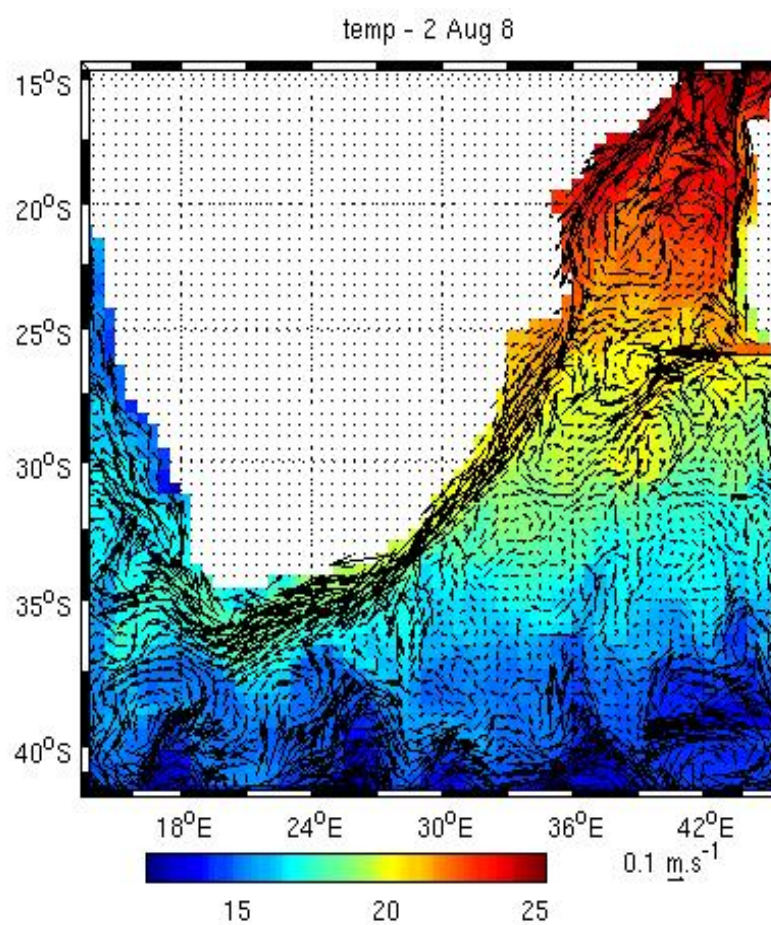


PROJET DE MODELISATION REGIONALE 3D

Introduction au modèle ROMS : *Le courant des Aiguilles.*



SOMMAIRE

- 1) Introduction
- 2) Description du modèle ROMS
- 3) Résultats de simulations
- 4) Comparaison avec description de la littérature
- 5) Conclusion

INTRODUCTION

La modélisation des courants océaniques est une discipline encore récente qui a pu se développer dès le milieu du XXème siècle. Le développement de la puissance de calcul numérique permet aujourd'hui d'utiliser différents types de modèles. A une échelle régionale sont couramment utilisés les modèles SYMPHONIE, POM (Princeton Ocean Model) et ROMS (Regional Oceanic Modeling System) qui est le modèle utilisé ici. Cet outil permet ainsi d'obtenir des simulations assez précises des courants et de diagnostiquer des variables thermodynamiques de manière tridimensionnelle. Le but de cette modélisation océanique est de simuler le courant des Aiguilles, à une échelle régionale en trois dimensions grâce au modèle ROMS. La simulation est réalisée sur une dizaine d'années.

Le courant des Aiguilles a fait l'objet de nombreuses recherches. Ce courant chaud s'écoule depuis le canal du Mozambique dans l'océan Indien en longeant les côtes de l'Afrique du sud, et il décrit des formations tourbillonnaires au passage du cap de Bonne-Espérance, avec une zone de rétroaction du courant. Le courant des Aiguilles, par sa dynamique et ses formations tourbillonnaires au sud, participe à la formation du contre-courant subtropical Indien et donc à la circulation générale de l'océan Indien. Ce courant participe également à la circulation de l'Atlantique puisqu'il est une source de chaleur et de sel en surface au contact des eaux froides de l'Atlantique.

Les résultats de simulation obtenus grâce au modèle ROMS seront ensuite comparés avec des observations *in situ* du courant, issues de la littérature (*Role of the Agulhas Current in Indian Ocean circulation and associated heat and freshwater fluxes*, Harry L. Bryden, Lisa M. Beal, 2000 and *Natal pulses and the formation of Agulhas rings*, Peter Jan Van Leuwen and Will P.M. De Ruijter, 2000).

DESCRIPTION DU MODELE ROMS :

Le fonctionnement du modèle ROMS est basé sur la résolution des équations primitives du mouvement. Ces équations s'appuient sur les équations R.A.N.S (Reynolds Averaged Navier-Stokes), de l'équation de continuité, des équations de conservation de température et de salinité, et de l'équation d'état de l'eau de mer :

$$(1) \quad \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u - f v &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + A_h \nabla_h^2 u + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \cdot \nabla v + f u &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + A_h \nabla_h^2 v + A_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \\ 0 &= \frac{\partial P}{\partial z} + \rho g \end{aligned}$$

$$(2) \quad \begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T &= K_h \nabla_h^2 T + K_v \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \\ \frac{\partial S}{\partial t} + u \cdot \nabla S &= K_h \nabla_h^2 S + K_v \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \end{aligned}$$

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

$$(4) \quad \rho = \rho(T, S, z)$$

La résolution de ces équations permet de déterminer les valeurs de vitesse et les caractéristiques thermodynamiques du courant. Le principe est de donner une prévision des caractéristiques de la masse d'eau au temps $t+1$, en implémentant dans le modèle décrit par les équations primitives les données de la masse d'eau au temps t , ainsi que les conditions limites aux frontières. En surface, ces équations prennent en compte la tension de surface due au vent, le flux de chaleur et le flux de sel par évaporation et pluie. Au fond, les équations prennent en compte les frictions de fond. Le modèle ROMS est décrit comme un modèle de surface libre pour les approximations de surface, et suppose une discrétisation verticale en coordonnées sigma généralisées. La grille utilisée par le modèle est de type Arakawa C décentrée.

Des outils sont également utilisés pour faire tourner le modèle : Romstools. Romstools sont des outils sous forme de script Matlab, ils permettent ainsi d'interpréter le modèle. Ces outils permettent de mettre à disposition du modèle une grande quantité de données pour faire tourner le modèle : conditions initiales de températures, de salinité, de courant, d'élévation, conditions de forçage de surface, conditions aux frontières, et caractéristiques de la grille (topographie de fond, taille des mailles etc). Ces outils de données sont alimentés par des bases globales de données océanographiques et climatologiques telles que WOA pour la température et la salinité, TPX pour l'altimétrie, Topex pour la bathymétrie, SeaWifs, QuickSCAT, etc.. Toutes ces données ainsi que les fichiers propres au modèle ROMS ont pu être téléchargés après inscription sur la liste des utilisateurs de ROMS. Une fois tous les fichiers téléchargés, l'utilisation du modèle ROMS pour une zone choisie se fait en deux principales étapes : une étape de préparation et de traitement de la grille et une étape de compilation du modèle.

La zone modélisée choisie ne doit pas se situer à des latitudes trop extrêmes car le modèle ROMS est utilisé ici sur un plan horizontal avec des coordonnées cartésiennes. La forte sphéricité des plans aux hautes latitudes nécessiteraient l'utilisation de coordonnées sphériques.

Le choix de la zone géographique pour le modèle s'effectue grâce au script Matlab `ad_findgeocoord` qui permet une délimitation précise de la zone de calcul. Les coordonnées choisies pour le modèle du courant des Aiguilles sont : de 13° à 46° de longitude Est et de 14° à 42° de latitude Sud. Les principaux paramètres de la grille sont ensuite déterminés par le fichier `romstools_param` avec les scripts Matlab `make_grid`, `make_clim` et `make_forcing`, qui permettent de fixer la résolution du modèle, la taille de la maille de grille et les conditions de frontières ouvertes. On obtient alors une carte de bathymétrie (cf Figure 1) :

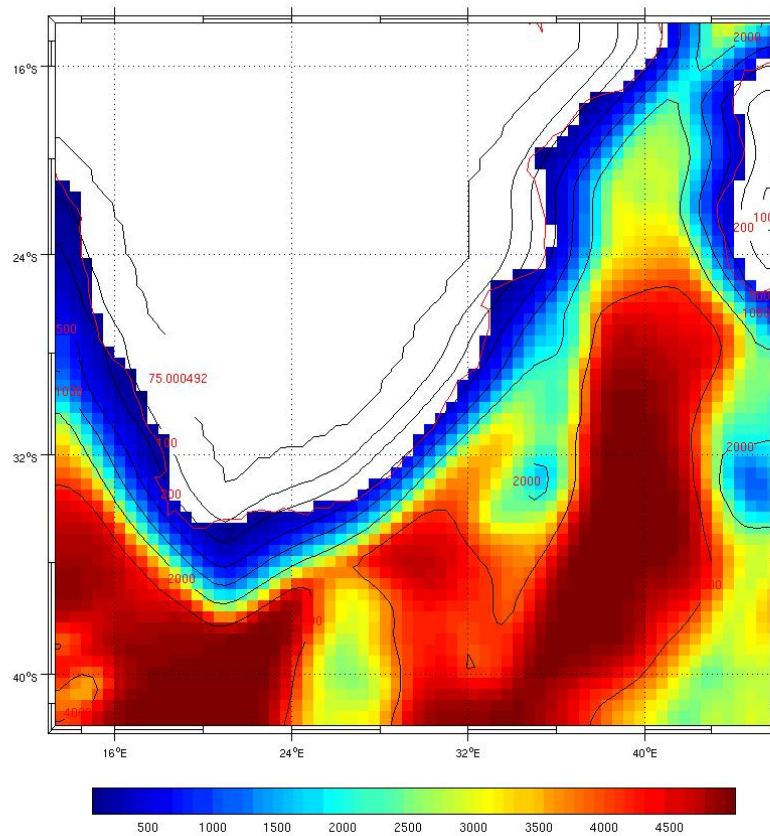


Figure 1 : bathymétrie de la zone modélisée, avec $H_{\max} = 5000$ m.

Le script Matlab `ad_cfl` permet ensuite de déterminer le pas de temps interne et externe de calcul, afin de respecter le critère CFL du modèle et par technique de séparation des pas de temps (*mode splitting*). Ce critère est un indicateur de la stabilité du modèle. Le calcul de ces pas de temps peut également se faire manuellement sans utiliser `ad_cfl`. La vérification de ces pas de temps, ainsi que la durée de simulation s'effectue grâce au fichier `roms.in`.

Critère CFL pour le pas de temps externe :

$$\Delta t_E \leq \frac{1}{\sqrt{g h_{\max}}} \left[\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right]^{-\frac{1}{2}}$$

Le calcul du pas de temps externe permet de déterminer le pas de temps interne :

Calcul du pas de temps interne (variable NTDFAST) :

$$30 < \frac{\Delta t_I}{\Delta t_E} < 80$$

On réalise deux types de simulation pour le modèle. Une première simulation est effectuée grâce au fichier `roms.in` sur un mois, en considérant des mois de trente jours. La durée de simulation (NTIMES) est fixée par le calcul : $\text{NTIMES} = (30 \times 86400) / \Delta t_I$.

Une deuxième simulation, pluriannuelle, est effectuée sur dix ans. Le fichier `run_roms.csh` permet d'obtenir les simulations sur plusieurs années.

Pour ce modèle du courant des Aiguilles, une résolution de $\frac{1}{2}$ a été fixée dans `romstools_param`. Le modèle indique ainsi une résolution de maille de 48,3 km. Les paramètres de pas de temps et de temps de calcul ont été déterminés : avec $\Delta t_{E_{\text{cfl}}} = 86,25$ et NTDFAST = 60 itérations, on obtient un

pas de temps interne ΔT_i de 5175 sec pour ce modèle.

RESULTATS :

Les résultats de simulation sont rendus visibles par l'outil Roms_gui qui traite les sorties de modèle en créant des graphiques sous forme de profils ou de séries temporelles.

-Résultat de simulation sur un mois :

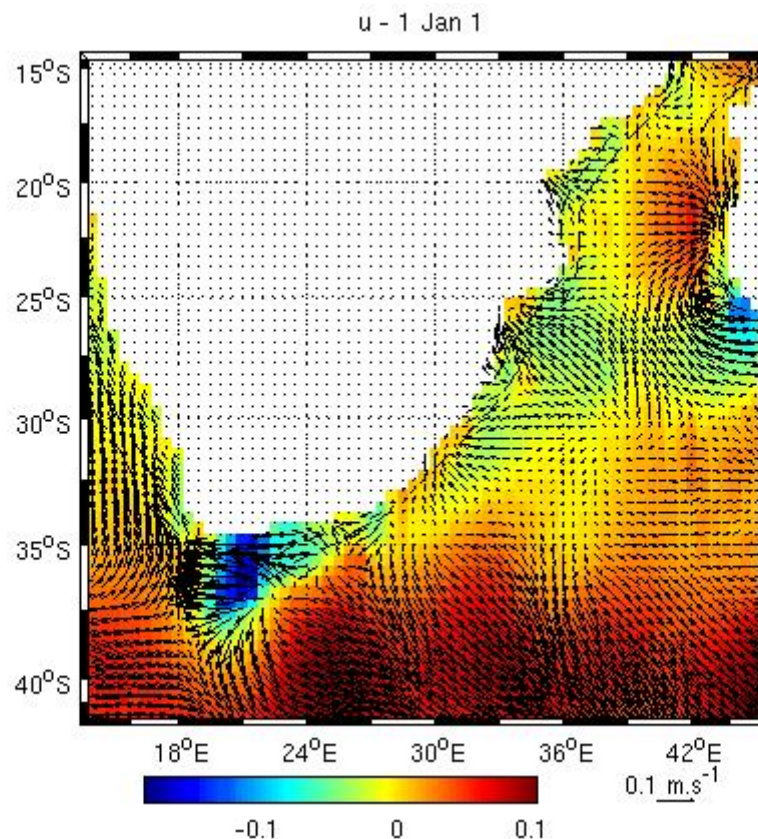


Figure 2 : simulation pour la vitesse de courant et hauteur Zêta.

La Figure 2 constitue le résultat du premier test de simulation du modèle pour un seul mois. Sur cette figure sont simulées la vitesse du courant et la surélévation (variable zêta) du niveau de la mer. Cette simulation sur un mois permet ensuite de lancer le modèle pour une simulation sur 10 ans.

Le programme roms_diags permet d'effectuer une série de tests pour diagnostiquer la stabilité du modèle. Ces tests indiquent à partir de quel moment le modèle devient stable sur une simulation de dix années (Figure 3).

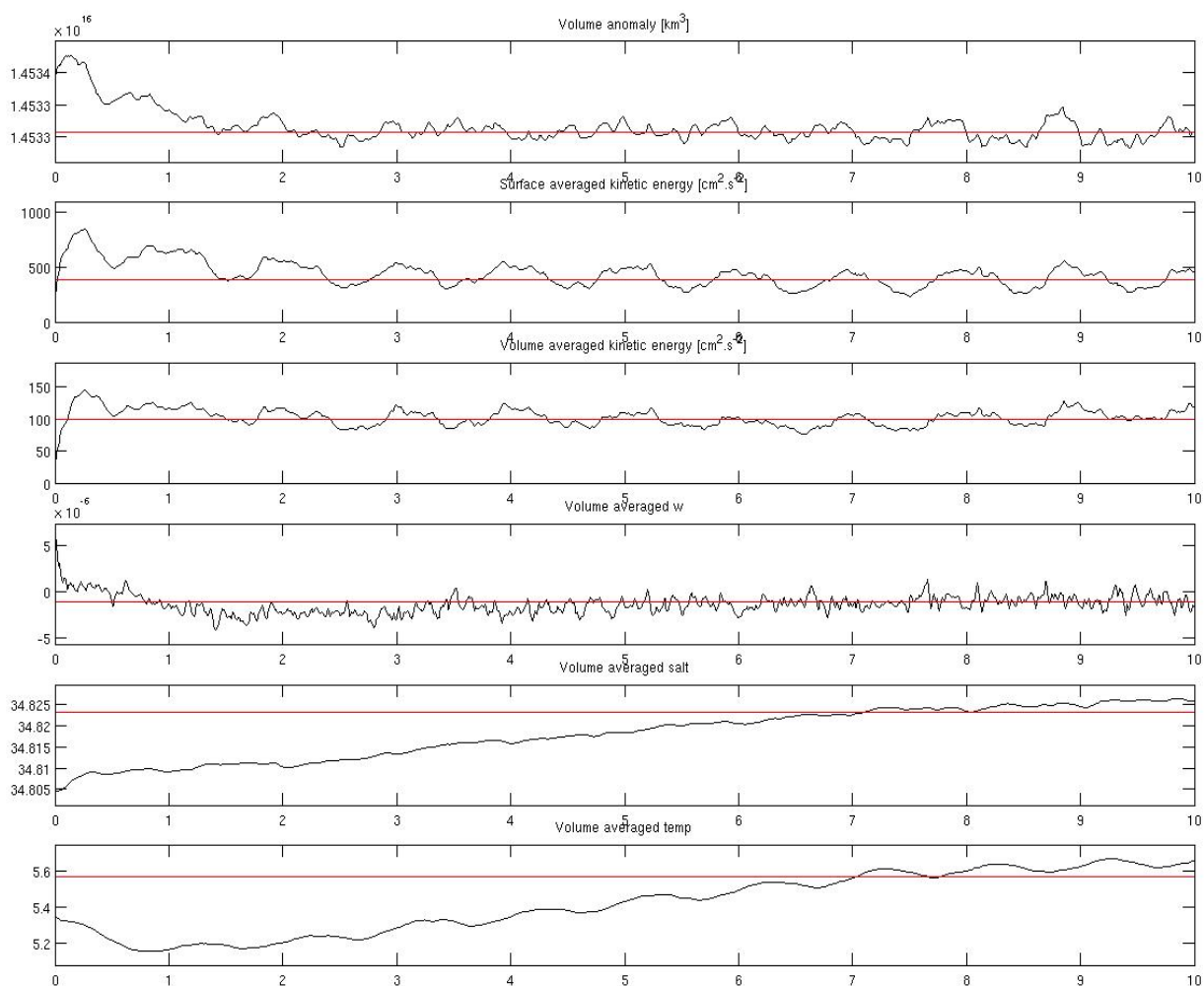


Figure 3 : Diagnostique de stabilité du modèle

Le diagnostique de stabilité montre six variations de paramètres pour la simulation sur dix ans : l'anomalie de volume, l'énergie cinétique de surface moyennée, l'énergie cinétique de volume moyennée, la vitesse w de volume moyennée, la salinité de volume moyennée, et la température de volume moyennée. L'évolution des diagrammes diagnostiques permettent d'évaluer la stabilité du modèle. La figure 3 montre ainsi que la stabilité du modèle est différente selon les paramètres étudiés. En effet, le modèle devint relativement stable à partir de 18 mois en moyenne. On observe cependant une variation différente pour les paramètres de température et de salinité, ces deux paramètres semblent moins stable que les autres puisque la stabilisation de la salinité est observée entre la 6ème et la 7ème année et l'évolution de la température est croissante sur l'ensemble des dix années. La différence de stabilisation pour ces deux paramètres est néanmoins à relativiser car l'échelle en ordonnée pour la température et la salinité est très faible, ce qui supposerait une stabilisation plus semblable aux autres paramètres.

-Résultats de simulation pluriannuelle :

Pour les simulations pluriannuelles, les variations de température et de salinité restent assez faibles à l'échelle d'un seul mois. On peut alors comparer l'évolution de ces paramètres en fonction des saisons, avec ici la variation des températures entre le mois de mars, juin, août et novembre pour la 9ème année de simulation (Fig 4a, 4b, 4c et 4d). L'évolution de la salinité est visible sur la figure 4e (mois de mars de l'été austral) et sur la figure 4f (mois d'août de l'hiver austral). Les dates et les mois ont été choisis en fonction de la qualité des simulations obtenues au sein de chaque saison.

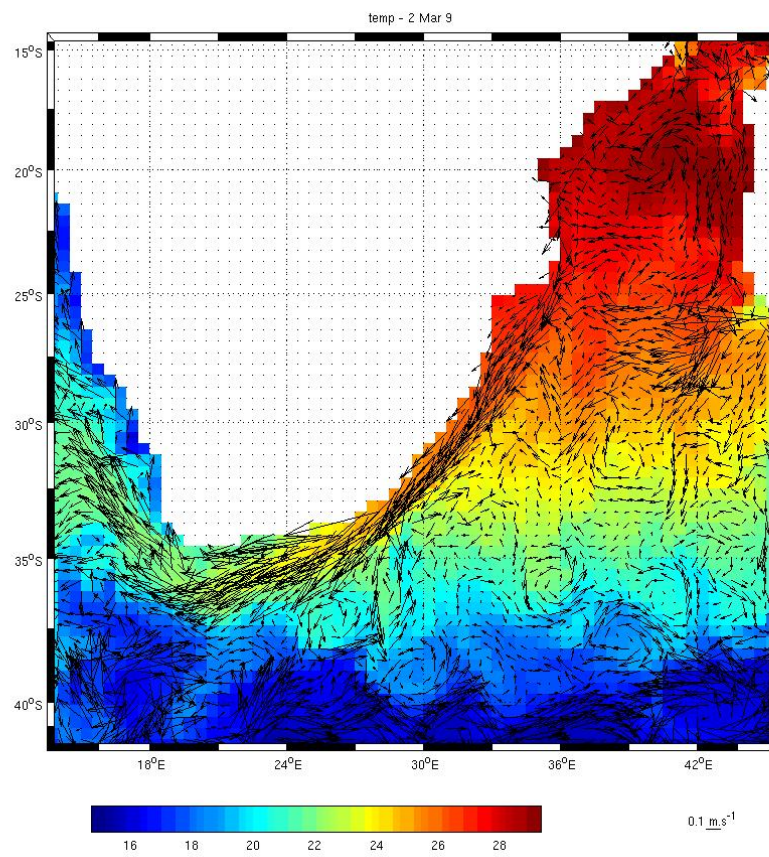


Fig. 4a) Températures au 2 mars et vitesse du courant.

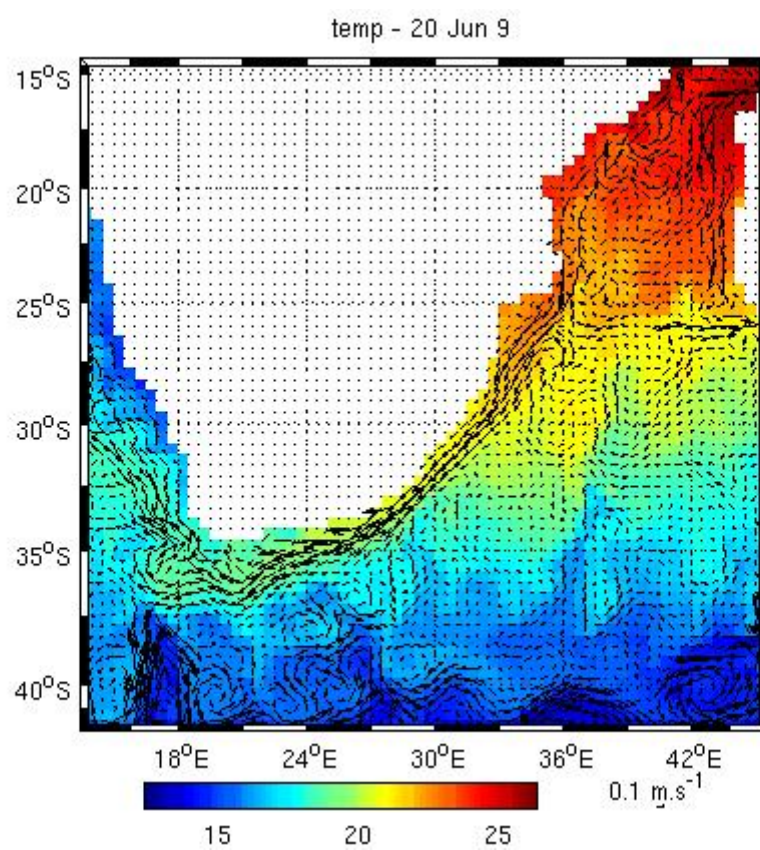


Fig. 4b) Températures au 20 juin et vitesse du courant.

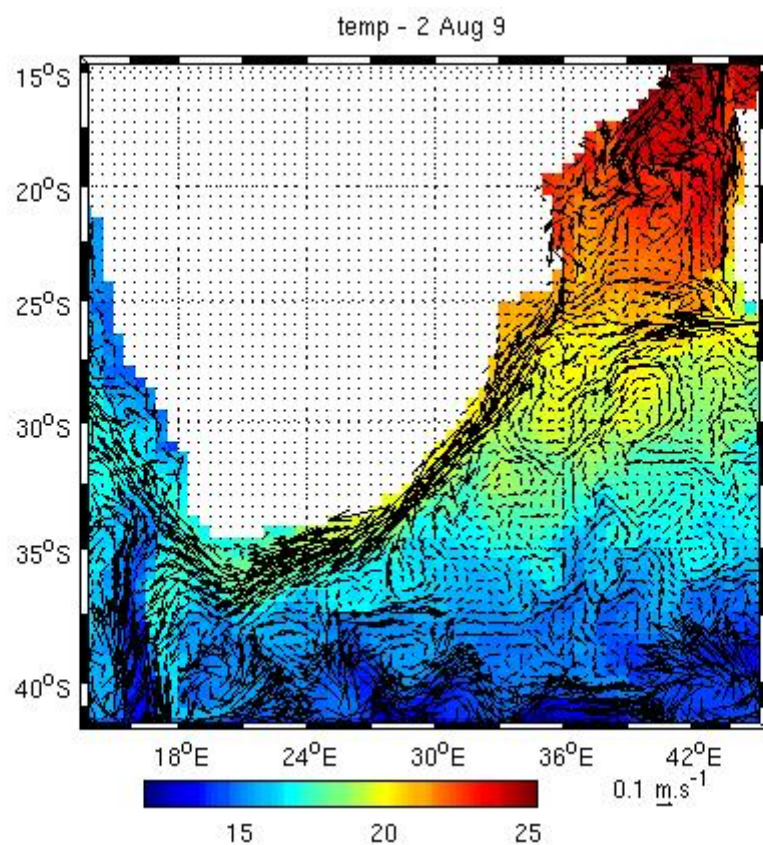


Fig. 4c) Températures au 2 août et vitesse du courant.

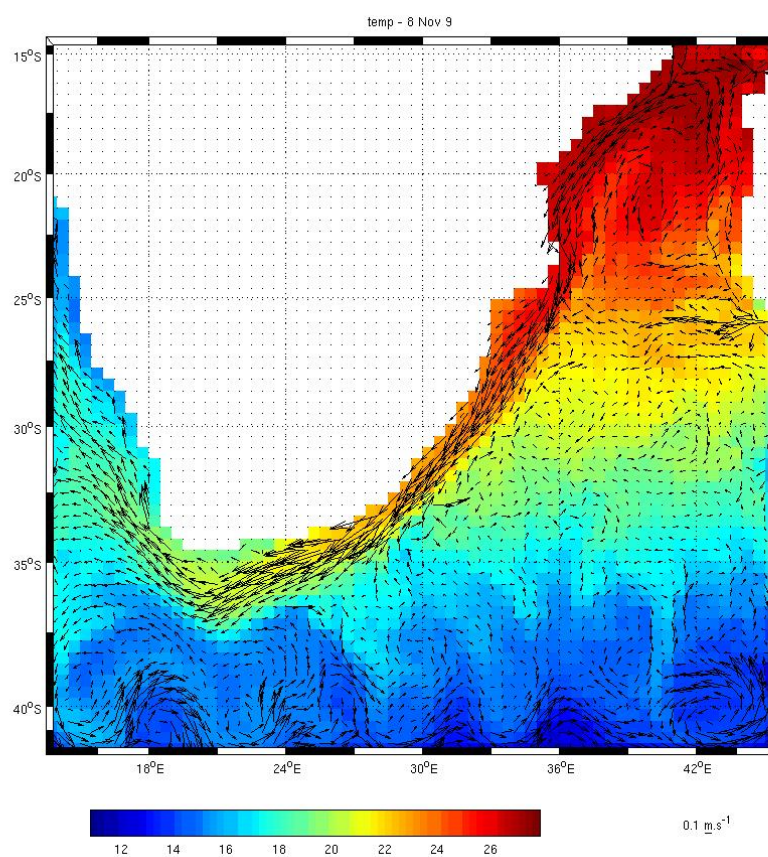


Fig. 4d) Températures au 8 novembre et vitesse du courant.

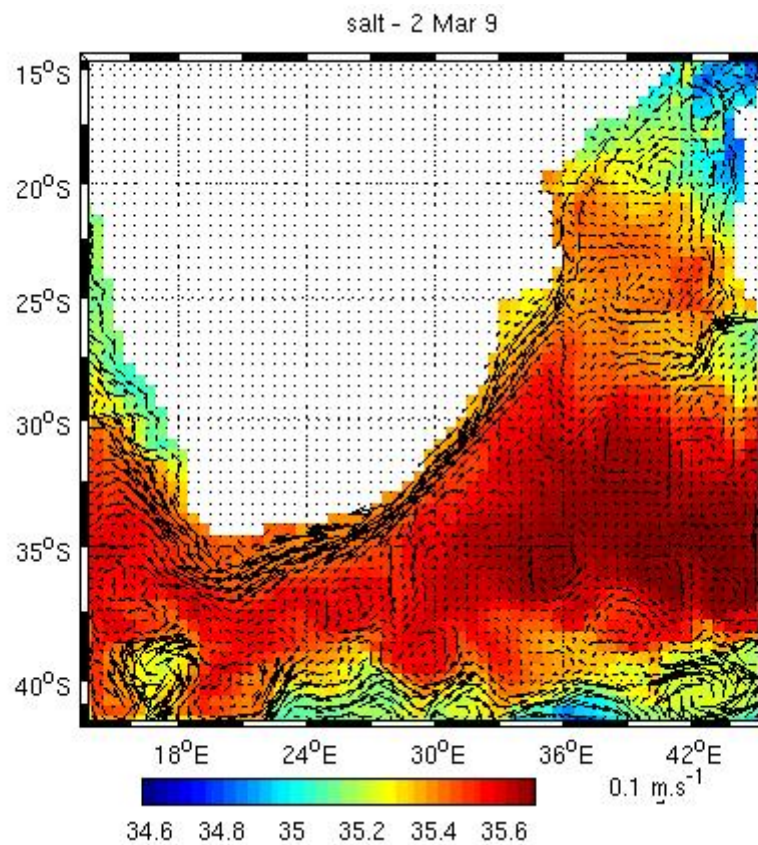


Fig. 4e) Salinité au 2 mars et vitesse du courant.

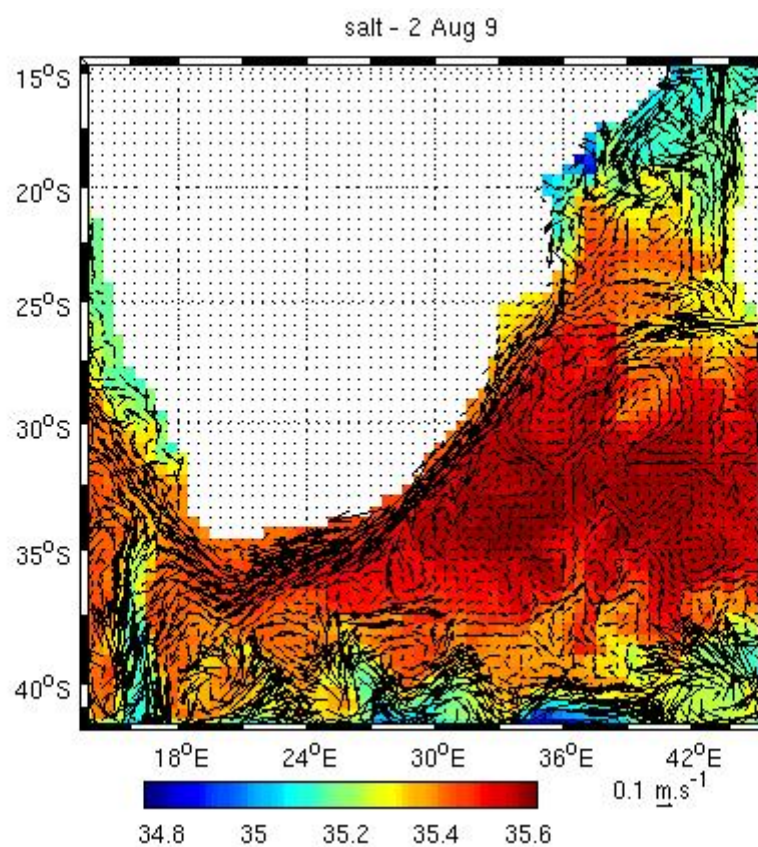


Fig. 4f) Salinité au 2 août et vitesse du courant.

Le modèle nous permet également d'observer l'évolution des zones de dépression par le suivi des variations de hauteur de surface libre zêta entre l'été austral (Fig 5a) et l'hiver austral (Fig 5b) :

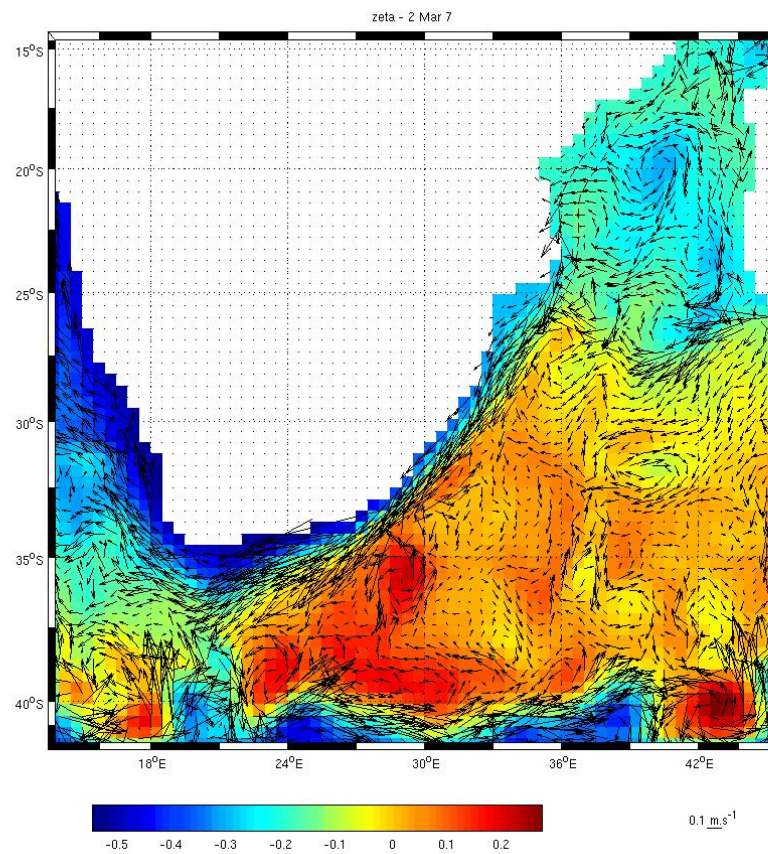


Fig. 5a) Hauteur zêta au mois de mars et vitesse du courant.

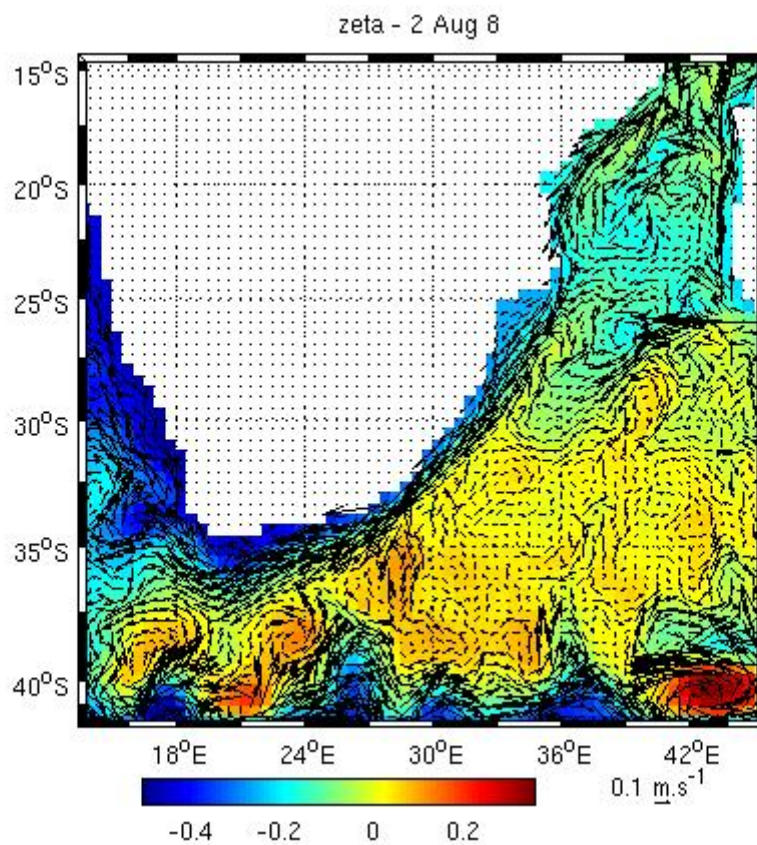


Fig. 5b) Hauteur zêta au mois d'août et vitesse du courant.

DISCUSSION :

Concernant les résultats des caractéristiques du courant : la simulation des températures montrent bien la « route » chaude tracée par le courant, et l'alimentation du courant des Aiguilles par le canal du Mozambique. La simulation sur un mois rend bien compte du phénomène de réflexion du courant au sud du cap de Bonne-Espérance.

Le modèle montre également la variation des températures et l'apport d'eau chaude par le canal du Mozambique, ainsi que les variations de salinité entre l'été austral et l'hiver. La salinité reste globalement très élevée dans cette zone, avec une augmentation en surface des hautes salinités durant l'été austral.

Les simulations des variations saisonnières de la hauteur de la colonne d'eau montrent des formations anticycloniques avec des hauteurs plus importantes pendant l'été austral que pendant l'hiver austral (mois d'août).

Les résultats des simulations et de diagnostic de stabilité pourraient apporter d'autres informations en modifiant la résolution du modèle, avec un temps de calcul plus long pour la taille de la zone étudiée ici.

Comparaisons par rapport à la littérature :

Les résultats de simulation peuvent être comparés à des profils et des descriptions du courant de la littérature, l'intérêt étant également de mettre en parallèle des simulations numériques et des résultats de campagnes.

L'article de Bryden et Beal (2000) présente, à travers l'étude des flux de chaleur horizontale, une coupe verticale du courant des Aiguilles soit une section de vitesse de courant de la côte vers le large sur une profondeur de 2400 m, de février 1995 jusqu'à avril 1996.

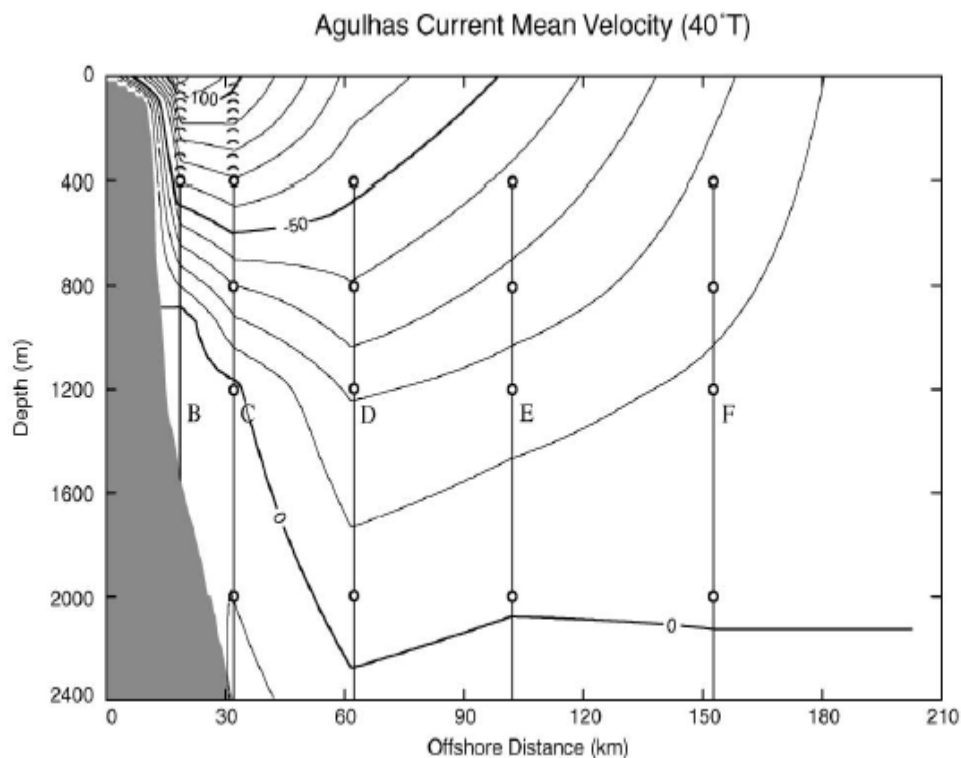


Figure 6 : section verticale de vitesse de courant des Aiguilles

On obtient avec ROMS, pour la même zone (31°Sud - $32,5^{\circ}\text{Sud}$ et 30°Est - 32°Est), une section verticale de la vitesse du courant (Figure 7) pour le 2 mars de l'année 9 :

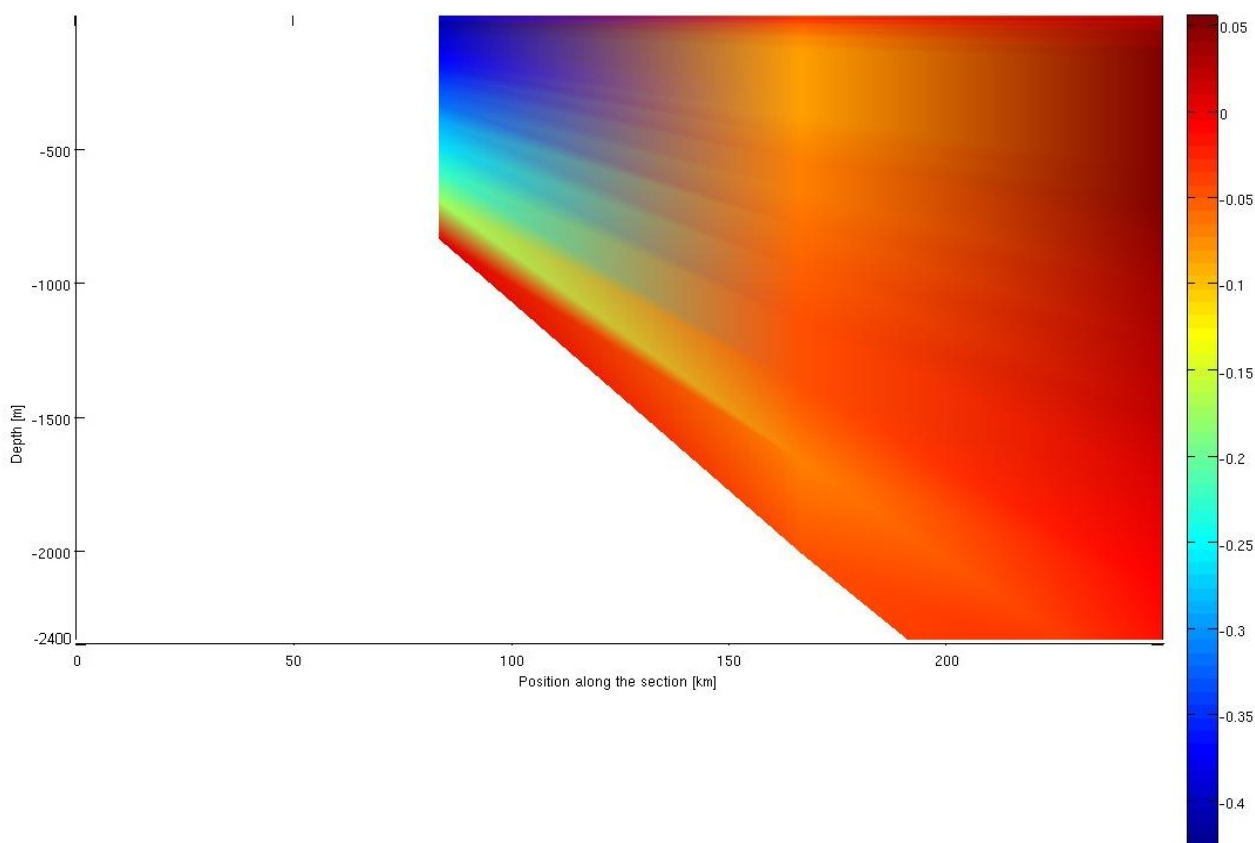


Figure 7 : section verticale de la vitesse de la côte jusqu'à 200 km des côtes au mois de mars.

Le profil de section obtenu avec ROMS est relativement similaire à la figure décrite par l'article : la section de vitesse de l'article est décrit comme un profil en V et on retrouve globalement cette structure en V dans le modèle avec un minimum vers 1500 m sur le profil de l'auteur et du modèle. Bien que les moyennes de vitesse suivent la même allure, on remarque cependant une sous-estimation en surface pour le modèle.

Bien que l'article de Van Leeuwen et al. (2000) s'intéresse surtout au mécanisme de formation de ces tourbillons (les zones d'impulsion), il montre également la variation saisonnière des tourbillons et des méandres au sud :

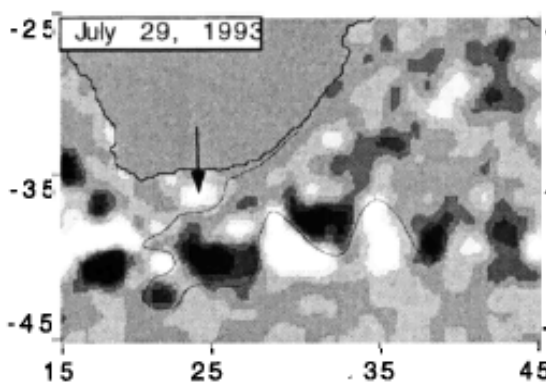


Figure a

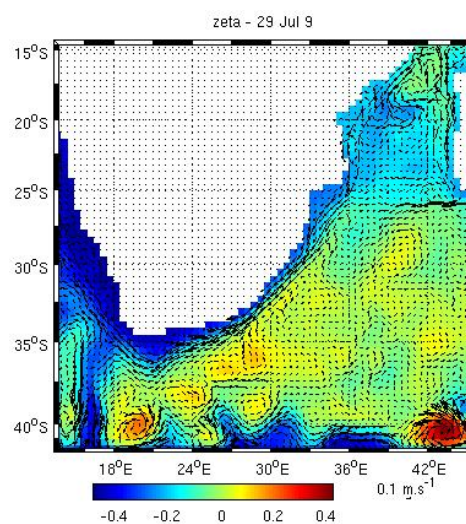


Figure b : hauteur zeta

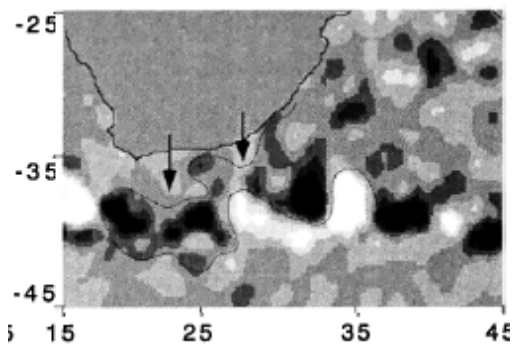


Figure c (20 septembre 1993)

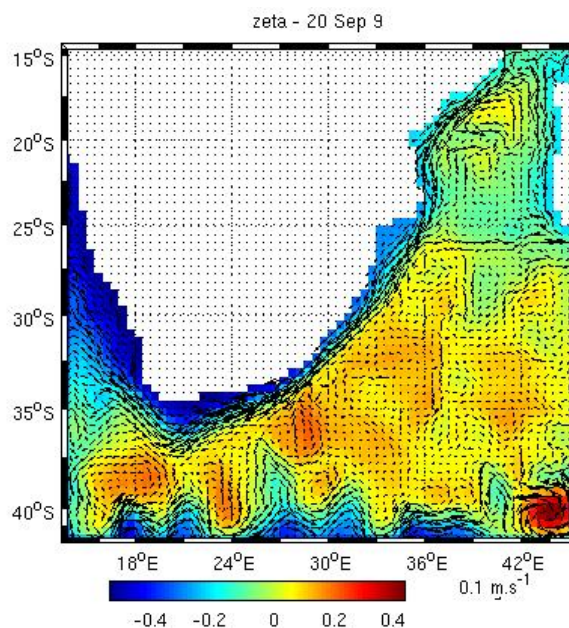


Figure d : hauteur zêta 20 septembre

On peut alors comparer l'évolution des tourbillons et méandres à deux saisons différentes. Les zones blanches de la figure a et de la figure c représentent les zones de dépression cycloniques et les zones foncées représentent les zones de surélévation anticycloniques. On peut remarquer que certaines structures tourbillonnaires se retrouvent entre les résultats de l'article (observations d'altimétrie satellites) et le modèle ROMS. La zone entre 35°S et 40°S montre en effet des correspondances de hauteur zêta entre le graphique (Fig. a) et la simulation à l'année 9 (Fig. b) pour la date du 29 juillet. Au niveau de la variation saisonnière, on remarque pour le 29 juillet (Fig. b) une zone de dépression au sud-ouest près de la côte vers 35°sud et 18°E qui évolue en une zone de surélévation au 20 septembre (Fig. d). Cette zone semble montrer la même évolution pour la figure a (date du 29 juillet) et la figure c (date du 20 septembre).

CONCLUSION

Le modèle Roms permet donc d'analyser de nombreux paramètres sur la zone d'étude et de montrer l'évolution de ces paramètres en fonction de la saison.

Les résultats de simulation pourraient être améliorés en effectuant d'autres tests et en modifiant la résolution du modèle. De plus, après avoir comparé les simulations avec les données de la littérature, il serait peut-être intéressant de réduire la zone de calcul à certaines régions où les phénomènes de méandres et de formation de tourbillons (notamment dans la zone de rétroaction du courant) deviendraient plus visibles avec une plus grande résolution. Malgré une résolution assez faible, le modèle met en évidence la dynamique des « anneaux » des Aiguilles et des méandres au sud, avec des formations de hautes pression anticycloniques et de des formations de basse pression cycloniques.

REFERENCES :

- *Role of the Agulhas Current in Indian Ocean circulation and associated heat and freshwater fluxes.* Harry L. Bryden, Lisa M. Beal, 2000, Deep-Sea Research.
- *Natal pulses and the formation of Agulhas rings.* Peter Jan van Leeuwen and Will P.M. De Ruijter, 2000, Journal of geophysical research.