

Nils HERRY

M2 Physique de l'Océan et du Climat

MODÉLISATION NUMÉRIQUE - PROJET FINAL

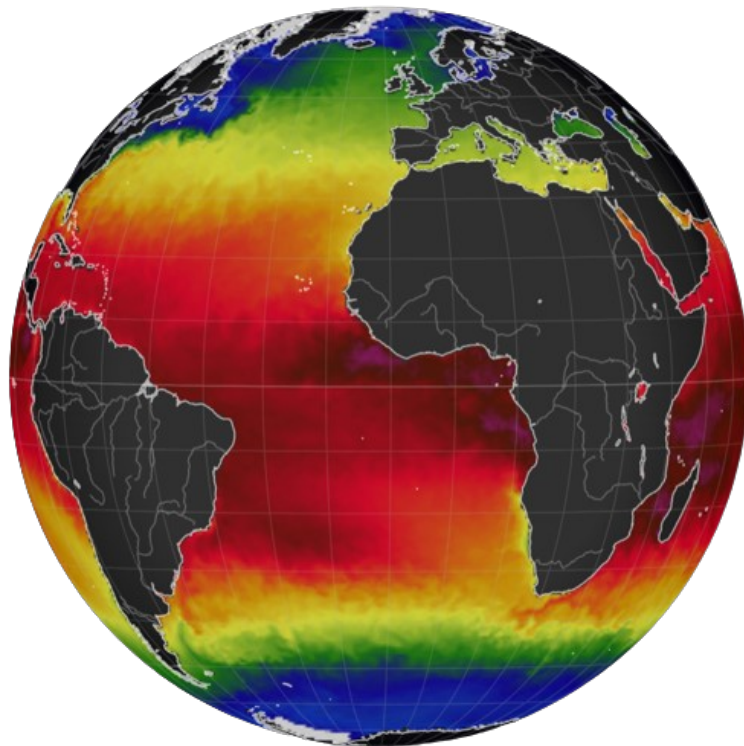


Table des matières

Introduction	1
1 Méthode	1
2 Résultats	2
2.1 Energie cinétique de surface	2
2.2 Température	2
2.3 Vorticité relative normalisée par le paramètre de Coriolis local	2
2.4 Vitesses moyennes de surface	7
2.5 Sections zonales et méridiennes	7
2.6 Variance de la SSH	10
2.7 Energie cinétique turbulente de surface EKE	11
Bibliographie	12

Introduction

La modélisation numérique océanique est un sujet de recherche important. Les modèles sont utilisés pour les prévisions du temps mais aussi pour les projections du climat. Ils permettent aussi de mieux comprendre les dynamiques complexes des différents états de l'océan de la petite échelle vers la grande échelle.

Dans ce rapport, nous nous concentrons sur la modélisation d'une région géographique choisie (le courant des Aiguilles) pour laquelle on présente les résultats obtenus à partir du modèle CROCO.

Ce rapport présente d'abord brièvement les modifications apportées au modèle dans le cas de la zone étudiée. Ensuite, les résultats du modèle sont analysés et comparés à la littérature et aux observations afin de valider le réalisme de la simulation.

1 Méthode

La zone géographique choisie pour la modélisation (figure 1) s'étend de 5°E à 50°E et de 15°S à 50°S, et correspond au courant des Aiguilles au sud de l'Afrique du Sud. Cette région de transition entre l'océan Atlantique, l'océan Indien et le courant circumpolaire Antarctique fait de ce courant une circulation majeure de l'hémisphère Sud. Il est d'ailleurs le courant d'Ouest le plus puissant de l'Hémisphère Sud avec un transport moyen d'environ 80Sv [BEHL15].

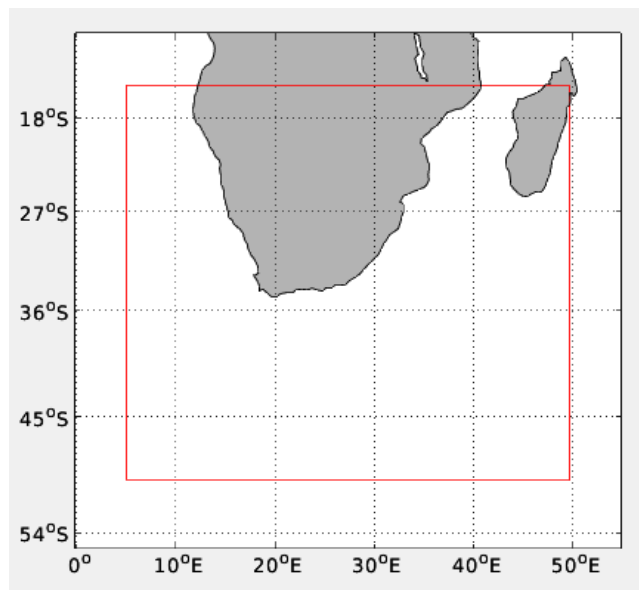


FIGURE 1 – Zone géographique étudiée

Le modèle CROCO est constitué de plusieurs fichiers qu'il faut modifier et adapter à notre simulation. Dans un premier temps, on ajoute au modèle une grille, un forçage atmosphérique, un état initial ainsi que des côtés latéraux de grille.

Ensuite, les latitudes et longitudes minimales et maximales de la zone étudiée ainsi qu'une résolution horizontale de $1/3^\circ$, soit environ 30km sont précisées.

Il est également nécessaire de prendre en compte les pas horizontaux et vertical, c'est-à-dire le nombre de noeuds pour les trois dimensions (LLm = 134, MMm, 128, N=32).

Enfin, un aspect important de la simulation est le choix du pas de temps. En effet, il est important de choisir un pas de temps maximal tout en respectant la condition barotrope ($Cu < 0.89$) et cohérent avec les résolutions horizontales du domaine. Dans notre cas, nous prenons un pas de temps maximal de 4000s.

La simulation est faite sur une durée de 2 ans, en sauvegardant les données tous les 5 jours.

2 Résultats

2.1 Energie cinétique de surface

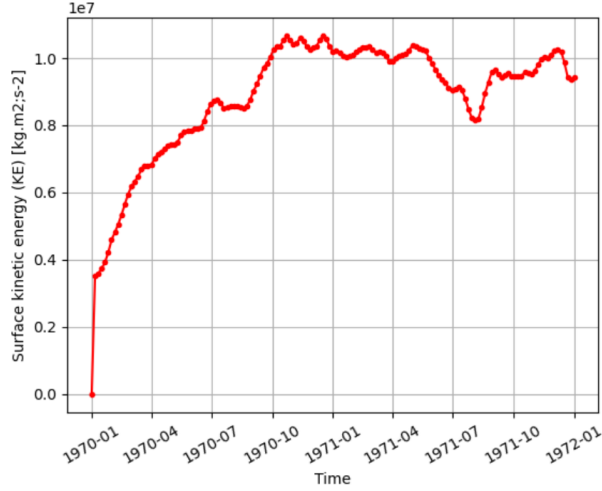


FIGURE 2 – Energie cinétique de surface

La figure 2 montre l'évolution de l'énergie cinétique intégrée sur toute la surface en fonction du temps. A partir de cette intégration, nous remarquons que la simulation possède un spin-up d'environ une année, temps nécessaire au modèle pour se stabiliser. Dans ce rapport, plusieurs snapshots à différents temps de la simulations seront présentés pour plusieurs paramètres physiques. Ces résultats ont également pour objectif de mettre en avant ce spin-up.

2.2 Température

Étudier la température de surface (figure 3) et dans une moindre mesure la température en profondeur (figure 4) permet de comprendre la circulation globale du courant des Aiguilles. En tenant compte du temps pour le modèle d'atteindre l'équilibre, les derniers snapshots sont les plus intéressants à comparer. Le courant des Aiguilles s'écoule vers le Sud le long de la côte de l'Afrique du Sud entre 32° E et 19° E [Lut06] et fait partie du gyre subtropical du sud de l'océan Indien. Il prend naissance dans le canal du Mozambique et au Sud-Est de Madagascar. Le courant des Aiguilles rétrofléchit ensuite entre 19° E et 20° E, et se dirige vers l'Est dans le Sud de l'océan Indien sous la forme du courant de retour des Aiguilles. De grands anticyclones, connus sous le nom d'anneaux des Aiguilles, qui se détachent pendant la rétroflexion, transportent des eaux chaudes et salées dans l'océan Atlantique Sud [LG87].

2.3 Vorticité relative normalisée par le paramètre de Coriolis local

La vorticité relative normalisée par le paramètre de Coriolis local est un moyen de mesurer la rotation. Elle est d'abord calculée en surface (figure 5) puis en profondeur (figure 6). En comparant plus particulièrement les derniers instants de la simulation, nous remarquons des cohérences avec la littérature. D'abord, le courant des Aiguilles est décrit comme étant spatialement "bi-modal" ([Lut06] et [PL09]). Il est caractérisé par une branche stable en amont de 26° E où le jet est étroit et s'écoule à proximité d'une topographie abrupte et rectiligne, et une section en aval de 26° E où le courant devient de plus en plus instable.

Ensuite, les fronts modélisés dans le courant des Aiguilles présentent des valeurs élevées de vorticité relative cyclonique qui semble cohérente de la surface jusqu'en profondeur (ici 400m). De plus, la propagation est la plus forte à la surface, là où les tourbillons de sous-mésoéchelle sont les plus intenses [TGM⁺19].

Température de surface

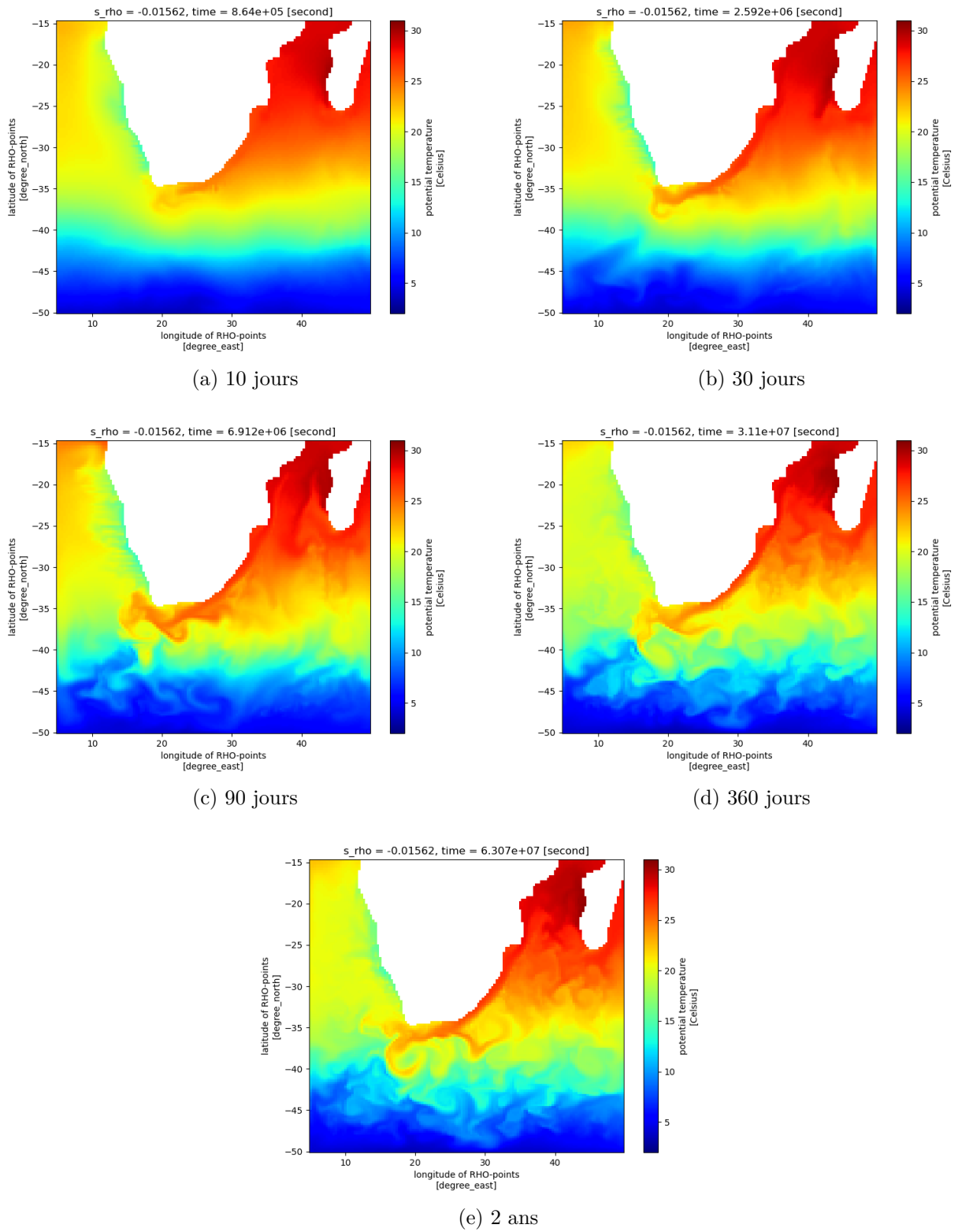


FIGURE 3 – Température [°C] de surface à différents instants de la simulation

Température à 400m de profondeur

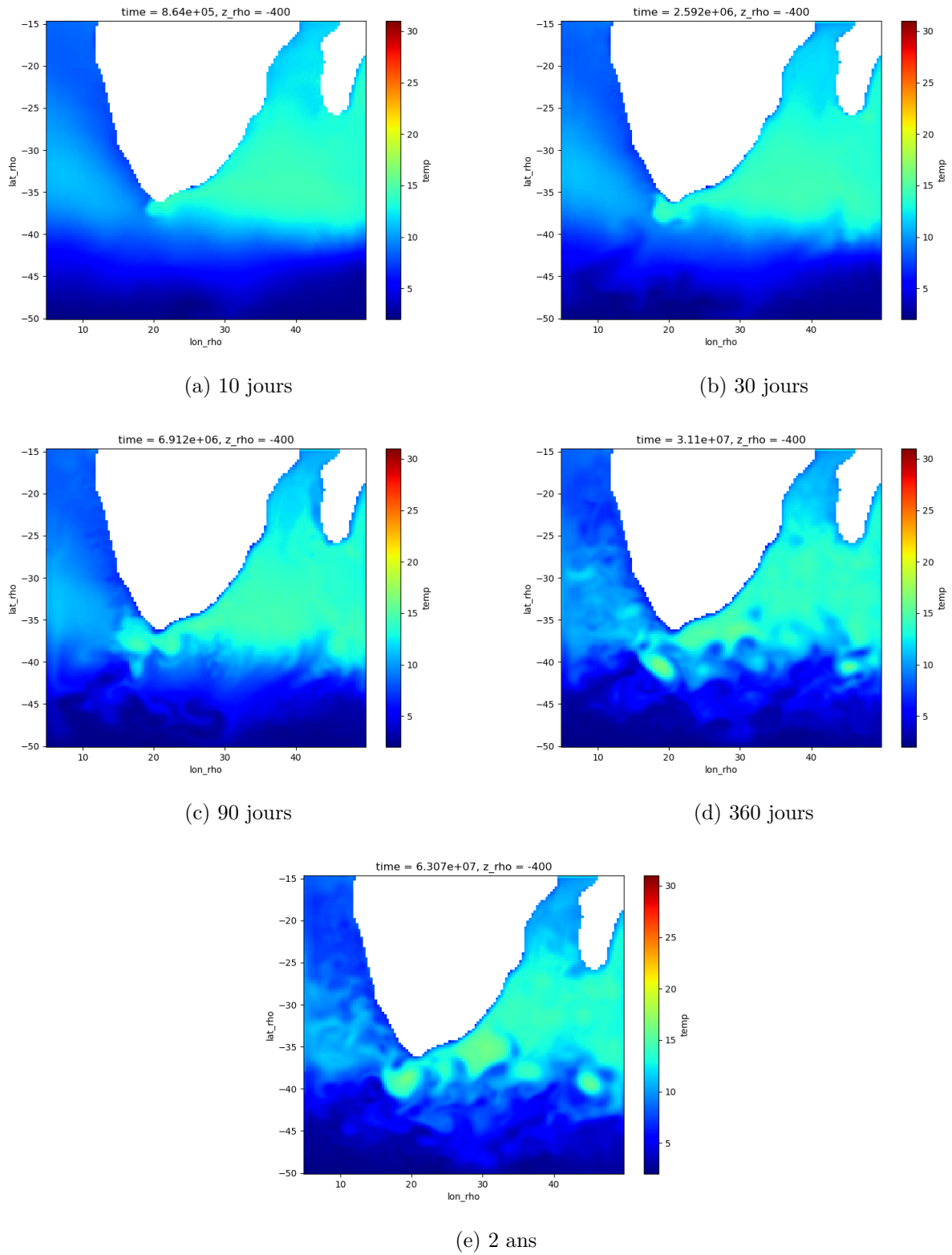


FIGURE 4 – Température [°C] à 400m de profondeur à différents instants de la simulation

Vorticité relative de surface

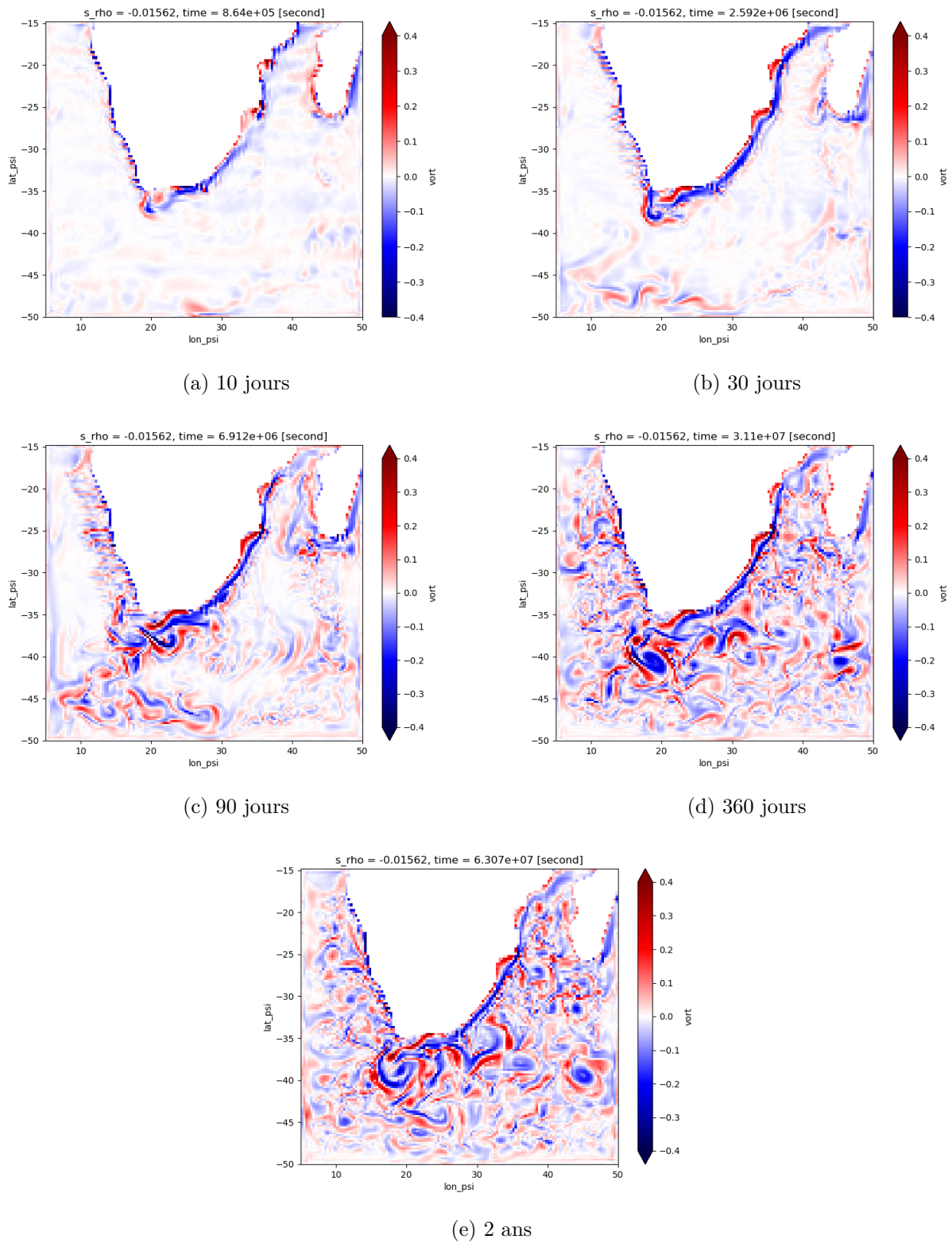


FIGURE 5 – Vorticité relative en surface normalisée par le paramètre de Coriolis local à différents instants de la simulation

Vorticité relative à 400m de profondeur

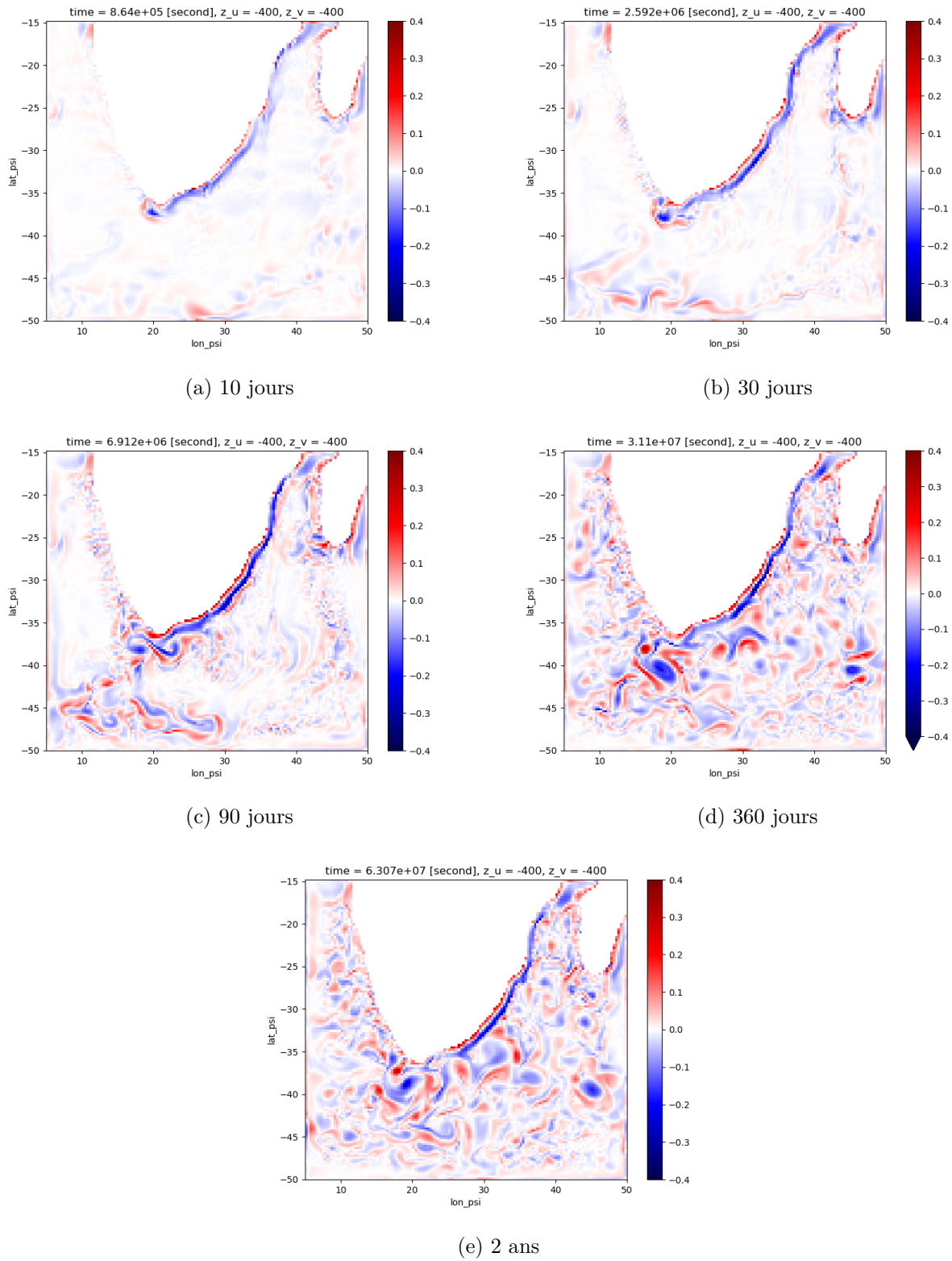


FIGURE 6 – Vorticité relative à 400m de profondeur normalisée par le paramètre de Coriolis local à différents instants de la simulation

2.4 Vitesses moyennes de surface

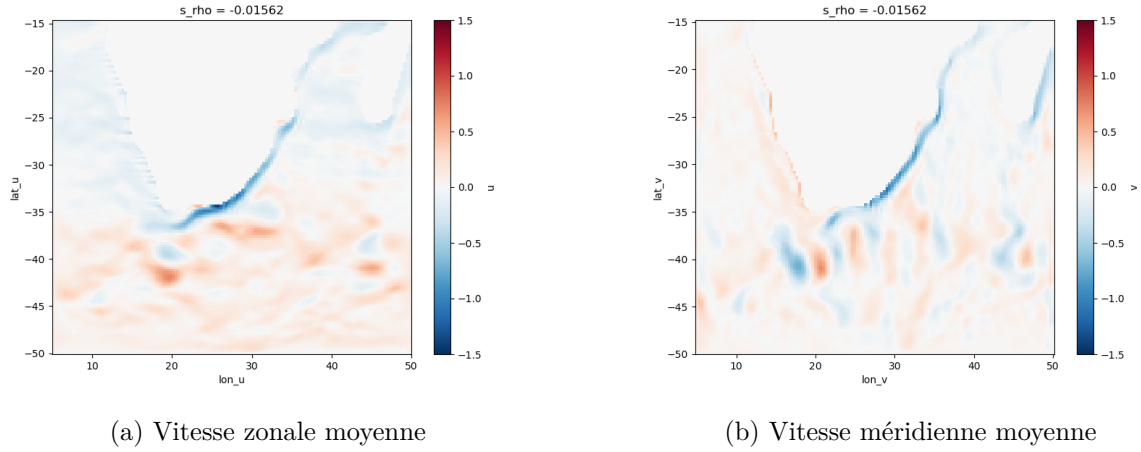


FIGURE 7 – Vitesses zonales et méridiennes moyennes de surface [m/s] calculées à partir de la dernière année de simulation

2.5 Sections zonales et méridiennes

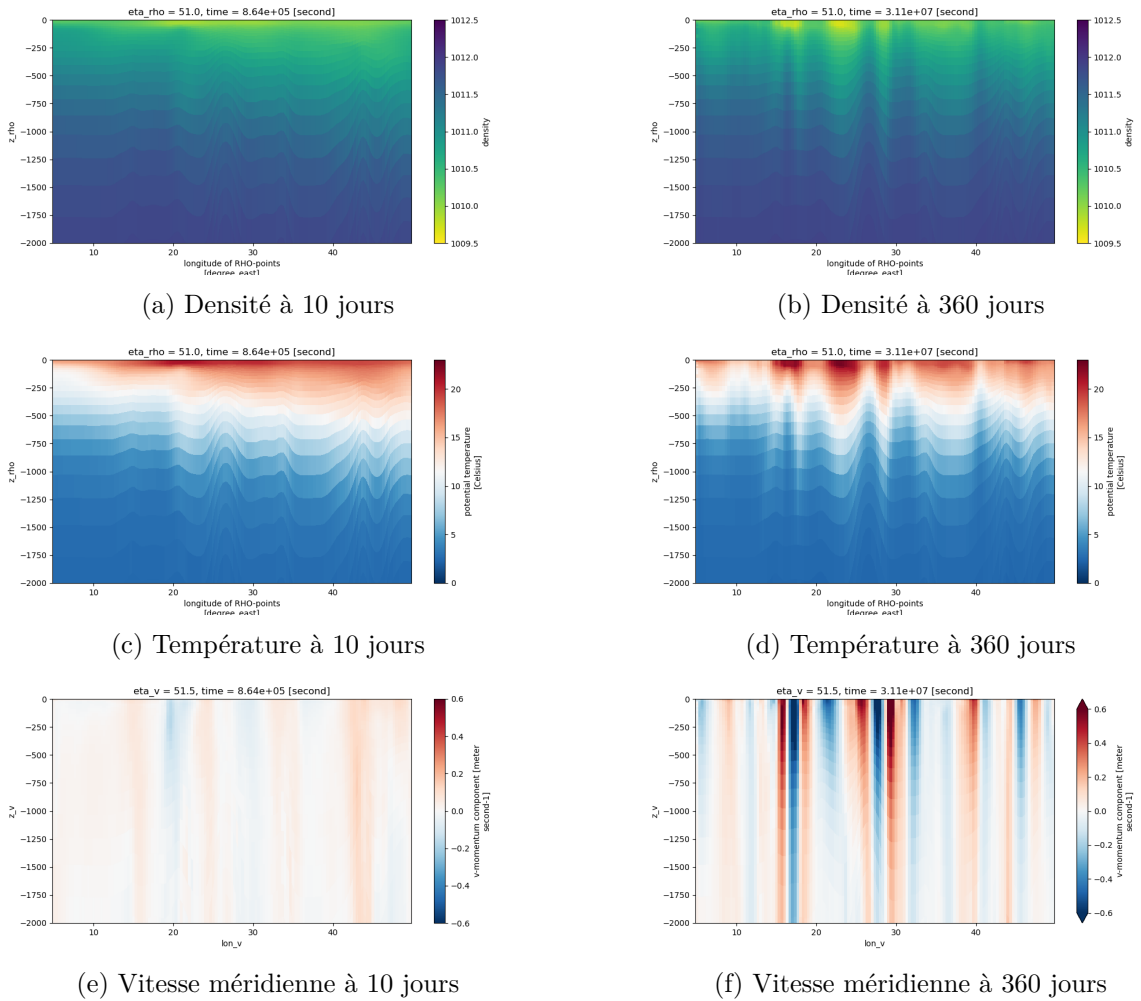


FIGURE 8 – Sections zonales (38°S) de densité [hPa], température [°C] et vitesse méridienne [m/s] à 10 jours et 360 jours de simulation

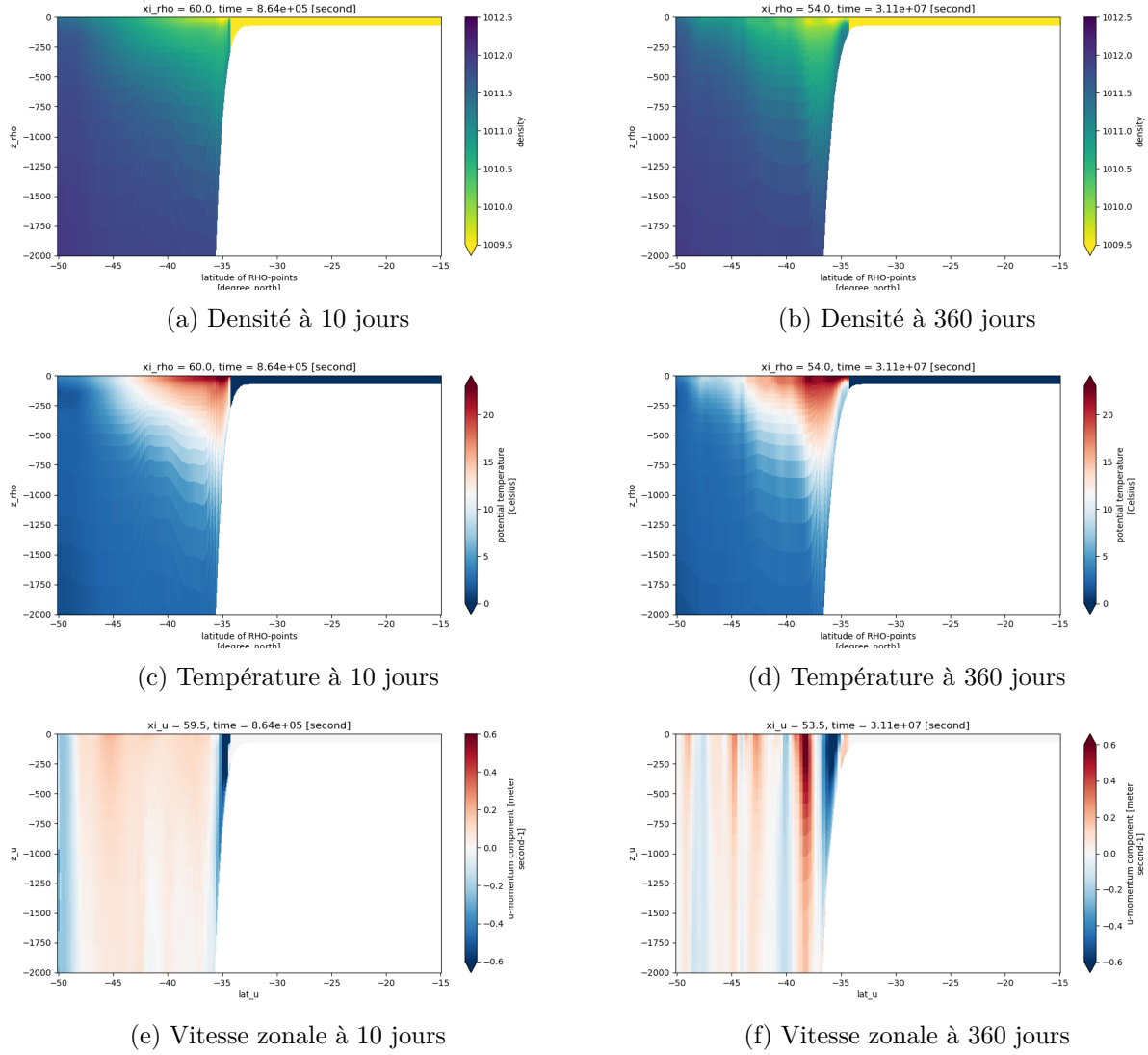


FIGURE 9 – Sections méridiennes (20°E) de densité [hPa], température [°C] et vitesse zonale [m/s] à 10 jours et 360 jours de simulation

Sur la figure 7, les vitesses zonales et méridiennes moyennes de surface sont calculées à partir de la dernière année de simulation (spin-up). Des sections zonales et méridiennes peuvent apporter un autre point de vue sur la dynamique du courant en prenant en compte la dimension verticale. Pour les sections zonales (figures 8) et méridiennes (figures 9), la densité, la température et la vitesse (respectivement méridienne et zonale) sont présentés. D’une manière générale, on remarque de nouveau que le modèle doit tourner suffisamment longtemps avant d’être réaliste. Les comparaisons seront donc faites à partir des sections prises après 360 jours de simulation. La densité est calculée à partir d’une loi de dépendance de la masse volumique de l’eau de mer en fonction de la température et de la salinité qui a été déterminée par des mesures. La masse volumique de l’eau de mer dépend aussi de la pression, mais on calcule une masse volumique potentielle, ramenée à la pression atmosphérique pour éviter d’avoir à prendre en compte cette complication supplémentaire [MP]. Une formule approximative est :

$$\rho = 1000 - 0.12T + 0.35S \quad (1)$$

où ρ [kg/m³] est la masse volumique, T la température [°C] et S la salinité.

La section zonale faite à la latitude 38°S et la section méridienne à 20°E donnent des informations complémentaires sur la circulation des masses d’eaux. Les sections ont été choisies de façon à représenter du mieux possible les méandres du courant de retour sur la coupe zonale et le point de rétroflexion sur la coupe méridienne. En comparant les sorties de la simulation aux observations faites par [TGM⁺19], nous retrouvons bien les caractéristiques spatiales du courant des Aiguilles. Les sections méridiennes indiquent bien la présence d’eaux chaude et moins denses en surface le long du littoral africain se dirigeant vers le Sud-Ouest, tandis que le courant de retour est plus froid et a une composante Est. D’autre part, les sections zonales montrent une alternance d’eaux plus froides ou plus chaudes dans les premiers 500m de la colonne d’eau, caractéristiques des tourbillons cycloniques et anticycloniques, dont la vorticité et la vitesse zonale et méridienne provoquées sont au plus fort près de la surface et s’atténue avec la profondeur.

Lutjeharms et al (2003) [LBR03] présentent des observations sur les caractéristiques et le comportement des cyclones qui sont générés au bord du courant des Aiguilles à partir d’observations et décrivent un événement au cours duquel la rétroflexion se rétracte à 22°E .

Après le détachement d’un anneau, la présence d’un cyclone contre le bord sud du banc des Aiguilles, que l’on distance sur la figure de vorticité 5 et de vitesse 7, favorise probablement une orientation vers le sud-ouest du courant des Aiguilles en aval du détachement et, par conséquent, du point de rétroflexion.

De plus, d’après [DAS10], la décélération générale vers l’ouest montre deux zones d’accélération vers le Sud-Ouest. L’une est à 20°E - 22°E , visible à la fois sur la section zonale de vitesse méridienne (composante Sud) et sur la section méridienne de vitesse zonale (composante Ouest). Cela pourrait refléter l’effet des cyclones adjacents à la limite Sud du banc des Aiguilles, qui vient d’être décrit.

2.6 Variance de la SSH

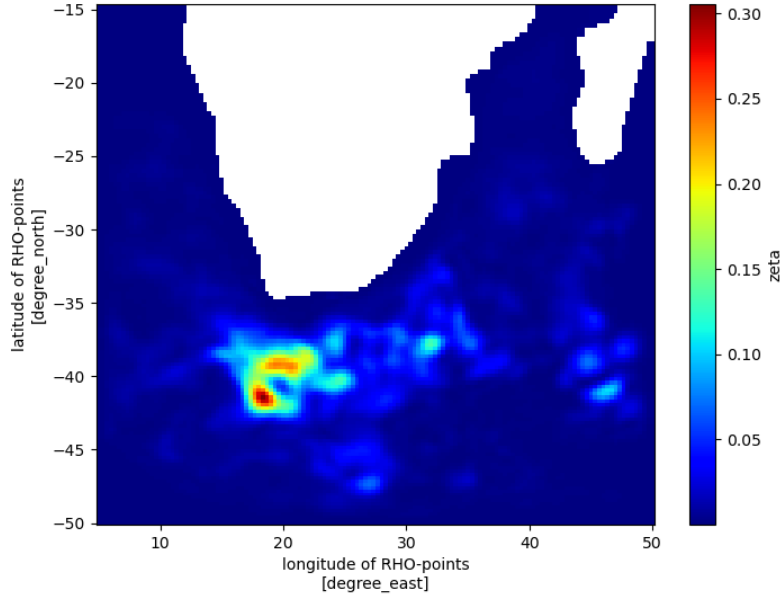


FIGURE 10 – Variance de la SSH calculée à partir de la dernière année de simulation

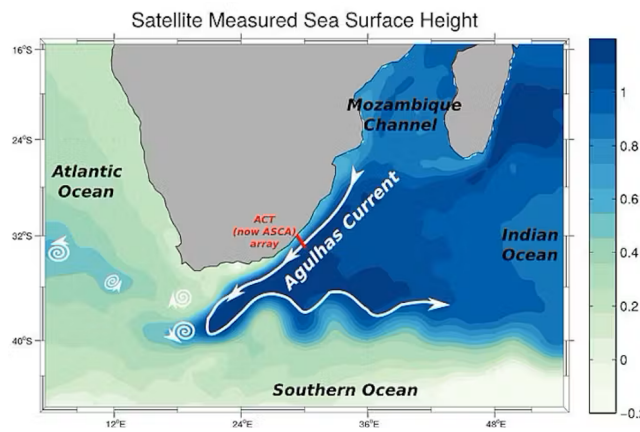


FIGURE 11 – Satellite measured Sea Surface Height [Hut]

La variance de la SSH est calculée à partir des snapshots de la dernière année de la simulation. Elle indique donc la dispersion de la hauteur d'eau sur une année dans le courant des Aiguilles et elle est très sensible aux valeurs extrêmes. Ainsi, plus la variance est élevée plus la dispersion de la hauteur est importante. Les valeurs les plus fortes (0.3m^2) sont vers 20°E , là où le courant des Aiguilles rétrofléchit et se dirige vers l'Est [DAS10] [TGM⁺19]. Les méandres du courant de retour sont également observables par une variance de SSH environ de 0.1m^2 .

Dans [DAS10], une méthode est proposée pour rechercher le point de rétroflexion basée directement sur les valeurs de SSH. Il est nécessaire de choisir une valeur critique de SSH du courant du noyau et de déterminer la relation entre la SSH et la vitesse géostrophique de surface. Cependant, cela s'est avéré difficile à réaliser au point de rétroflexion lui-même en raison de son environnement turbulent (figure 5).

Si l'on compare nos résultats à des observations satellites de SSH (figure 11), on retrouve la branche instable et de la rétroflexion marquée par de forte anomalies de SSH qui entraînent des méandres dans le courant de retour, également observables sur les sections zonales de température ou de vitesse (figures 8).

2.7 Energie cinétique turbulente de surface EKE

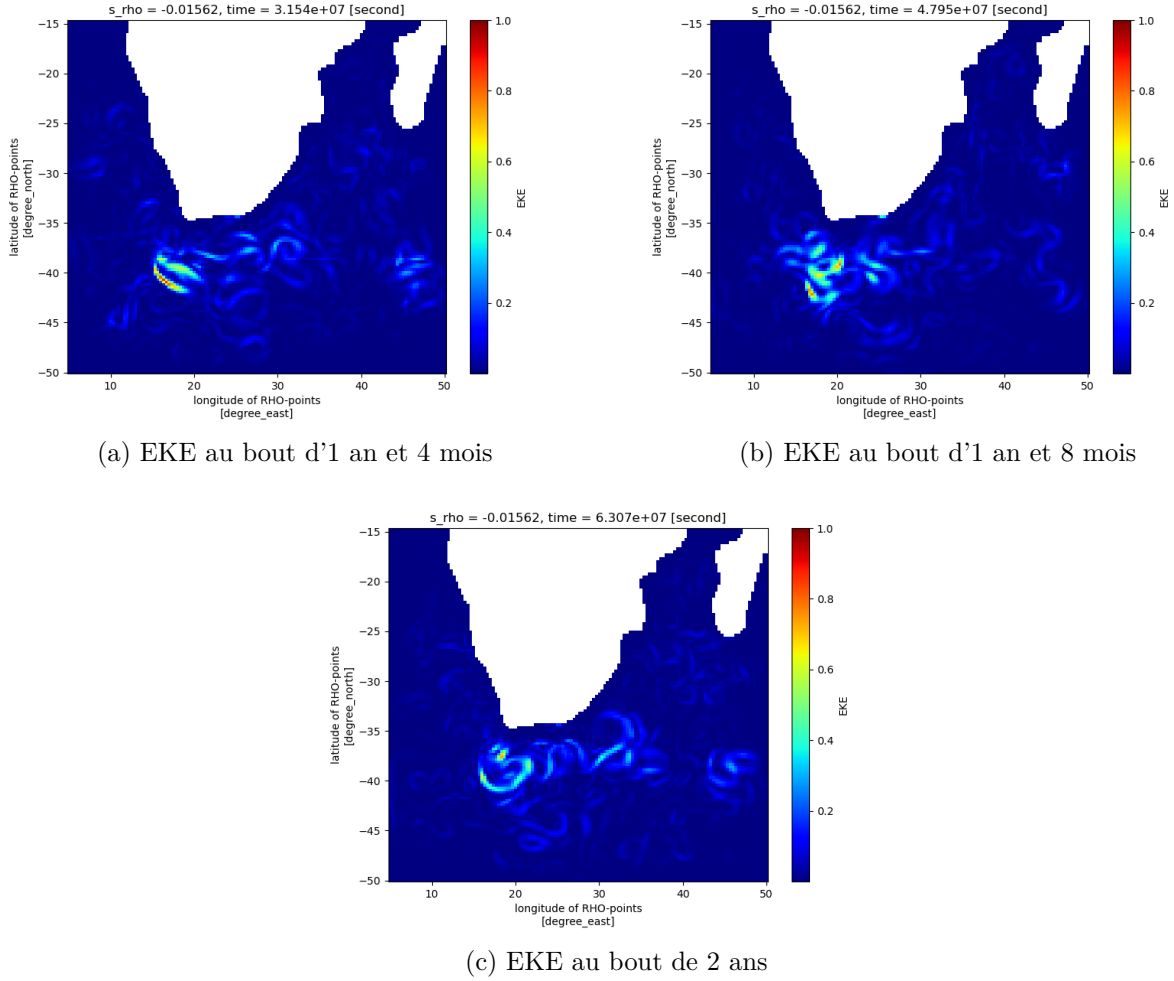


FIGURE 12 – EKE (eddy kinetic energy) à trois instants de la dernière année de la simulation

L'énergie cinétique des tourbillons (eddy kinetic energy EKE) est une mesure générique de la turbulence à méso-échelle. On calcule EKE de la manière suivante :

$$EKE = \frac{1}{2}(\overline{u'^2 + v'^2}) \quad (2)$$

La barre supérieure indique une moyenne temporelle sur la dernière année de simulation. u' et v' sont respectivement les fluctuations de la vitesse zonale et méridienne par rapport à cette moyenne. Cela permet d'exclure la variabilité saisonnière et interannuelle. Les figures 12 présentent des patterns similaires de EKE à différents instants de la simulation (1/3, 2/3 et fin de la dernière année). En effet, sans tenir compte des variations saisonnières et interannuelles, la turbulence à méso-échelle reste géographiquement la même. En capturant suffisamment bien l'EKE très élevé au large du Cap de Bonne-Espérance, ces observations sont cohérentes avec les analyses de la vorticité et des anomalies de SSH au point de réflex on ainsi que dans les tourbillons constituant le courant le retour qui rejette des anneaux, des cyclones et des filaments d'environ 100 km.

Il est montré dans [TGPM22] que les tourbillons de méso-échelle gagnent de l'énergie localement dans la baie orientale du banc Agulhas et au large de la pointe du banc Agulhas. Cette région reste une source nette d'énergie des tourbillons mais modul e par la topographie, en particulier au sud du courant des Aiguilles.

Références

- [BEHL15] Lisa M. Beal, Shane Elipot, Adam Houk, and Greta M. Leber. Capturing the transport variability of a western boundary jet: Results from the agulhas current time-series experiment (act). *Journal of Physical Oceanography*, 45(5):1302 – 1324, 2015. [1](#)
- [DAS10] Guillaume Dencausse, Michel Arhan, and Speich Sabrina. Spatio-temporal characteristics of the agulhas current retroflection. *Deep Sea Research Part I Oceanographic Research Papers*, 57, 11 2010. [9](#), [10](#)
- [Hut] Katherine Hutchinson. Why deeper insights into the agulhas current can shed light on climate patterns. <https://www.news.uct.ac.za/article/-2017-07-19-why-deeper-insights-into-the-agulhas-current-can-shed-light-on-climate-patterns>. 19 JULY 2017. [10](#), [13](#)
- [LBR03] J. R. E. Lutjeharms, Olaf Boebel, and H. T. Rossby. Agulhas cyclones. *Deep-sea research ii*, 50(1):13–34, 2003. [9](#)
- [LG87] JRE Lutjeharms and AL Gordon. Shedding of an agulhas ring observed at sea. *Nature*, 325(6100):138–140, 1987. [2](#)
- [Lut06] Johann RE Lutjeharms. *The Agulhas current retroflection*. Springer, 2006. [2](#)
- [MP] Observatoire Midi-Pyrénées. La circulation thermo-haline. [8](#)
- [PL09] N Paldor and JRE Lutjeharms. Why is the stability of the agulhas current geographically bi-modal? *Geophysical research letters*, 36(14), 2009. [2](#)
- [TGM⁺19] P. Tedesco, J. Gula, C. Ménesguen, P. Penven, and M. Krug. Generation of submesoscale frontal eddies in the agulhas current. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(11):7606–7625, 2019. [2](#), [9](#), [10](#)
- [TGPM22] P. Tedesco, J. Gula, P. Penven, and C. Ménesguen. Mesoscale eddy kinetic energy budgets and transfers between vertical modes in the agulhas current. *Journal of Physical Oceanography*, 52(4):677 – 704, 2022. [11](#)

Table des figures

1	Zone géographique étudiée	1
2	Energie cinétique de surface	2
3	Température [°C] de surface à différents instants de la simulation	3
4	Température [°C] à 400m de profondeur à différents instants de la simulation	4
5	Vorticité relative en surface normalisée par le paramètre de Coriolis local à différents instants de la simulation	5
6	Vorticité relative à 400m de profondeur normalisée par le paramètre de Coriolis local à différents instants de la simulation	6
7	Vitesses zonales et méridiennes moyennes de surface [m/s] calculées à partir de la dernière année de simulation	7
8	Sections zonales (38°S) de densité [hPa], température [°C] et vitesse méridienne [m/s] à 10 jours et 360 jours de simulation	7
9	Sections méridiennes (20°E) de densité [hPa], température [°C] et vitesse zonale [m/s] à 10 jours et 360 jours de simulation	8
10	Variance de la SSH calculée à partir de la dernière année de simulation	10
11	Satellite measured Sea Surface Height [Hut]	10
12	EKE (eddy kinetic energy) à trois instants de la dernière année de la simulation	11