

OPB205 Modélisation 3D
**La variabilité de la circulation de méso-échelle dans
le Canal du Mozambique**

Master Sciences de la Mer, Aix-Marseille Université, 2022-2023

Aude Joël, Mars 2023

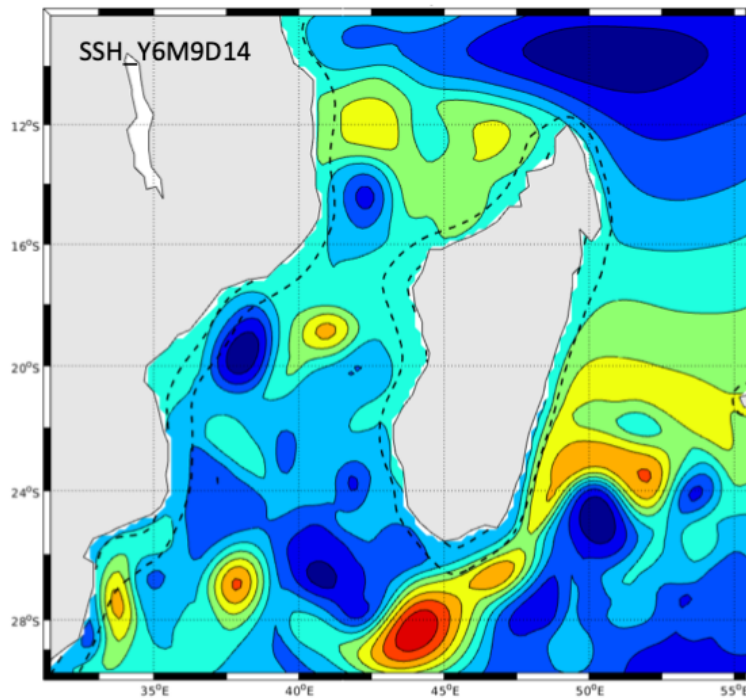


Table des matières

1	Introduction	4
2	Matériels et Méthode	5
2.1	Le modèle ROMS-CROCO et les équations primitives	5
2.2	La paramétrisation du modèle	6
2.2.1	La création de la grille	6
2.2.2	Les conditions aux limites et aux frontières	6
2.2.3	La détermination du pas de temps	7
2.2.4	La simulation numérique	7
3	Résultats	7
3.1	Le diagnostique du modèle et sa stabilité	7
3.2	L'identification des structures tourbillonnaires de méso-échelle	8
3.2.1	L'étude des vitesses de courant en surface	8
3.2.2	L'étude de la surface libre	10
4	Discussion	11
5	Conclusion	13

Table des figures

1	Principaux courants circulant dans le Sud de l'Océan Indien (Van der Werf et al., 2010)	4
2	Bathymétrie dans le Canal du Mozambique	6
3	Diagnostic du modèle sur les 10 années de simulation.	8
4	Vitesse de courant en surface (en m/s) le 14 février (a), le 14 mai (b), le 14 août (c) et le 14 novembre (d) de l'année Y5	9
5	SSH (en m) le 14 février (a), 14 mai (b), 14 août (c) et 14 novembre (d) de l'année Y5. .	10
6	Variabilité océanique dans le Canal du Mozambique exprimée par l'élévation de la surface libre (en cm). Valeurs du modèle moyennées sur les années Y4-Y10.	11
7	Comparaison des localisations des structures tourbillonnaires avec à gauche les SSH détectées par CROCO à Y5M9D14 (en m) et à droite la détection satellite des structures tourbillonnaires cycloniques (notées C) et anticycloniques (notées A) le 15 septembre 2003, d'après (Halo et al., 2013)	12
8	Comparaison de la variabilité océanique exprimée par l'élévation de la surface libre (moyennes quadratiques en cm) avec CROCO Y4-Y10(a), SWIM (b), HYCOM (c) et AVISO(d)	13

Liste des tableaux

1	Résumé des paramètres de la grille	6
2	Résumé des pas de temps du modèle	7

Résumé

Le Canal du Mozambique est caractérisé par une intense circulation tourbillonnaire de méso-échelle trouvant son origine dans l’Océan Indien. Ces tourbillons anticycloniques et cycloniques génèrent localement des phénomènes d’*upwellings* qui amènent à la surface des eaux froides riches en nutriments qui soutiennent les écosystèmes marins. L’objectif de la simulation CROCO, réalisée en mars 2023, dans le cadre de l’UE Modélisation 3D - OPB203, a été d’analyser la localisation de la formation des tourbillons de méso-échelle et leurs principales caractéristiques grâce à l’étude des vitesses de courant et de l’élévation de la surface libre. Le modèle climatologique ROMS-CROCO utilisé a été configuré avec une résolution horizontale de $1/5$, une résolution verticale de 45 couches avec des fichiers de sortie générés tous les trois jours pendant dix ans. L’étude des résultats de la simulation a mis en évidence des zones privilégiées de formations des tourbillons au sud-est de Madagascar, au nord du Canal du Mozambique ainsi que sa partie centrale et sud, à proximité des côtes africaines. Ces résultats ont été comparés à ceux obtenus par Halo et al., 2013, grâce à des observations satellites (AVISO) et des simulations faites avec les modèles ROMS-CROCO (SWIM) et HYCOM. Un écart certain dans les résultats est notable dans la variabilité océanique le long des côtes africaines dans le Canal du Mozambique : HYCOM et AVISO indiquent une variabilité principalement le long des côtes africaines, alors que CROCO les trouve au SE de Madagascar. Des différences sont également notables entre les modèles SWIM et CROCO. Ces écarts sont attribués aux différences de discrétisations spatiales verticales (hybride pour HYCOM et sigma pour ROMS-CROCO) ainsi qu’aux bases de données utilisées pour les forçages de vent (COADS pour la simulation et QuickSCAT dans l’article) L’étude approfondie de ces structures tourbillonnaires est importante dans la compréhension de la circulation océanique de la zone et du système des Aiguilles et, *in-fine*, dans la compréhension de la vie marine de la région.

Abstract

The Mozambique Channel is characterized by an intense southward turbulent mesoscale eddy circulation at the origin of localized upwelling phenomena that bring to the surface cold waters rich in nutrients that fuel local ecosystems. The goal of the CROCO simulation realized in March of 2023, as part of the OPB203 teaching, was to assess the location and main properties of eddies in the region, thanks to the analysis of speed and sea surface high parameters in particular, to better characterize them. The climatological ROMS-CROCO model used for the simulation was configured with a $1/5$ horizontal and a 45-vertical resolutions, with output files generated every three days during a period of ten years. The study of the model outputs highlights privileged locations for the formation of anticyclonic eddies, in particular in the South-East of the Madagascar Island and in the northern Mozambique Channel, while cyclonic eddies are found in the central and southern part of the Mozambique Channel, close the African coasts. The result were compared to the ones presented by Halo et al., 2013, which consist in *in-situ* data and simulations made with ROM-CROCO (SWIM) and HYCOM’s models. A certain gap is observe in the Mozambique Channel along the African costs where HYCOM and AVISO find most of the variability, while CROCO finds them at the SE of Madagascar. Differences are also noticeable between CROCO and SWIM. Discrepancies are attributed to the differences in vertical discretisations (hybrid for HYCOM and sigma for ROMS-CROCO) as weel as the data bases used to model wind stress (COADS for CROCO and QuickSCAT for SWIM). Further analyses should focus on exploring better the frequency of appearance of eddies, their size, life time, etc. with are critical in the understanding if the phenomena and, eventually, in the understanding of marine life in the region.

1 Introduction

La modélisation numérique permet, depuis la seconde moitié du XX^{ème} siècle, de mieux apprécier les processus physiques et biogéochimiques complexes qui régissent la circulation océanique mondiale. Ces dernières décennies, les progrès dans le domaine de l’informatique ont permis d’augmenter la puissance de calcul des outils tout en optimisant leur coût, les rendant incontournables dans la compréhension des phénomènes océaniques de grande et petite échelle. Dans cette étude, le modèle ROMS-CROCO a été utilisé pour étudier la circulation dans le Canal du Mozambique (CM).

Le CM, situé entre l’île de Madagascar et le continent africain, fait partie du grand système du Courant des Aiguilles (CA) (Weijer et al., 1999). C’est un des courants océaniques les plus forts et réguliers du globe qui joue un rôle important dans les transferts de chaleur et de sel entre l’Océan Indien et l’Océan Atlantique grâce à un mouvement de rétroflexion et qui participe au maintien de la circulation thermo-haline et de l’équilibre climatique global (Beal et al., 2011). La fréquence et l’intensité de cette rétroflexion est modulée par les perturbations méso-échelles qui surviennent dans le CM et au sud de Madagascar ((Schouten et al., 2002); (Penven et al., 2006); (Biaostoch et al., 2008)).

Le *South Equatorial Current* (SEC), intense courant d’est arrivant de l’Océan Indien, se sépare en deux en arrivant à l’Est de Madagascar : une partie est détournée vers le nord et forme le *North East Madagascar Current* (NEMC), entre dans le CM et crée une circulation orientée vers le sud et dominée par des structures tourbillonnaires anticycloniques de méso-échelle appelées ”eddies” ((Biaostoch and Krauss, 1999); (Ridderinkhof and Wilhelmus de Ruijter, 2003); (Schouten et al., 2003)); l’autre partie devient le *South East Madagascar Current* (SEMC) en passant au sud de l’île, son courant est intensifié et crée une forte turbulence avant de rejoindre la branche venant du nord (Fig1). Ces tourbillons océaniques cycloniques et anticycloniques sont à l’origine d’une remontée d’eaux profondes froides et d’un phénomène d’*upwelling* qui, chargées en nutriments, est à l’origine d’une activité phytoplanctonique supportant l’écosystème marin dans cette région. la circulation océanique dans le CM a été modélisée grâce au modèle ROMS-CROCO afin d’identifier et caractériser ces structures tourbillonnaires.

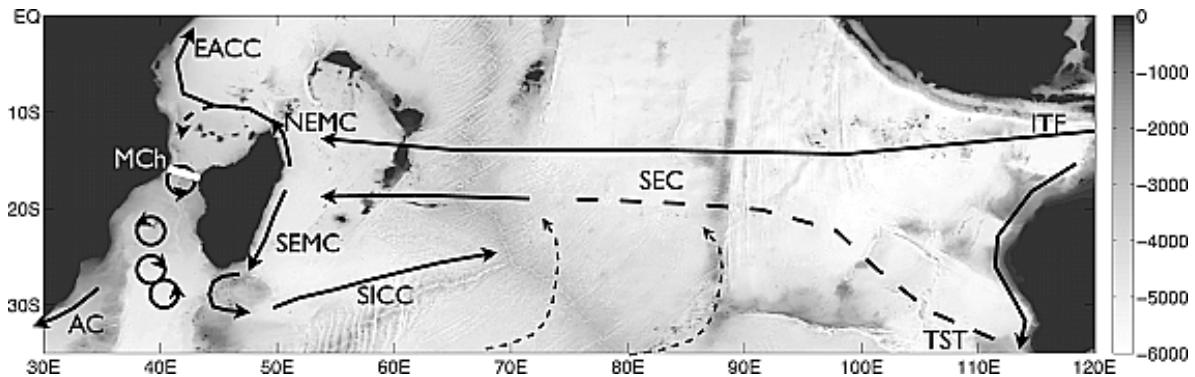


FIGURE 1 – Principaux courants circulant dans le Sud de l’Océan Indien (Van der Werf et al., 2010)

2 Matériels et Méthode

2.1 Le modèle ROMS-CROCO et les équations primitives

Le modèle ROMS-CROCO (Regional Ocean Modeling System, Coastal and Regional Ocean CCommunity model) utilisé ici est un modèle de circulation océanique régional. Il réalise des simulations dites "réalistes", car elles utilisent des données de bathymétrie et de forçage in-situ, et "climatologiques" car elles sont représentatives d'une période couvrant une période de plusieurs années et sur laquelle les données ont pu être moyennées. Le modèle permet de calculer des vitesses de courant, l'élévation de la surface libre et l'évolution de paramètres tels que la température, la salinité, la masse volumique, etc.

Dans un référentiel en rotation, le modèle résout un certain nombre d'équations dites "primitives", décrites par un système de coordonnées cartésiennes (O,x,y,z) et discrétisées avec une maille de calcul de type Arawaka-C. Les équations de Navier-Stokes, aussi appelées équations du mouvement (Eq.1,2,3), permettent de suivre l'évolution d'une particule fluide (vitesses horizontales u et v et élévation de la surface libre), tandis que les paramètres physico-chimiques sont décrits par les équations de conservation (température et salinité) (Eq.4,5) et par l'équation d'Etat de l'eau de mer (masse volumique) (Eq.6). Plusieurs hypothèses sont appliquées à ces équations pour permettre la modélisation : l'approximation hydrostatique (les équations de mouvement sont réduite à un équilibre des forces de pression sur la verticale et de gravité), l'approximation de Boussinesq qui permet de considérer constante la densité sur l'axe vertical dans le terme de l'accélération de pesanteur, l'équation de continuité et la fermeture de Reynolds sur la viscosité turbulente.

Les équations du mouvements (Navier-Stokes) :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u.\nabla u - fv = -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial P}{\partial x} + A_h \nabla_h^2 u + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v.\nabla v + fu = -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial P}{\partial y} + A_h \nabla_h^2 v + A_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} + v.\rho g = 0 \quad (3)$$

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

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u.\nabla T = K_h \nabla_h^2 T + K_v \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (4)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u.\nabla S = K_h \nabla_h^2 S + K_v \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \quad (5)$$

L'équation d'Etat de l'eau de mer (TEOS10) :

$$\rho = \rho(T, S, Z) \quad (6)$$

Avec : u et v les vitesses horizontales en x et y, T la température, S la salinité, P la pression, ρ et ρ_o la masse volumique et la masse volumique à pression atmosphérique, A_h et A_v les coefficients de viscosité horizontaux et verticaux, f le facteur de Coriolis et K_h et K_v les coefficients de diffusion turbulente horizontale et verticale.

2.2 La paramétrisation du modèle

2.2.1 La création de la grille

Les coordonnées géographiques de la zone à étudier ont été choisies et une discrétisation spatiale horizontale et vertical a été établie : Une grille de type Arakawa-C avec une résolution de $1/5^\circ$ (dl) sur l'horizontale et une grille de type sigma (N) pour la résolution verticale, avec 45 couches ont été adoptées. Les données des fichiers *crocotools-param* ont été ajustées. L'exécution du script *make-grid* dans Matlab permet de calculer le nombre de points du maillage dans les 3 directions x(LLm), y(MMm) et z(N) (sauvegardées dans *memo.mat*) et de générer une carte de la bathymétrie de la zone choisie (Fig.2). Les paramètres de la grille sont résumés dans le tableau 1.

TABLE 1 – Résumé des paramètres de la grille

longitude	latitude	dl	N	LLm	MMn	dx	dy
31°E	30°S	1/5	45	124	117	19.25	19.27
56°E	8°S					22.0	22.01

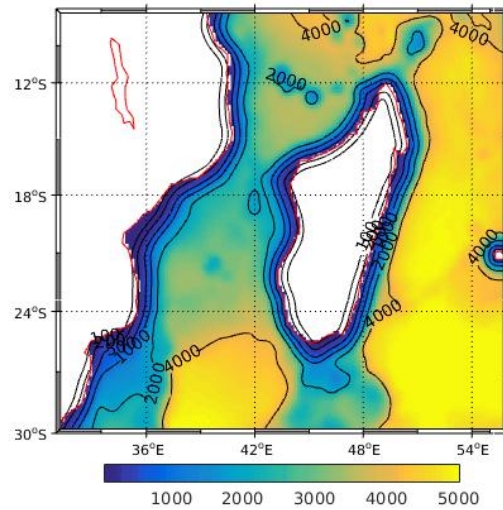


FIGURE 2 – Bathymétrie dans le Canal du Mozambique

La zone définie est relativement grande et permet d'étudier la formation et la circulation des structures tourbillonnaires dans le CM ainsi qu'au sud de Madagascar où se produit une accélération du SEMC due à la topographie côtière à l'origine d'une grande turbulence.

2.2.2 Les conditions aux limites et aux frontières

Les conditions initiales et aux bords du modèle ont été créées à partir de la base de données du World Ocean Atlas 2009 (WOA09) qui fournit des données analysées et moyennées de température, salinité,

oxygène et nutriments. Les conditions de surface ont, elles, été créées à partir de l’International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set (ICOADS) sur la base d’observations et d’analyses de données de surface marine comme les flux de chaleur ou d’eau douce. Ils ont permis configurer respectivement les fichiers *make-clim* *make-forcing*, tous deux utilisés par le modèle pour la simulation numérique. Le script *ccpdef.h* définit les frontières du modèle, ouvertes (Nord, Est et Sud) et fermées (Ouest).

2.2.3 La détermination du pas de temps

Les pas de temps interne (dt) et externe (NTDFAST) utilisés par la simulation numérique doivent être adaptés à la grille du modèle ainsi qu’aux temps de calcul et de simulation souhaités. Ils sont définis dans le script *ad-cfl* sur la base du critère CFL (Courant-Friedrichs-Levy) qui lie la résolution spatiale et la résolution temporelle. Celui ci dit que Δt doit être supérieur à la célérité c d’une onde longue, où h_{max} est la profondeur maximale de la zone étudiée et Δx et Δy indiquent la taille du maillage (Eq. 7 et 8). Cela permet d’utiliser un pas de temps pour résoudre les équations 3D qui modélisent les ondes de gravité internes (par exemple les ondes de marée) et un autre pas de temps, plus rapide, qui permet de modéliser les ondes de gravité externes (par exemple la houle). Les valeurs des pas de temps déterminés par le modèle sont résumées dans le Tableau 2.

$$\Delta t \leq \frac{1}{c} \left[\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (7)$$

avec :

$$c = \sqrt{gh_{max}} \quad (8)$$

TABLE 2 – Résumé des pas de temps du modèle

dt(s)	NTIMES	NTDFAST
2880	900	60

2.2.4 La simulation numérique

La simulation climatologique du modèle a été réalisée le 28 mars 2023 et porte sur une période de 10 ans, avec des sorties moyennées tous les 3 jours. Elle sera dénommée dans la suite du rapport comme le modèle CROCO.

3 Résultats

3.1 Le diagnostique du modèle et sa stabilité

L’exécution des scripts *croco-diags* et *plot-diags* dans Matlab génère un diagnostique (Fig.3) qui permet d’évaluer la cohérence et la stabilité du modèle. Le temps de *spin-up* (temps de stabilisation du modèle) est court car à partir de la fin de l’année Y1, le modèle acquiert des oscillations saisonnières autour d’une valeur de référence. Ceci est particulièrement visible pour le paramètre *volume average kinetic energy*. Les figures présentées dans la suite de ce rapport ne prendront pas en compte les trois

premières années afin de s'assurer que les valeurs utilisées dans les analyses sont stables. L'année Y5 sera considérée comme valeur de référence dans la suite de l'étude.

Il est à noter que l'évolution du *volume average salt* montre une tendance à la baisse sur les 10 ans ce qui n'est pas réaliste. Les apports d'eau douce, notamment des fleuves mozambicains Zambese et Limpopo qui se déversent dans le CM, n'ont pas été pris en compte dans le modèle et constituent des approximations importantes.

La suite de la section 3 s'attache à analyser les paramètres qui expriment la circulation tourbillonnaire de méso-échelle du CM, notamment à partir des données de vitesse, température et élévation de la surface libre.

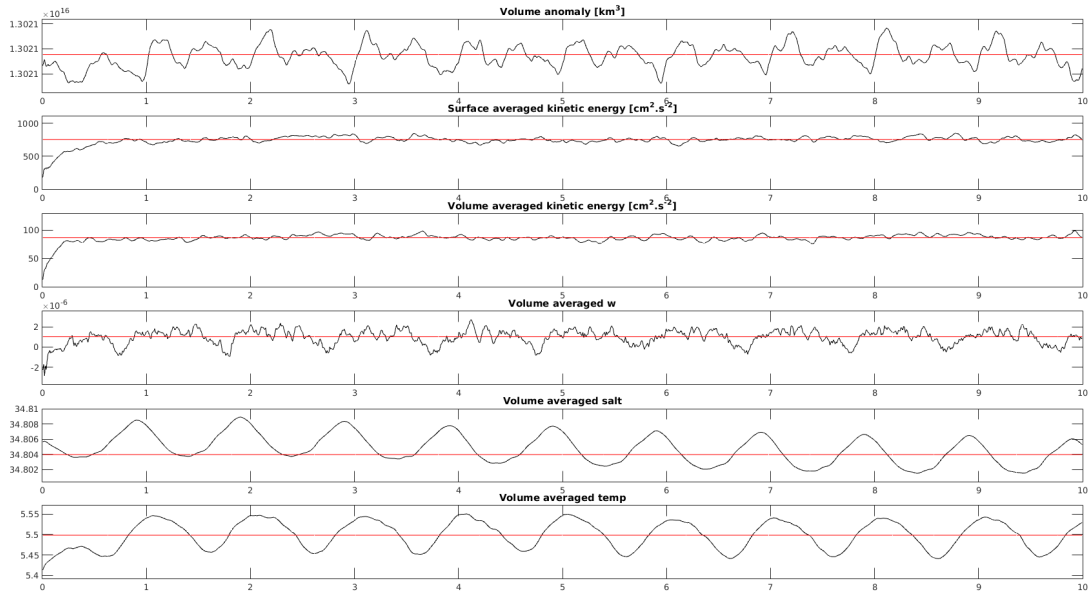


FIGURE 3 – Diagnostic du modèle sur les 10 années de simulation.

3.2 L'identification des structures tourbillonnaires de méso-échelle

3.2.1 L'étude des vitesses de courant en surface

L'étude des vitesses de surface permet d'identifier les grandes structures de courant dans le CM. La Fig.4 montre une photographie des vitesses de courant à quatre instants de l'année Y5 : en février (a), mai (b), août (c) et novembre (d).

Arrivant de l'est, le SEC se scinde en deux au niveau de Madagascar. Au nord de l'île, le courant gagne en intensité (avec des valeurs de l'ordre de 1m/s) jusqu'à atteindre la côte africaine. Dans la partie nord du CM, se forment des *eddies*, structures tourbillonnaires de méso-échelle aisément identifiables, marquées par une augmentation moindre mais cependant significative de l'intensité du courant (aux

environs de 0.5m/s). Des structures similaires sont également présentes en direction du sud dans la partie ouest du CM, le long des côtes africaines. La branche sud du SEC forme, avant d'arriver à Madagascar, des *eddies*, d'une intensité plus élevée que les tourbillons du nord du CM (supérieure à 1m/s).

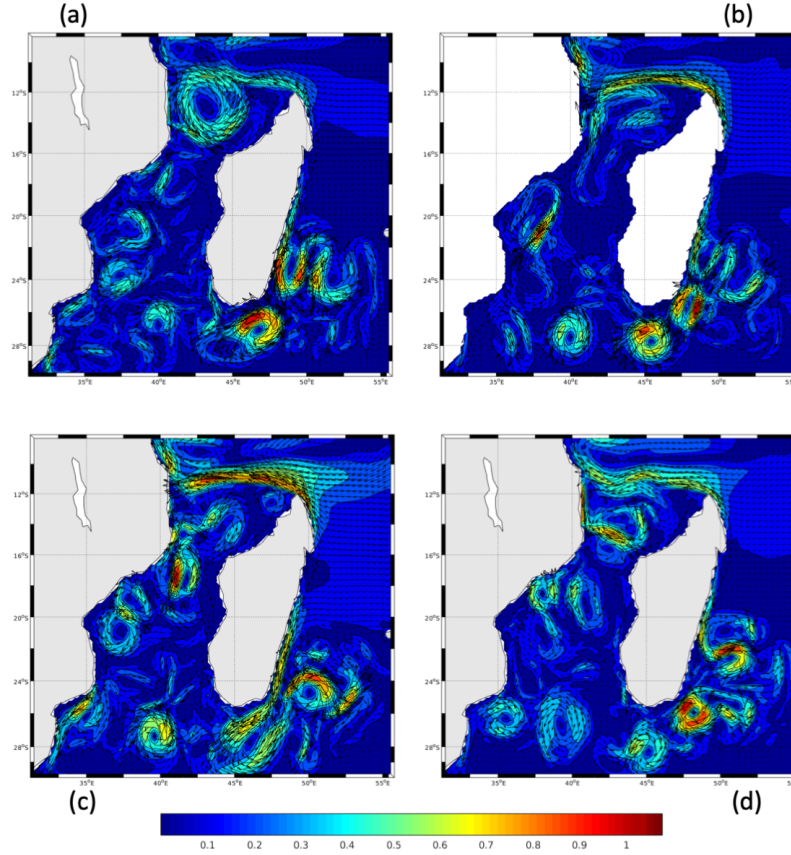


FIGURE 4 – Vitesse de courant en surface (en m/s) le 14 février (a), le 14 mai (b), le 14 août (c) et le 14 novembre (d) de l'année Y5

Le sens des flèches de courant indique que des tourbillons anticycloniques et cycloniques (respectivement de sens antihoraire et horaire dans l'hémisphère sud) coexistent dans le canal du Mozambique. Ces deux types de structures semblent avoir des zones de formation privilégiées dans la région étudiée : principalement anticycloniques au sud de Madagascar et au nord du CM, tandis que les deux types de *eddies* se retrouvent dans la partie centrale du CM. Si les quatre saisons de l'année Y5 semblent globalement présenter les mêmes tendances de formation de tourbillons, il est à noter que les tailles et intensités prises par les tourbillons sont variables. Celles-ci peuvent être influencées par les conditions météorologiques locales particulières (inversion des régimes de vent en hiver/été et variation importante des précipitations).

3.2.2 L'étude de la surface libre

L'analyse de la hauteur surface libre (SSH) de la Fig.5, aux mêmes quatre dates que pour les vitesses de courant, montre que ces intensifications de courant et structures tourbillonnaires coïncident avec les grandes tendances de variations de la surface libre : il se produit une surélévation dans les zones anticycloniques au nord du CM et au sud de Madagascar (de l'ordre de 0.5m) et une sous-élévation dans les zones de formation cycloniques dans le CM (jusqu'à -0.4m).

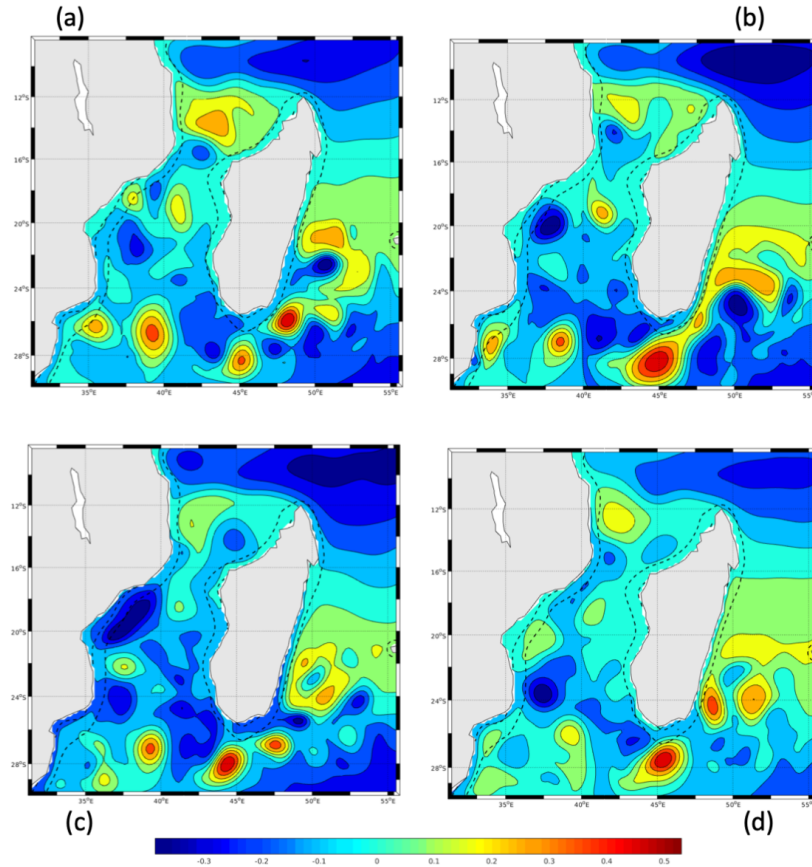


FIGURE 5 – SSH (en m) le 14 février (a), 14 mai (b), 14 août (c) et 14 novembre (d) de l'année Y5.

Il existe une corrélation certaine dans la localisation de ces structures entre les données vues précédemment avec les champ de vitesse et ces données de hauteur de la surface libre, cohérentes entre elles.

Les figures 4 et 5 sont des "arrêts sur image" à des instant de l'année Y5 de la simulation, pris plus ou moins arbitrairement mais il convient également d'évaluer si ces informations sont représentatives de tendances de variabilité de méso-échelle plus globales sur la durée de la simulation. A cette fin, les valeurs de SSH ont été moyennées sur les sept dernières années de la simulation (Y4-Y10) grâce au script Matlab en annexe (I) et sont représentées sur la figure 6, exprimées en cm. Celle-ci montre

clairement les zones de surélévation positive au sud de Madagascar (jusqu'à 15cm) et au nord du CM (environ 10cm) ; et celles de sous-élévation dans la partie centrale du CM (de l'ordre de -5cm), consistantes avec les arrêts sur image de la Fig.5, et indique une certaine cohérence avec les arrêts sur image faits précédemment.

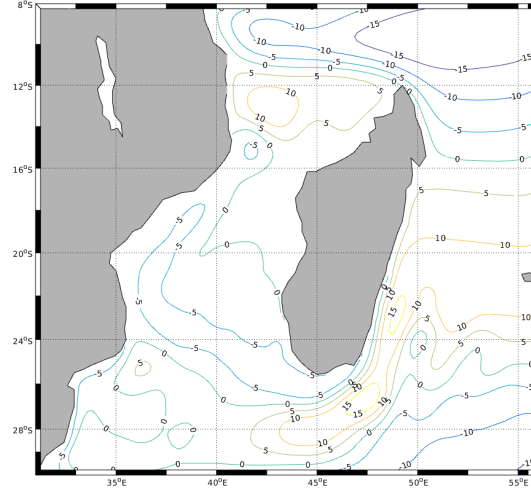


FIGURE 6 – Variabilité océanique dans le Canal du Mozambique exprimée par l'élévation de la surface libre (en cm). Valeurs du modèle moyennées sur les années Y4-Y10.

4 Discussion

Ces résultats sont à mettre relation avec l'étude de Halo et al., 2013, qui s'est intéressée aux propriétés des tourbillons de méso-échelle dans le CM. Celle-ci compare des observations satellites (AVISO) et des données obtenues grâce à deux modèles : ROMS-CROCO (modèle SWIM dans la suite de ce rapport pour le différencier de la simulation faite avec CROCO dans le cadre du cours) et HYCOM (*Hybrid Coordinate Ocean Model*). La configuration SWIM adopte des critères similaires à ceux adoptés dans la simulation CROCO : la zone étudiée va de 30°/54°E en longitude et de -6°/-33°S en latitude, avec une grille horizontale (=dl) de 1/5, 45 sections verticales (=N) et des sorties moyennées tous les 2 jours. La configuration HYCOM a adopté une résolution horizontale de 1/10 et verticale hybride de 30 couches.

La figure 7 compare une carte des valeurs de SSH sorties par CROCO (a) en date du Y5M9D14 et l'identification par AVISO (b) des structures tourbillonnaires cycloniques et anticycloniques dans la région. Si les informations ne sont pas exactement de la même nature et que le paramètre de SSH donne des informations moins détaillées que l'observation satellite, la formation de ces deux types de tourbillons semble pouvoir se superposer : les zones avec de larges eddies cycloniques se trouvent à nouveau au sud de Madagascar et au nord du CM, tandis que les eddies cycloniques, de taille plus réduite sont principalement localisés dans le CM le long des côtes africaines.

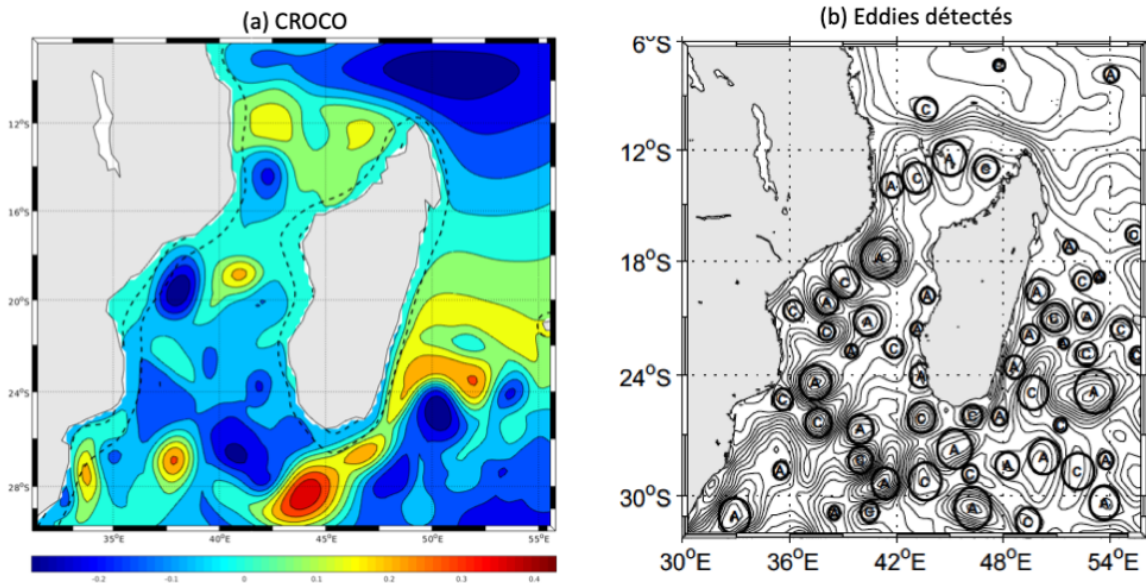


FIGURE 7 – Comparaison des localisations des structures tourbillonnaires avec à gauche les SSH détectées par CROCO à Y5M9D14 (en m) et à droite la détection satellite des structures tourbillonnaires cycloniques (notées C) et anticycloniques (notées A) le 15 septembre 2003, d'après (Halo et al., 2013)

Si la figure 7 représente une image à un instant t de la présence de tourbillons, il convient également d'étudier le phénomène à partir de données moyennées issues de la simulation. La figure 8 compare cette fois-ci les moyennes quadratiques des SSH (qui permettent de s'affranchir des valeurs positives et négatives pour étudier la variabilité pour elle-même) générées par la simulation CROCO (a) avec les études réalisées par Halo et al. du 14 octobre 1992 au 31 mars 2010 avec AVISO (b), sur 7 années de simulation climatologique avec SWIM (c) et de 2001 à 2010 avec HYCOM (d).

Ici les différences sont notables : Les modèles CROCO et SWIM indiquent que les zones de variation de la surface libre les plus importantes se trouvent au sud de Madagascar (25cm) ce qui est consistant avec les données SWIM (sur-élévation jusqu'à 30cm). Au contraire, HYCOM et AVISO n'indiquent pas de surélévation significative dans cette zone et la concentre le long des côtes africaines.

La principale différence entre ROMS-CROCO et HYCOM réside dans la modélisation des couches verticales : le premier modèle adopte une grille "sigma" où le nombre de couches verticales est le même quelque soit la bathymétrie, alors que le second adopte une approche dite hybride mélangeant les grille sigma, z et isopycnales. Les différences entre les modèles CROCO et SWIM sont à chercher dans les bases de données utilisées pour modéliser les conditions de surface et notamment l'influence du vent : CROCO utilise COADS05 avec que SWIM a utilisé les données de QuickSCAT, un satellite qui fournit des informations de vitesse la direction des vents sur les océans pour la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*).

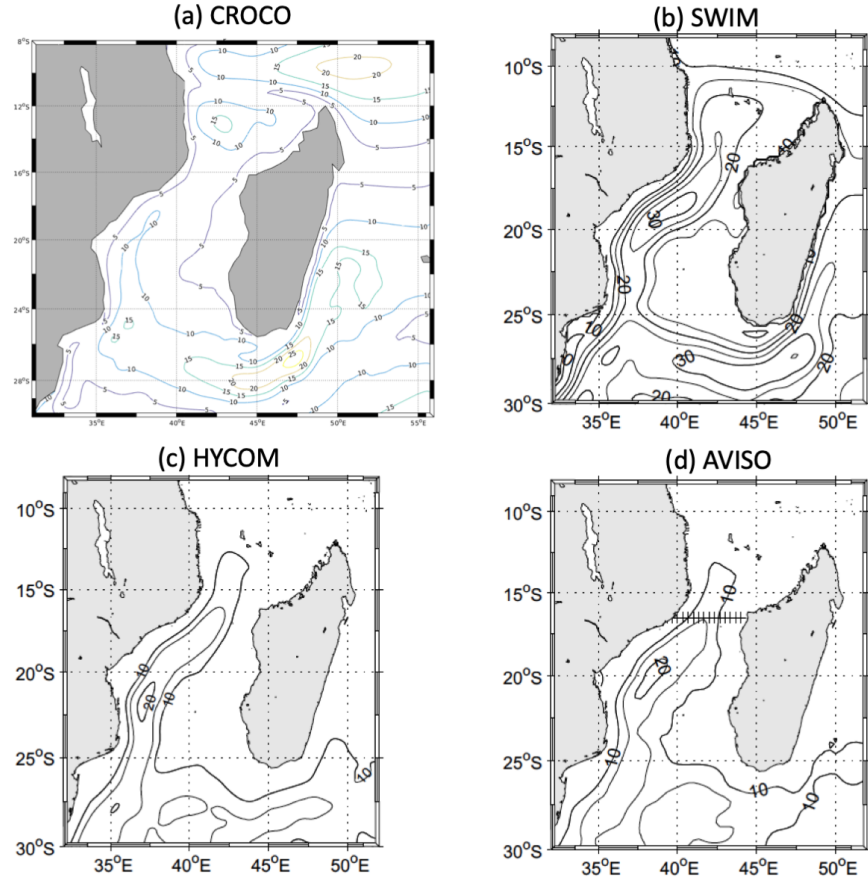


FIGURE 8 – Comparaison de la variabilité océanique exprimée par l'élévation de la surface libre (moyennes quadratiques en cm) avec CROCO Y4-Y10(a), SWIM (b), HYCOM (c) et AVISO(d)

5 Conclusion

L'analyse de la variabilité méso-échelle dans le CM grâce à la simulation CROCO a permis d'identifier les zones privilégiées de formation des tourbillons cycloniques et anticycloniques. Ces résultats ont été confrontés à ceux présentés dans la publication de Halo et al., 2013 et présentent des différences notables dans les zones identifiées comme ayant les plus fortes variabilités océaniques (au SE de Madagascar pour CROCO et le long des côtes africaines pour SWIM, HYCOM et AVISO). Ces différences s'expliquent principalement par les différences de discrétisation verticale ainsi que par les données de forçage utilisées par les modèles. Il serait intéressant de refaire une simulation CROCO en ajustant notamment les paramètres des forçages pour comparer plus précisément les deux simulations faites à 10 ans d'intervalle. D'autre part, une analyse plus détaillée des données de sortie du modèle permettrait de caractériser le phénomène : saisonnalité et fréquences d'apparition des tourbillons, durée de vie, taille, etc., leur étude approfondie se révélant indispensable dans la compréhension de la vie marine dans cette région.

Références

- Beal, L., Wilhelmus de Ruijter, P., Biastoch, A., and Zahn, R. (2011). *On the role of the Agulhas System in ocean circulation and climate*. Nature 472, 429–436.
- Biastoch, A. and Krauss, W. (1999). *The role of mesoscale eddies in the source regions of the Agulhas Current*. J. Phys. Oceanogr. 29, 2303–2317.
- Biastoch, A., Lutjeharms, J., Böning, C. W., and Scheinert, M. (2008). *Mesoscale perturbations control inter-ocean exchange South of Africa*. Geophys. Res. Lett. 35, L20602.
- Halo, I. and, B. B., Penven, P., Ansorge, I., and Ullgren, J. (2013). *Eddy properties in the Mozambique Channel : A comparison between observations and two numerical ocean circulation models*. Deep Sea Res. II Topical Studies in Oceanography.
- Penven, P., Lutjeharms, J., and Florenchie, P. (2006). *Madagascar : a pacemaker for the Agulhas Current system ?* Geophys. Res. Lett. 33, L17609.
- Ridderinkhof, H. and Wilhelmus de Ruijter, P. (2003). *Moored current observations in the Mozambique Channel*. Deep Sea Res. II 50, 1933–1955.
- Schouten, M., Wilhelmus de Ruijter, P., and Jan van Leeuwen, P. (2002). *Upstream control of Agulhas ring shedding*. J. Geophys. Res. 107, C83109.
- Schouten, M., Wilhelmus de Ruijter, P., Jan van Leeuwen, P., and Ridderinkhof, H. (2003). *Eddies and variability in the Mozambique Channel*. Deep Sea Res. II 50, 1987–2003.
- Van der Werf, P. M., Jan van Leeuwen, P., Ridderinkhof, H., and Wilhelmus de Ruijter, P. (2010). *Comparison between observations and models of the Mozambique Channel transport : Seasonal cycle and eddy frequencies*. Journal of Geophysical Research, Vol. 115.
- Weijer, W., Wilhelmus de Ruijter, P., Dijkstra, H., and Jan van Leeuwen, P. (1999). *Impact of Inter-basin Exchange on the Atlantic Overturning Circulation*. J. Phys. Oceanogr. 29, 2266–2284.

Annexe I

Script Matlab : Calcul des moyennes et moyennes quadratiques des SHH sur la période Y4-Y10

```
close all;clear all

dir = '/filer/roms/j20016492/modelisation/MYCROCO/Run/SCRATCH/'
vname = 'zeta'
vlevel = 0
coef = 1
rempts = [0 0 0 0]
mean = zeros(119,126)
mean2 = zeros(119,126)
icount=0

for iy=4 :10;
for im=1 :12;
hisfile=[dir,'croco_avg_Y',num2str(iy),'M',num2str(im),'.nc'];disp(hisfile);
gridfile = hisfile;

for tindex = 1 :1 :10
icount=icount+1;
[lat,lon,mask,var]=get_var(hisfile,gridfile,vname,tindex,vlevel,coef,rempts);
var2 = var.^2;
mean=mean+var;
mean2=mean2+var2;
end;
end;
end
mean = mean./10;
mean2 = mean2./10;
RMS = sqrt(mean2);

figure
m_proj('mercator','long',[31 56],'lat',[-30 -8]);
[cs,h]=m_contour(lon,lat,RMS);
clabel(cs,h,'fontsize',8);
m_grid('box','fancy','tickdir','in');
m_coast('patch',[.7 .7 .7],'edgecolor','k')
```