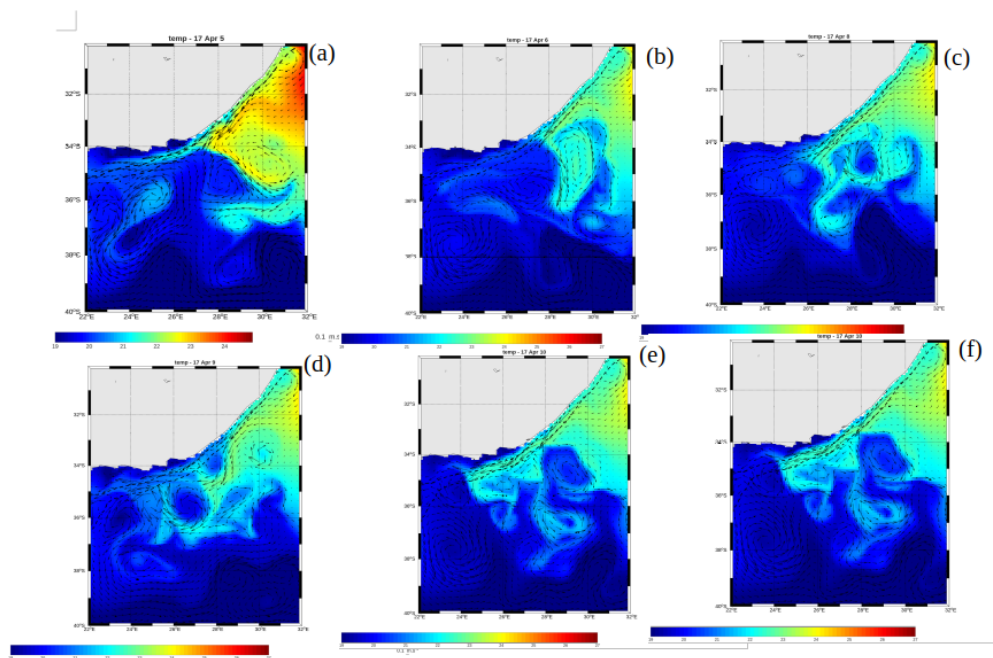


Modélisation 3D Océanique

Simulation d'upwelling du courant des **aiguilles** avec le modèle
CROCO



Yassmine DERRAB

Sous la supervision de Pr. Andrea DOGLIOLI

Mai 2026

Table des matières

1	Introduction	1
2	Matériels et méthodes	2
2.1	Le modèle CROCO	2
2.2	Hypothèses et approximations du modèle	2
2.3	Les équations du modèle océanique :	2
2.3.1	Les équations de conservation du mouvement :	2
2.3.2	L'équation de conservation de la masse ou de continuité : . .	3
2.3.3	Les équations de conservation du sel et de chaleur :	3
2.3.4	L'équation d'état de l'eau de mer :	3
2.4	Configuration du modèle	3
2.4.1	Base de données	3
2.4.2	Forçages et conditions aux limites :	4
3	Résultats et discussion	6
3.1	Diagnostic du modèle	6
3.2	Courant des aiguilles	7
3.3	Comparaison entre la simulation CROCO et les observations	7
3.3.1	Variabilité et structures d'upwelling	9
4	Conclusion	10
5	Difficultés rencontrées	10

Abstract

The Agulhas Current is analyzed using the CROCO model to characterize its dynamics, structure, and stability. The model is based on solving the equations of conservation of momentum, mass, salinity and heat, which allow the simulation of interactions between the various scales of ocean circulation. The results highlight the main characteristics of the Agulhas Current, notably its flow along the South African coast, its deviation offshore, and the formation of meanders that develop into eddies. Upwelling processes are also observed, resulting from interactions between the current and the winds. These structures play an important role in the exchange between coastal and oceanic waters. A comparison with the oceanographic literature shows good consistency between the simulated results and observations, particularly regarding the mechanisms of meander and upwelling formation. These findings confirm the ability of CROCO to realistically reproduce the key oceanic processes of the Agulhas Current.

Keywords: Agulhas Current, CROCO, ocean dynamics, upwelling, eddies.

Résumé

Le courant des aiguilles est analysé à l'aide de modèle CROCO, afin de caractériser sa dynamique, sa structure et sa stabilité. Le modèle repose sur la résolution des équations de conservation du mouvement, de la masse, du sel et de la chaleur qui permettent de simuler les interactions entre les différentes échelles de la circulation océanique. Les résultats mettent en évidence les principales caractéristiques du courant des aiguilles, notamment son écoulement le long de la cote sud-africaine, sa déviation vers le large ainsi que la formation des méandres qui peuvent devenir des tourbillons. Des phénomènes d'upwelling sont également observés, associés aux interactions entre le courant et les vents. Ces structures jouent un rôle important dans les échanges entre les eaux côtières et océaniques. La comparaison avec l'article de référence montre une bonne adéquation entre les résultats simulés, notamment ce qui concerne les mécanismes de formation des méandres et de l'upwelling. Ces résultats confirment la capacité du modèle CROCO à reproduire de manière réaliste ces processus océaniques clés du courant des aiguilles.

Mots clés : Courant des aiguilles, CROCO, dynamique océanique, upwelling, tourbillons.

1 Introduction

La compréhension de fonctionnement des océans est un véritable défi pour la communauté scientifique, dû à son dynamisme et les différents processus en son sein. Raison pour laquelle, la modélisation numérique au cours du XXème siècle s'est avéré être une solution pour mieux représenter ou caractériser les différents processus qui se déroulent en surface et au fond des océans.

Le modèle CROCO (Coastal and **Régional Océan** Community model) contribue à une meilleure compréhension des processus physiques et biogéochimiques. Il met également une importance significative sur les interactions air-mer qui influencent la dynamique des écosystèmes. Dans ce contexte, l'application de modèle CROCO est appliqué à une région particulièrement active (**26°E, 29°E, 33°S, 35°S**) : le courant des aiguilles (**Leber et al., 2017**).

Le courant des aiguilles est le plus grand courant de **la bordure occidentale** de l'hémisphère sud, s'écoulant du sud vers l'ouest le long du continent africain (**Bryden et al., 2005**). Il est considéré comme le seul courant de la bordure ouest qui relie entre les deux gyres subtropicaux étant donné que le continent africain sépare l'atlantique et le bassin indien (**Leber et al., 2017**). Les épisodes d'upwelling dans la courant des aiguilles présentent un intérêt particulier, car cette région possède plusieurs sites de reproduction, notamment des aires de reproduction et de croissance des juvéniles (**Hutchings et al., 2002**). La remontée d'eau favorise la reproductivité biologique car les eaux riches en nutriments sont transportées depuis les profondeurs océaniques adjacentes vers le plateau continental **Atkinson et al. (1983)**. Les processus d'upwelling sont particulièrement déterminants dans les courants de bord ouest, où le courant principal limite le mélange latéral. Près des zones côtières, ces upwelling peuvent être générés par les vents, soit par la dynamique du courant. L'upwelling dynamique est irrégulier et lié aux instabilités du courant, tandis qu'une accélération du courant renforce le transport d'Ekman, favorisant les remontées d'eau et le refroidissement en surface.

L'objectif de ce projet est d'étudier la dynamique de l'upwelling et de mener à des simulations dans la région du courant des aiguilles à l'aide de modèle numérique CROCO, en analysant les températures de surface. Les résultats obtenus de ces simulations seront ensuite comparés à la littérature scientifique, en particulier l'étude de (**Leber et al., 2017**) qui repose sur des données satellitaires, qui permettent d'observer l'océan depuis l'espace. Cette approche permet ainsi de reproduire les principales caractéristiques de l'upwelling, d'analyser les différentes variations et d'évaluer la fiabilité du modèle.

2 Matériels et méthodes

2.1 Le modèle CROCO

Le modèle CROCO (Coastal and Régional Océan Community model) est un modèle numérique régional basé sur les équations primitives conçu pour simuler la circulation océanique au niveau régional ou côtier à haute résolution ou à basse résolution. Il est issu du modèle ROMS-AGRIF et développé par plusieurs instituts de recherches scientifiques, notamment l'IRD, le CNRS, l'Ifremer et le SHOM.

2.2 Hypothèses et approximations du modèle

Afin de simplifier les équations primitives océaniques, plusieurs hypothèses sont adoptées à cet effet :

– **L'hydrostatique** : la composante verticale du mouvement est réduite à un équilibre entre le gradient de pression et la force de gravité.

$$-\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial z} - g = 0 \quad (1)$$

– **L'incompressibilité** : la masse volumique de l'eau est constante.

– **L'approximation de Boussinesq** : la masse volumique de fluide est égale à une valeur de référence ρ_0 auquel s'ajoute une fluctuation ρ' .

$\rho = \rho_0 + \rho'(x,y,z,t)$, sachant que $\rho_0 \gg \rho'(x,y,z,t)$

– **Plan f** : le paramètre de coriolis f est une constante.

– **L'hypothèse de la fermeture Newtonienne de la turbulence.**

2.3 Les équations du modèle océanique :

Le modèle CROCO permet de résoudre les équations de Navier-Stokes, ainsi que celle de conservation de la masse, de la chaleur et du sel.

2.3.1 Les équations de conservation du mouvement :

Les Eqs. (2) et (3) décrivent les mouvements horizontaux selon u et v :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla})u = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + fv + A_h \vec{\nabla}_h^2 u + A_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla})v = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} - fu + A_h \vec{\nabla}_h^2 v + A_z \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (3)$$

A_h, A_z : coefficients de viscosité turbulente horizontale et verticale.

2.3.2 L'équation de conservation de la masse ou de continuité :

En considérant un fluide homogène ou incompressible, l'équation de continuité se réduit à l'Eq.(4) :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

2.3.3 Les équations de conservation du sel et de chaleur :

Les équations de conservation du sel et de chaleur sont données respectivement par (5) et (6) :

$$\frac{\partial S}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla})S = K_{Sh} \vec{\nabla}_h^2 S + K_{Sz} \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \quad (5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla})T = K_{Th} \vec{\nabla}_h^2 T + K_{Tz} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{H_C}{\rho_0 C_P} \frac{\partial I}{\partial z} \quad (6)$$

K_{Sh}, K_{Sz} : diffusivité de la salinité horizontale et verticale.

K_{Th}, K_{Tz} : diffusivité de la température horizontale et verticale.

C_P : coefficient de chaleur massique, H_C : flux solaire incident, $I(z)$: fraction de flux.

2.3.4 L'équation d'état de l'eau de mer :

L'équation d'état de l'eau de mer est donné par **TEOS10** (International Thermodynamic Equation Of Sea Water), en utilisant la salinité absolue et la température conservative comme variables d'état.

$$\rho = \rho(T, S, p) \quad (7)$$

2.4 Configuration du modèle

2.4.1 Base de données

La base de données établie pour ce projet est téléchargeable via le site du modèle CROCO. On peut y trouver entre autre, les données de WOA (**WOA2009.tar.gz**) qui donnent une description globale de l'océan avec des valeurs moyennes de température (insitu), de salinité et de nutriments. Les données de COADS (**COADS05.tar.gz**) qui contiennent un champ climatique de vent, de température et de précipitations. Également, on recueille les données topographiques (**Topo.tar.gz**) qui indiquent la bathymétrie du

fond marin et qui permettent de bien représenter la géométrie de l’océan dans le modèle CROCO.

2.4.2 Forçages et conditions aux limites :

Les coordonnées initialement issues de la littérature (**26°E, 29°E, 33°S, 35°S**) n’ont pas permis d’obtenir une simulation fonctionnelle sur CROCO, en raison de contraintes liées **au modèle**. Une adaptation du domaine d’étude a donc été effectuée en élargissant la zone (**22°E, 32°E, 30°S, 40°S**). Ce nouveau domaine a permis de réaliser les simulations et d’assurer la stabilité du modèle.

Les coordonnées géographiques et la résolution spatiale (**1/10°**) sont intégrées dans le script **crocotools_param.m**, qui définit le domaine de calcul du modèle. La discrétisation spatiale est générée via la commande **make_grid** qui est exécutée sur l’interface **MATLAB**, fournissant la bathymétrie et la grille numérique du domaine. La Fig.1 montre la grille de la zone d’étude avec des bords ouverts au nord, sud, est et ouest définis avec le script **cppdefs.h**.

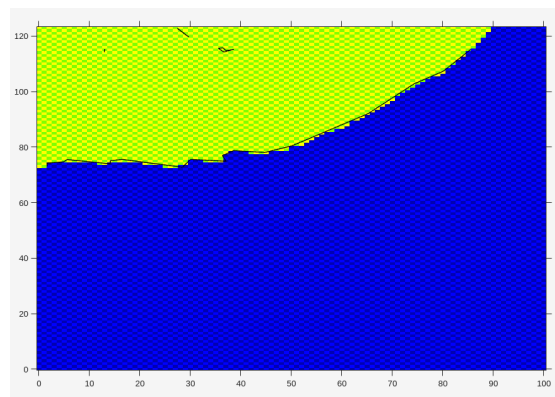


FIGURE 1 – La grille de la zone d’étude

Cette commande permet de déterminer les paramètres de la grille, les dimensions spatiales (LLm (selon x), MMm (selon y)) ainsi que les pas de la grille dans les directions horizontales dx , dy , $dx_{\min}$ et $dy_{\min}$, Tab.1. Par la suite, ces résultats seront utilisés pour adapter la discrétisation du modèle, et stockés dans un fichier **memo.mat** qui servira au calcul de la CFL.

Le modèle repose sur une grille de type Arakawa C pour discrétiser les équations primitives. Elle consiste à définir les composantes de la vitesse aux faces de mailles et les variables scalaires (température, pression, salinité, etc...) au centre de celles-ci.

Par ailleurs, les paramètres temporels sont déterminés à partir du critère CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) Eq.(8), imposant une contrainte de stabilité numérique reliant les échelles spatiales et temporelles. Le script **ad_cfl.m** permet de calculer le pas

de temps dt et le nombre total d'itérations de la simulation (NTIMES), Tab.2.

$$C = \frac{u \cdot \Delta t}{\Delta x} \quad (8)$$

u : vitesse, Δt : pas de temps, Δx : taille de maille.

Par autre, les ondes de gravité longues constituent les phénomènes les plus rapides pris en compte dans les modèles numériques. Le pas de temps est donc déterminé à partir de leur vitesse de propagation, en appliquant le critère de stabilité CFL. Pour des raisons de stabilité numérique, la profondeur maximale est prise en compte sous forme majorée ($h_{\max}$).

Le système modélisé présente des processus évoluant à différentes échelles temporelles, ce qui conduit CROCO à utiliser une méthode de time-splitting. Celle-ci consiste à décomposer l'intégration temporelle en un pas de temps externe et un pas de temps interne, tous deux respectant la critère de CFL. Cette décomposition permet d'éviter l'utilisation d'un pas de temps unique très faible, pour l'ensemble du modèle, ce qui entraînerait un coût de calcul excessif.

$$\Delta t \leq \frac{1}{\sqrt{g h_{\max}}} \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (9)$$

$$c = \sqrt{g h_{\max}}$$

$h_{\max}$: profondeur maximale (6000 m pour cette étude), g : accélération de pesanteur.

Ces paramètres sont configurés dans le fichier **croco.in**, où sont également définis les fréquences de sorties instantanées et moyennées (NWRT et NAVG), Tab.2.

TABLE 1 – Paramètres de la grille calculés par le modèle

Résolution	LLM	MMm	N	dx (min)	dx (max)	dy (min)	dy (max)
1/10°	99	122	32	8.5133 Km	9.629 Km	8.518 Km	9.6164 Km

TABLE 2 – Paramètres temporelles du modèle

dt	NTIMES	NWRT	NAVG	NRST	NDTFAST
720 s	3600	360	360	3600	60

Les forçages atmosphériques et les conditions initiales sont générés à l'aide des scripts **make.ini.m**, **make.forcing.m** et **make.clim.m**, à partir de bases de données

citée à la section 2.4.1, afin de représenter un état moyen réaliste du système océanique. Enfin, le modèle est compilé via la commande `./jobcomp`, puis exécuté sur un cluster de calcul à l'aide de sbatch `./slurm_run_croco.sh`.

3 Résultats et discussion

3.1 Diagnostic du modèle

Les résultats de la simulation sont analysés à l'aide des scripts `croco_diags.m` et `plot_diags.m` qui permettent de calculer et de représenter les différentes grandeurs caractéristiques.

Les diagnostics du modèle sur une période de 10 ans met en évidence la stabilité du modèle et montrent les évolutions temporelles de plusieurs variables intégrées sur le volume. L'anomalie de volume oscille autour d'une valeur moyenne sans dérive significative, ce qui indique une bonne conservation du bilan de masse. La salinité moyenne volumique présente une phase transitoire marquée au début de la simulation, caractérisée par une augmentation progressive durant les premières années. Cette phase correspond au spin-up du modèle (0 à 2,5 ans), au cours duquel les champs s'ajustent aux conditions initiales et aux forçages appliqués.

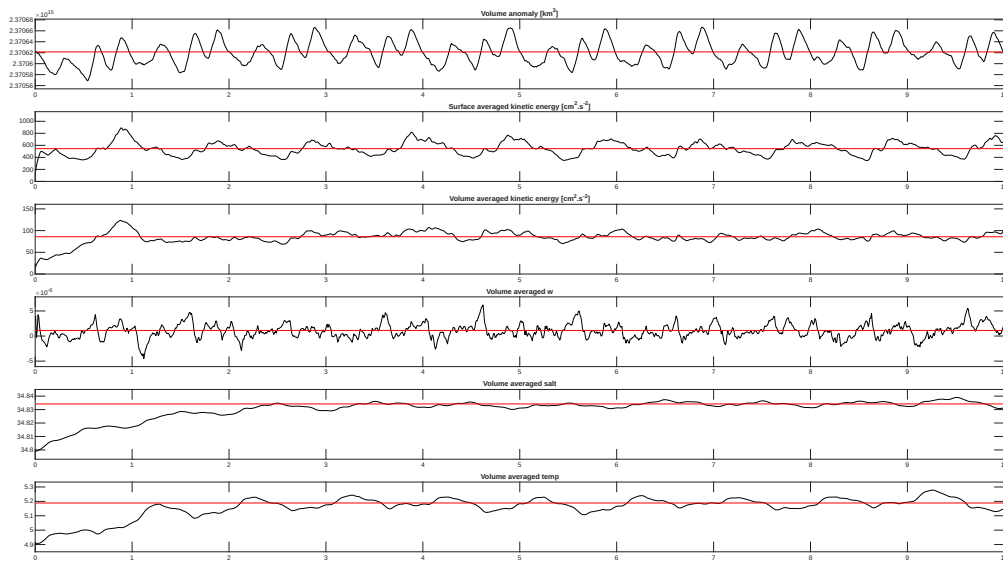


FIGURE 2 – Diagnostic de la modélisation de courant des aiguilles sur 10 ans.

À partir de 2 ans et demi de simulation, la salinité stabilise et oscille faiblement autour d'une valeur moyenne, indiquant l'atteinte de régime quasi-stationnaire et cela indique une bonne conservation du sel et une fiabilité des schémas numériques utilisés. La

température montre un comportement similaire, avec des oscillations régulières sans tendance à long terme, suggérant l'absence de dérive thermique.

3.2 Courant des aiguilles

La Fig.3 illustre la simulation de courant des aiguilles et sa dynamique associée, obtenue avec le modèle CROCO. Les vecteurs montrent le champ de vitesse, révélant la présence de méandres et de tourbillons. Le tracé rouge correspond au courant principal longeant la côte puis subissant une déviation vers le large. Donc, le modèle CROCO parvient à capturer les dynamiques océaniques majeures de cette région.

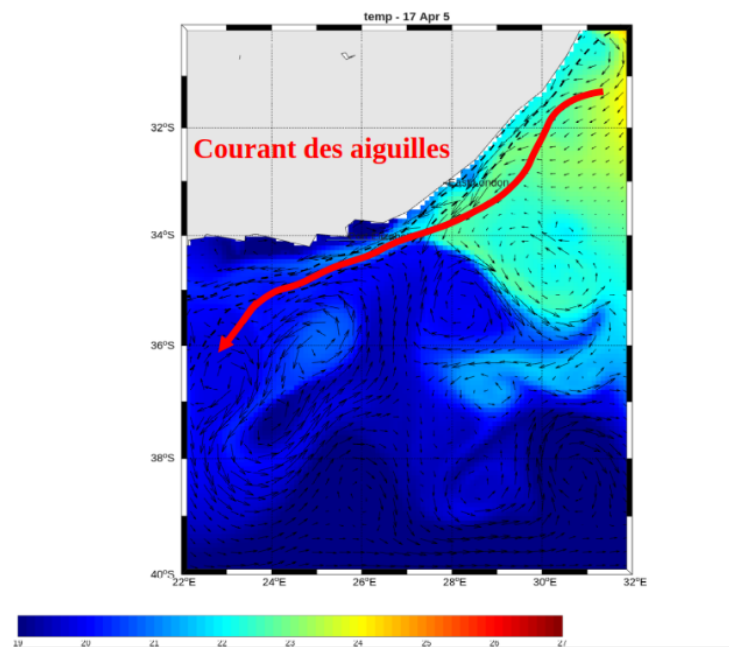


FIGURE 3 – Simulation de courant des aiguilles avec CROCO

3.3 Comparaison entre la simulation CROCO et les observations

La comparaison entre la Fig.4.b issue de l'article et celle obtenue à partir de la simulation réalisée avec le modèle CROCO Fig.4.a pour le mois d'avril met en évidence des structures globalement proches dans la représentation de la dynamique océanique au large de la côte sud-africaine, tout en montrant certaines différences liées aux limites du modèle.

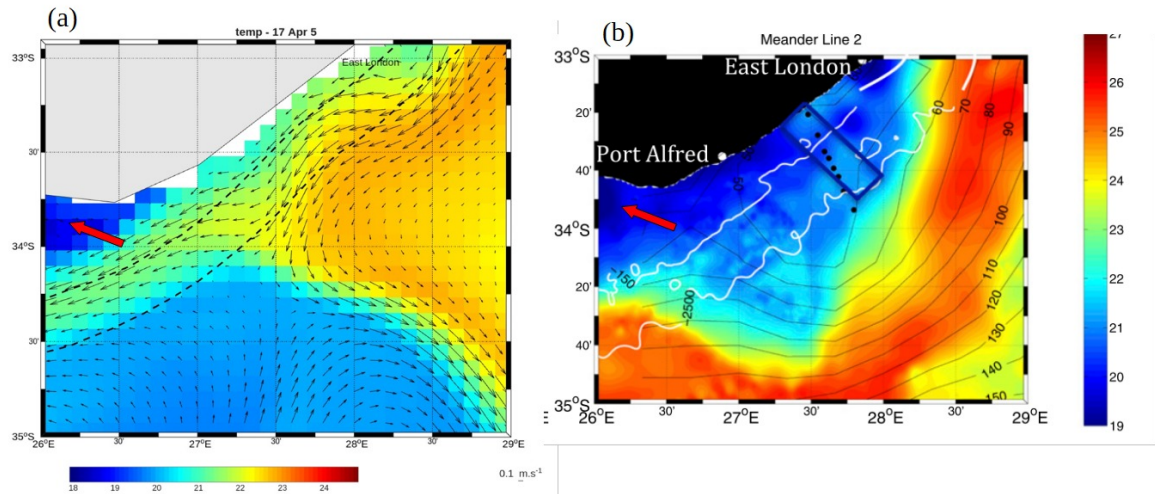


FIGURE 4 – Upwelling côtier du courant des aiguilles, (a) : CROCO, (b) : Littérature (Leber et al., 2017)

Dans les deux cas un gradient thermique marqué est observé entre la zone côtière et le large, avec des températures plus faibles près de la côte autour de 19 à 21°C, et des eaux plus chaudes au large dépassant 24°C. Cette distribution traduit la présence d'un upwelling côtier, caractérisé par la remontée des eaux profondes froides vers la surface. Ce signal est bien capturé par la simulation de CROCO, ce qui indique que le modèle reproduit correctement le mécanisme principal de refroidissement côtier.

Dans la Fig.4.b, ce refroidissement est associé à une structure de méandre du courant des Aiguilles, qui se décale vers le large et génère une circulation cyclonique favorable à l'upwelling. Ce type de configuration est reconnu comme un facteur majeur d'intensification des remontées d'eaux profondes, en particulier lorsqu'il est combiné à un forçage par le vent. En comparaison, la simulation montre une circulation de surface cohérente avec un transport des eaux vers le large, suggérant que le rôle du vent, via le transport d'Ekman est bien représenté.

Cependant, la structure du méandre apparaît moins marquée dans la simulation que dans la Fig.4.b, ce qui indique une sous-représentation probable de la variabilité mésoéchelle du courant des aiguilles. Or, l'étude de (Leber et al., 2017) montre que les événements d'upwelling les plus intenses résultent de la combinaison entre la dynamique des méandres et le forçage par le vent. L'absence d'une structure dynamique aussi marquée dans la simulation suggère que l'intensité et la complexité des processus d'upwelling sont partiellement sous-estimées. Par ailleurs, le gradient thermique apparaît plus diffus dans la simulation, traduisant une atténuation des contrastes entre eaux froides et chaudes. Ce comportement peut être lié à la résolution spatiale du modèle, à des effets de diffusion numérique ou à un forçage atmosphérique simplifié, limitant la

capacité du modèle à reproduire les fronts thermiques intenses observés.

Ainsi, la simulation reproduit correctement les caractéristiques générales de l'upwelling côtier, notamment le refroidissement de surface et la circulation associée, mais elle semble représenter principalement un régime dominé par le vent. En revanche, les observations issues de l'article (Leber et al., 2017) mettent en évidence des situations plus complexes, où l'interaction entre la dynamique du courant et le forçage atmosphérique joue un rôle déterminant dans l'intensité des événements.

3.3.1 Variabilité et structures d'upwelling

Ces simulations mettent en évidence des eaux froides côtières, des méandres et des tourbillons caractéristiques de la dynamique de courant des aiguilles. La variabilité observée le 17 avril de chaque année traduit les instabilités du courant et l'influence des forçages atmosphériques. Le modèle CROCO sert à représenter au mieux l'upwelling malgré qu'il soit moins intense que celui de l'article de référence. Donc, on peut conclure que le modèle CROCO permet de bien modéliser le système d'upwelling côtier.

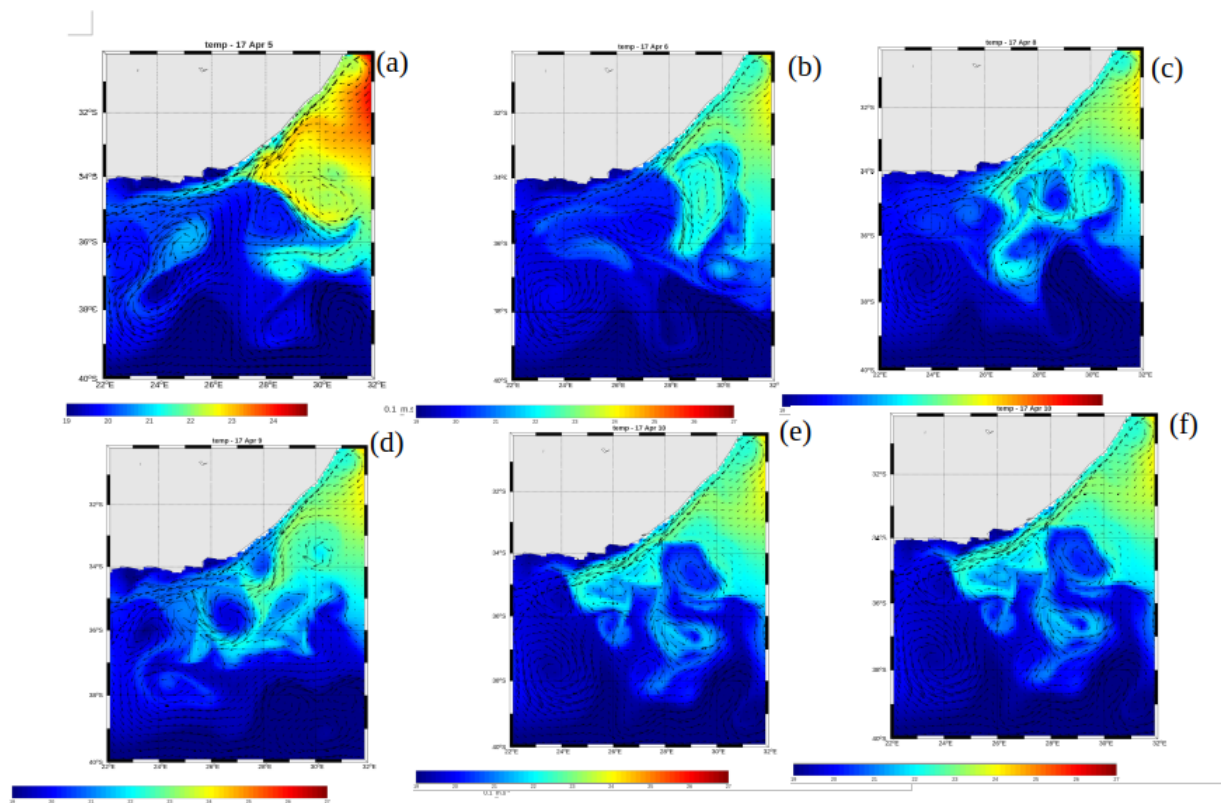


FIGURE 5 – Variabilité interannuelle des upwelling sur 5 ans (5 mètres)

4 Conclusion

Cette étude a permis de comparer une simulation numérique réalisée avec le modèle CROCO aux observations présentées dans la littérature ([Leber et al., 2017](#)) sur les mécanismes d'upwelling dans la région du courant des aiguilles. Toutefois, le modèle sous-estime les structures mésoéchelle comme les méandres, qui jouent un rôle important dans les événements les plus intenses. Cela souligne à la fois l'intérêt du modèle et ses limites pour représenter la complexité des processus océaniques.

Une amélioration du modèle CROCO est nécessaire afin de pouvoir simuler plusieurs zones d'études sans se confronter à des problèmes de résolution et qui permettra de faire tourner le modèle dans les zones à petites échelles.

5 Difficultés rencontrées

Les coordonnées géographiques utilisées dans l'étude de référence (**26°E, 29°E, 33°S, 35°S**) n'ont pas permis d'aboutir à une simulation de cette région par le modèle CROCO. Pour résoudre ce problème, nous avons pris une zone plus large qui a pour coordonnées géographiques (**22°E, 32°E, 30°S, 40°S**), afin de délimiter la zone de référence par la suite avec la commande **croco_gui**.

La simulation à très haute résolution pourrait être très intéressante car elle peut bien montrer les phénomènes à très petite échelle, mais elle est beaucoup plus longue et coûteuse comparait à la petite résolution.

Références

- Atkinson, L. P., Lee, T. N., Blanton, J. O., and Chandler, W. S. (1983). Climatology of the southeastern united states continental shelf waters. *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 88(C8) :4705–4718.
- Bryden, H. L., Beal, L. M., and Duncan, L. M. (2005). Structure and transport of the agulhas current and its temporal variability. *Journal of Oceanography*, 61(3) :479–492.
- Hutchings, L., Beckley, L., Griffiths, M., Roberts, M., Sundby, S., and Van der Lingen, C. (2002). Spawning on the edge : spawning grounds and nursery areas around the southern african coastline. *Marine and Freshwater Research*, 53(2) :307–318.
- Leber, G. M., Beal, L. M., and Elipot, S. (2017). Wind and current forcing combine to drive strong upwelling in the agulhas current. *Journal of Physical Oceanography*, 47(1) :123–134.
- CROCO Web <https://www.croco-ocean.org/>, 2026.