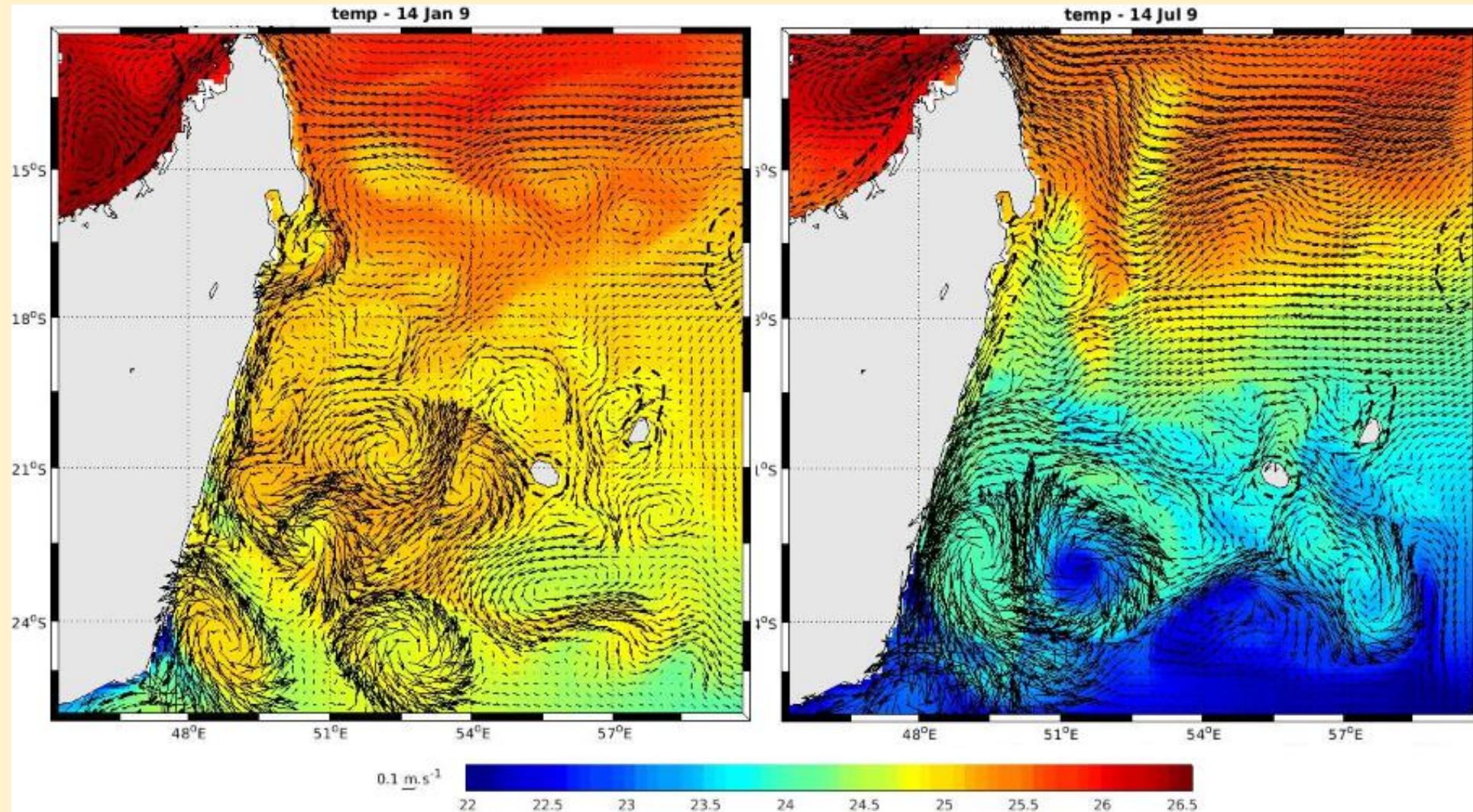


Fig. 8 – Evolution de la température de surface entre l'été (gauche) et l'hiver (droite)

## Salinité

### En surface :

- Idem température
- Saisonnalité & zonation

## Salinité

**En surface :**

→ Idem température

→ Saisonnalité & zonation

**En profondeur :**

Section à 54°E

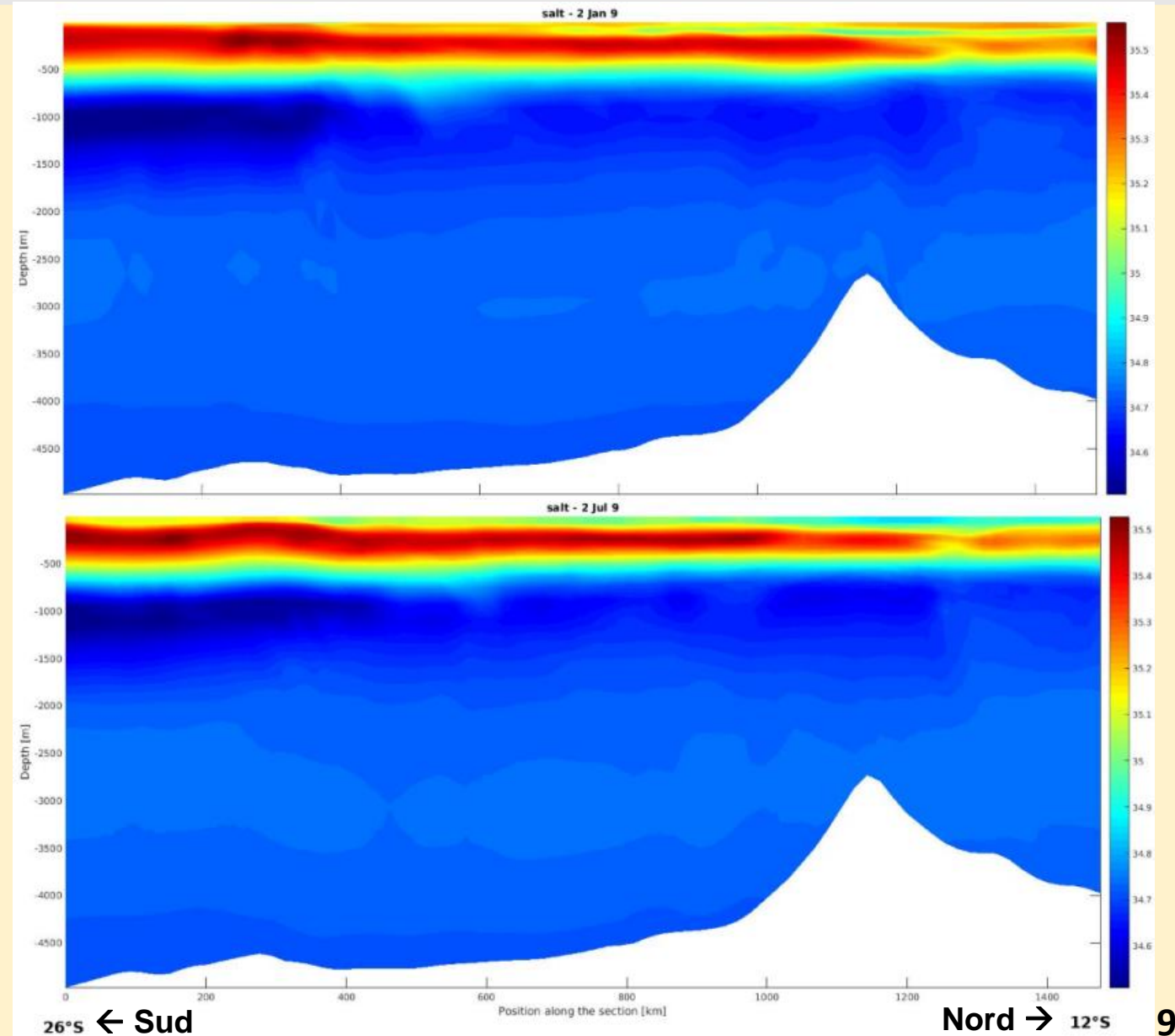


Fig. 9 – Section de salinité en été (haut) et en hiver (bas)



## Salinité

## En surface :

- Idem température
- Saisonnalité & zonation

## En profondeur :

Section à 54°E

- Eté forte évaporation →  $S_{surface} ++$
- Hiver précipitations →  $S_{surface} --$

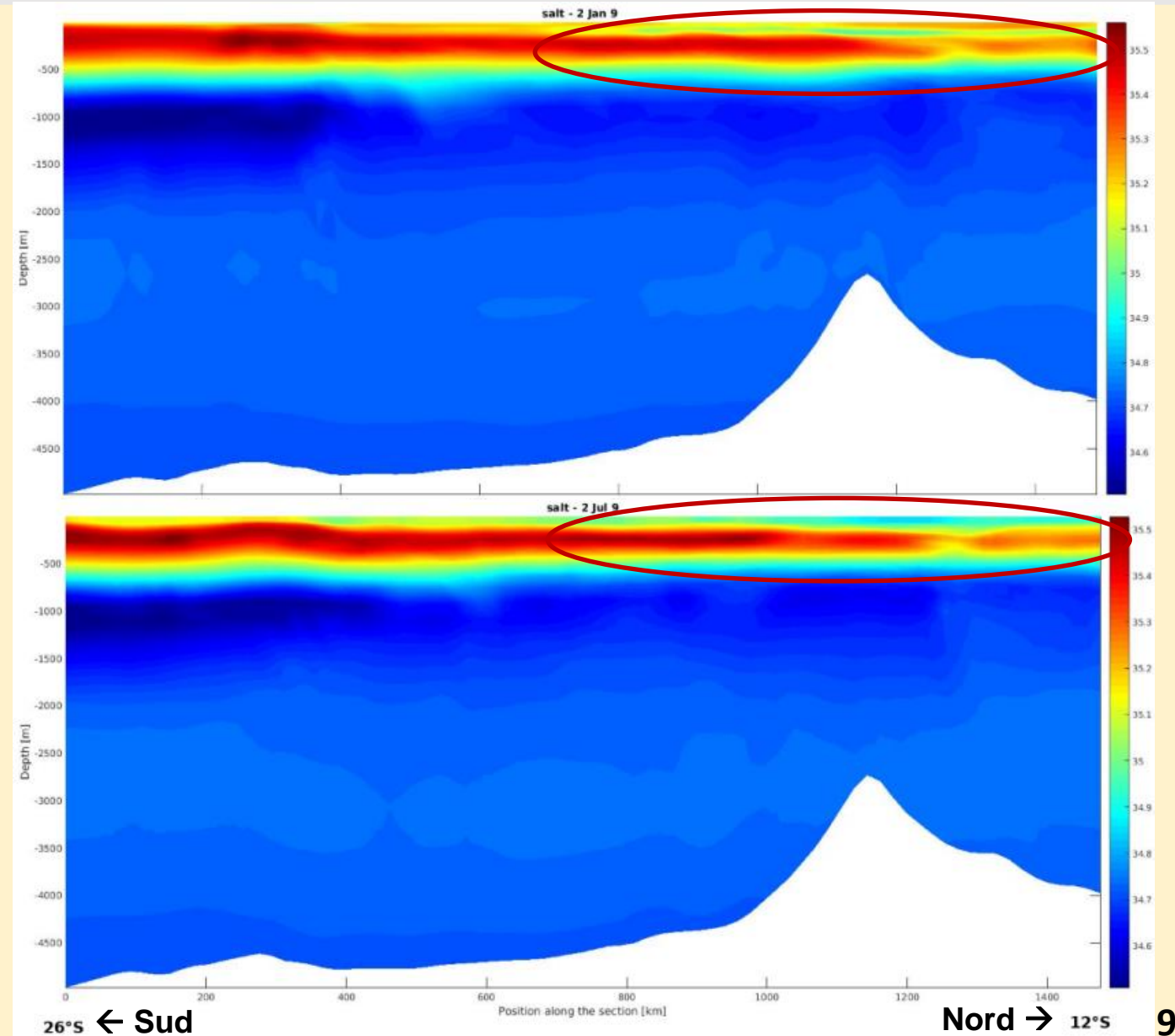


Fig. 9 – Section de salinité en été (haut) et en hiver (bas)

## Circulation océanique dans l'Océan Indien

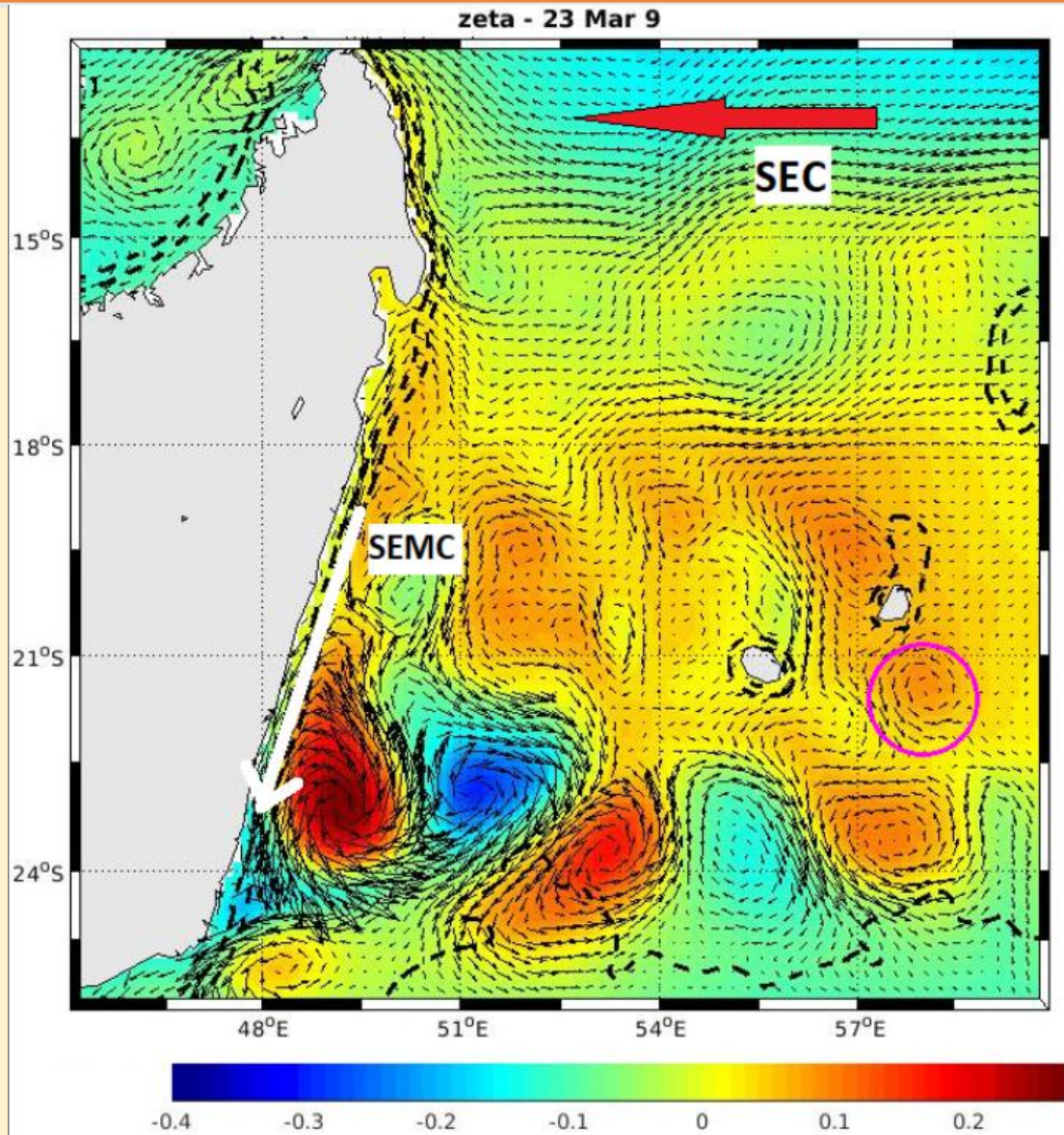
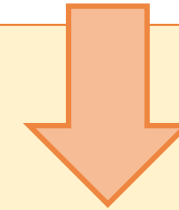


Fig. 10 – Sortie du modèle pour mars de la 9<sup>e</sup> année

### Modélisation :

- Circulation globale vers l'ouest
- Intensification SEMC
- Tourbillons cycloniques et anticycloniques
- Recirculation dans le sillage des 2 îles



### Littérature (Pous et al., 2014) :

- Similitudes
- Tourbillons dans le sillage des îles : expérimentation avec bouées dérivante



## Circulation océanique dans l'Océan Indien

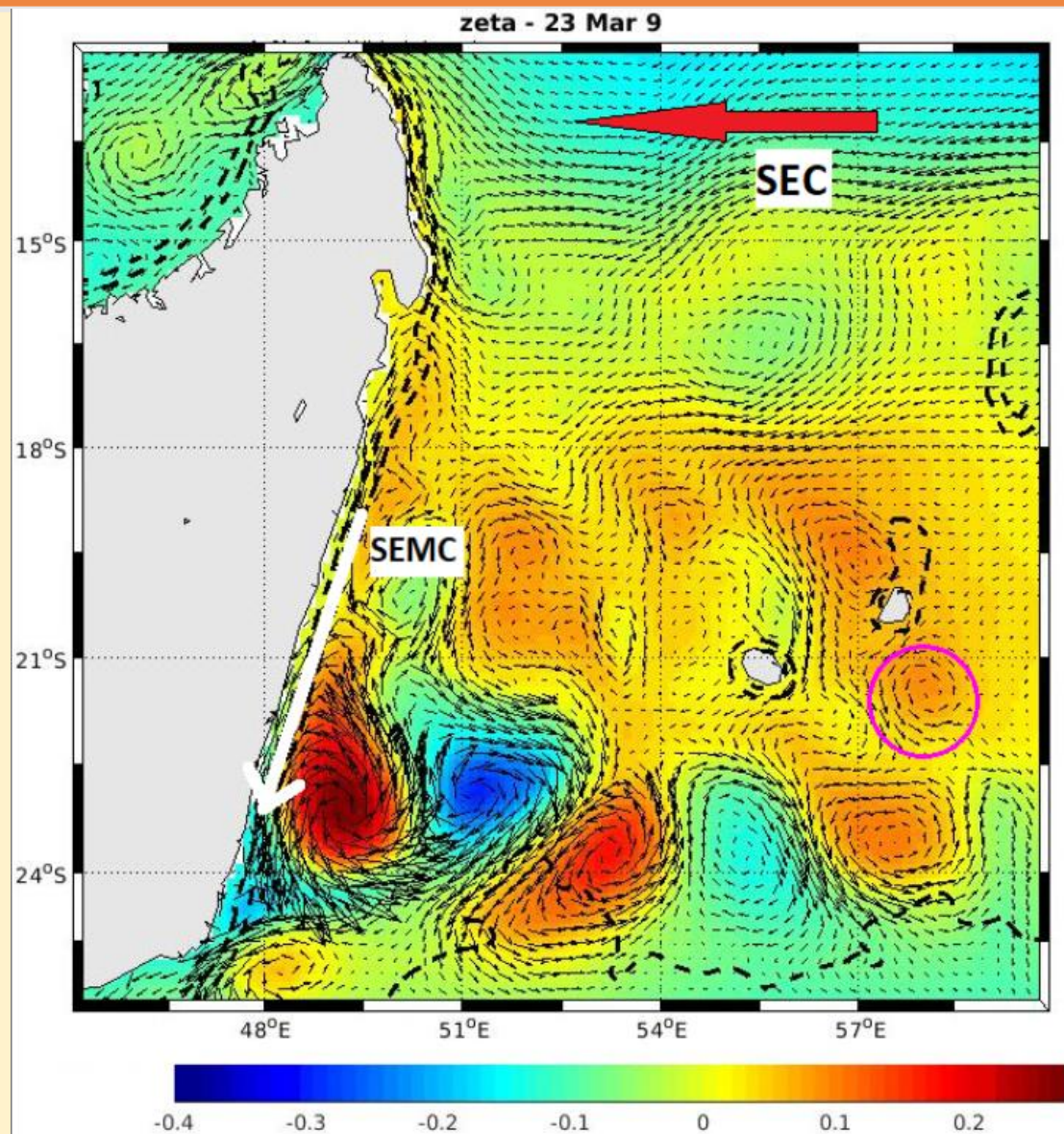


Fig. 10 – Sortie du modèle pour mars de la 9<sup>e</sup> année

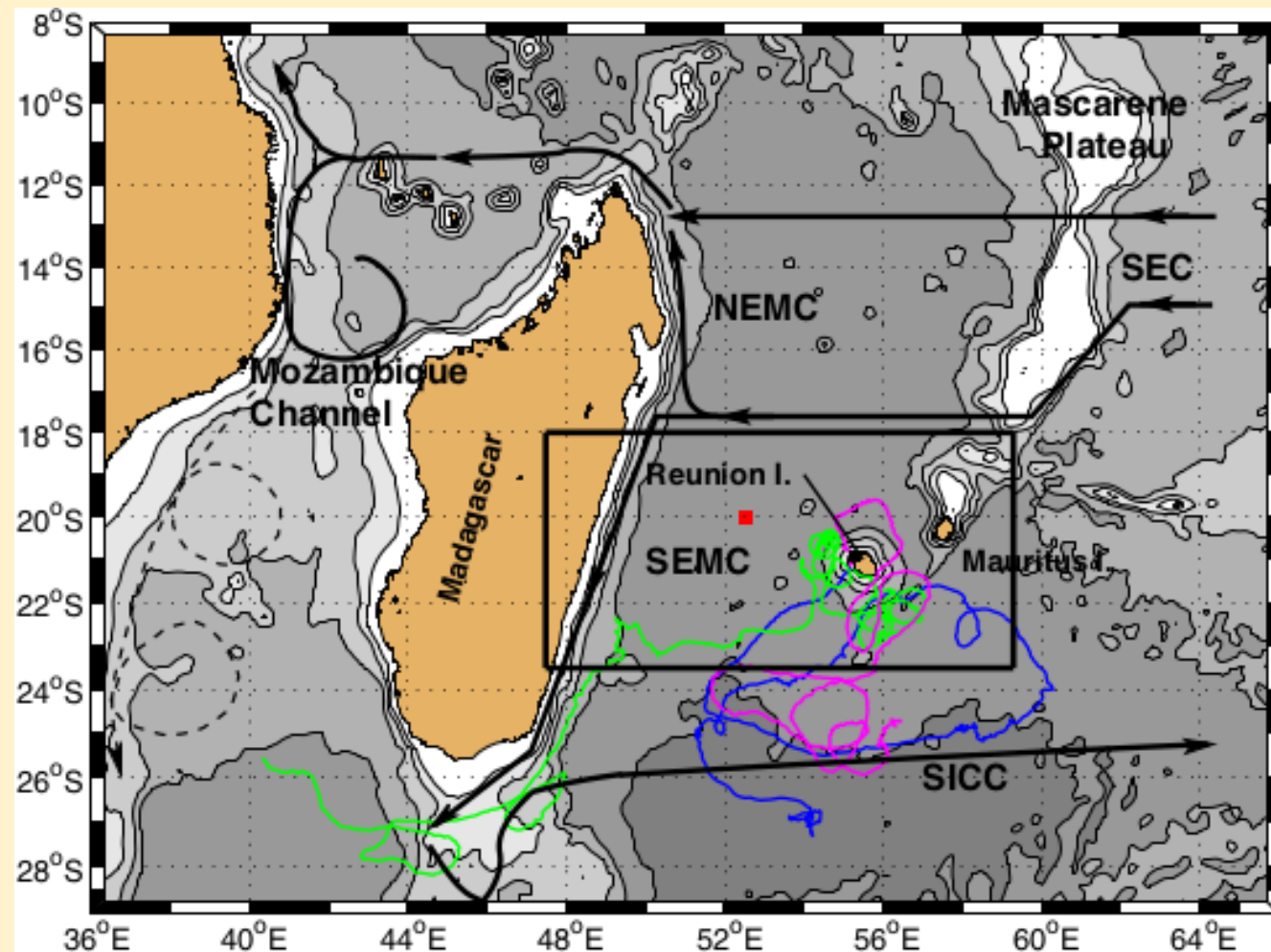


Fig. 11 – Courants de l'Océan Indien et trajectoires de bouées dérivantes (Pous et al., 2014)



## Conclusions sur la circulation océanique et la modélisation

### Circulation océanique du sud-ouest de l'Océan Indien:

- Globalement vers l'ouest : SEC
- Intensification côte est malgache : SEMC
- Cyclones et anticyclones
- Saisonnalité

## Conclusions sur la circulation océanique et la modélisation

### Circulation océanique du sud-ouest de l'Océan Indien:

- Globalement vers l'ouest : SEC
- Intensification côte est malgache : SEMC
- Cyclones et anticyclones
- Saisonnalité

### Modélisation :

- + Bonne idée de la circulation océanique globale
- + Saisonnalité représentée
- x Tourbillons entre les îles non représentés
- x Évènements climatiques ponctuels non représentés

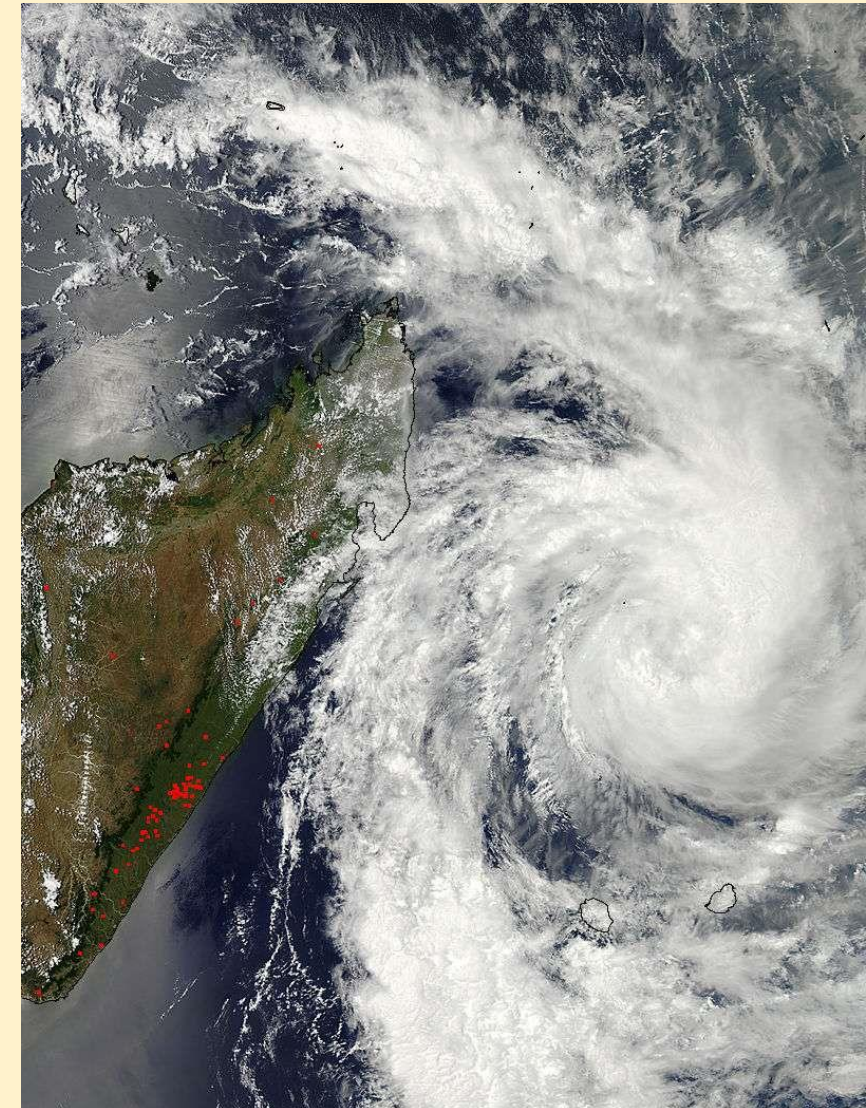


Fig. 12 – Cyclone dans la zone d'étude en février 2022 (Météo France)



## Conclusions sur la circulation océanique et la modélisation

### Circulation océanique du sud-ouest de l'Océan Indien:

- Globalement vers l'ouest : SEC
- Intensification côte est malgache : SEMC
- Cyclones et anticyclones
- Saisonnalité

### Modélisation :

- + Bonne idée de la circulation océanique globale
  - + Saisonnalité représentée
  - x Tourbillons entre les îles non représentés
  - x Évènements climatiques ponctuels non représentés
- ➔ *Affiner la bathymétrie proche des îles*
- ➔ *Prise en compte des vents réels*

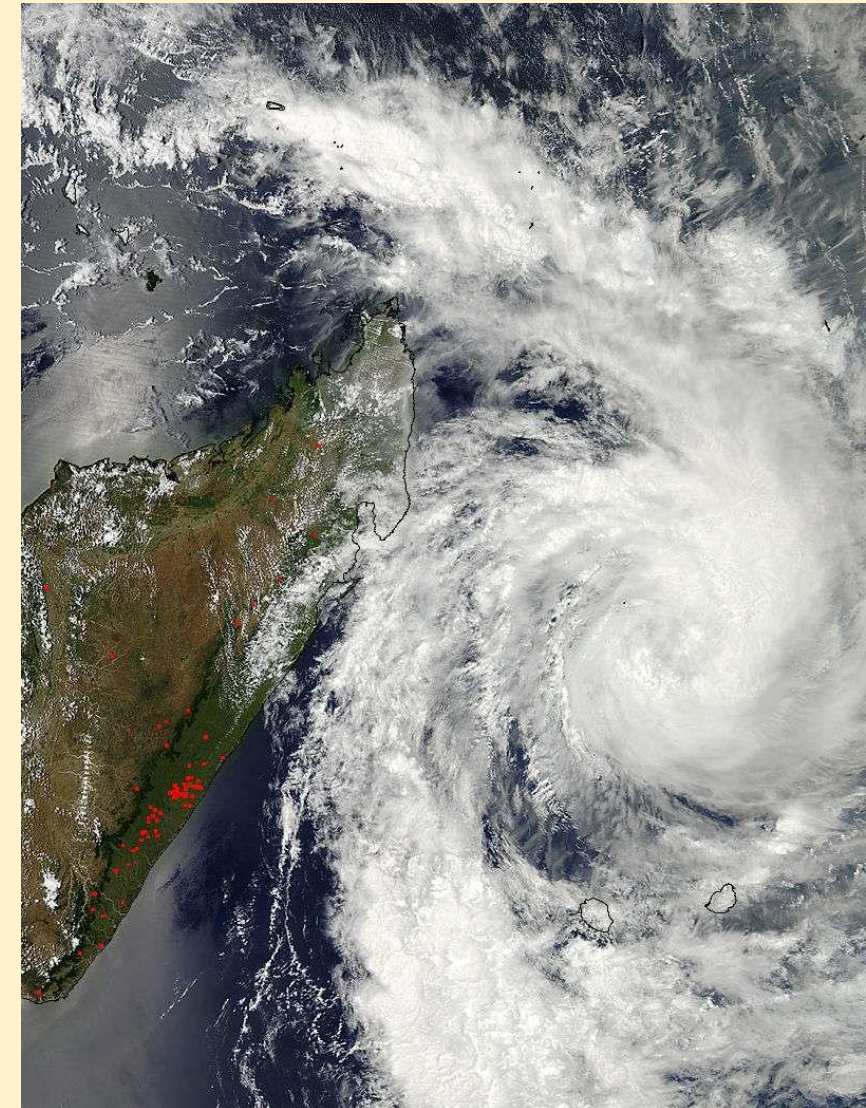


Fig. 12 – Cyclone dans la zone d'étude en février 2022 (Météo France)

## Références

- S. Pous et al., « Circulation around La Réunion and Mauritius Island in the southwestern Indian Ocean : A modeling perspective », *Journal of Geophysical Research: Oceans*, vol. 119, pp. 1957-1976, 2013
- W. De Ruijter et al., « Variability of the southwestern indian ocean », *Philosophical Transactions of the Royal Society*, vol. 363, pp. 63-76, 2004
- B. Piton et Y. Magnier, « Les masses d'eau de l'océan indien à l'ouest et au nord de Madagascar au début de l'été austral », *O.R.S.T.O.M.*, vol. 11, pp. 97-113, 1973