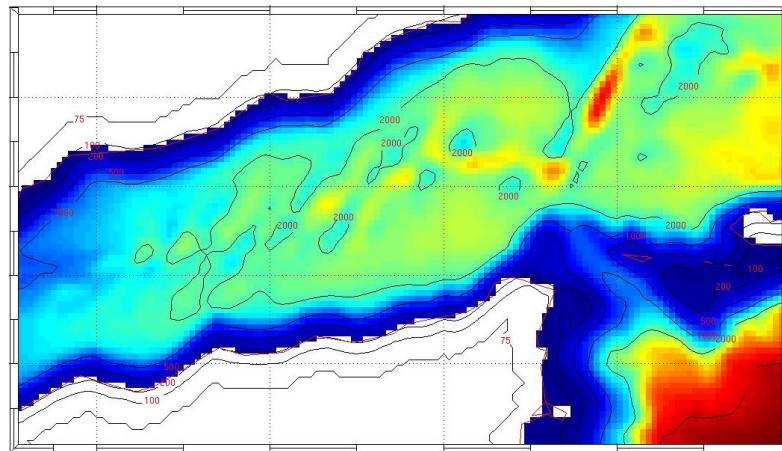


Aix-Marseille Université
Institut Méditerranéen d'Océanologie (MIO)
Institut Pythéas
Observatoire des sciences de l'Univers
Master d'Océanographie 1er année

Rapport du Projet personnel
OPB205 : modélisation de la circulation océanique

Modélisation du Golfe d'Aden avec étude de la sensibilité aux conditions aux bords fermés



Présenté par :

Narimene ZOGHBI

<zoghbi.na@gmail.com>

<narimene.zoghbi@etu.univ-amu.fr>

<narimene.zoghbi.etu.perso.luminy.univ-amu.fr>

Encadré par :

Andrea M.Doglioli

Promotion : (2015/2016)

Table des matières

Table des matières	2
Table des illustrations.....	2
Résumé	1
Abstract	1
1 Introduction	2
2 Materiel et methods.....	2
2.1 Modélisation numériques de la circulation océanique	2
2.2 Modèle numérique ROMS	2
2.2.1 Conditions initiales et aux frontières.....	2
2.2.2 Equations résolues ;	3
2.3 Implémentation du modèle dans le golfe d'Aden.....	3
2.3.1 Etape 1 : Mise en place de la grille (script Matlab : </find_geocoord.m>,</Make_grid>)	3
2.3.2 Etape 2 : Condition initiales et forçages	4
2.3.3 Etape 3 Critères temporels :	5
3 Résultats et discussions	5
3.1 Stabilité du modèle	5
3.2 Structure horizontale de la vélocité de surface	6
3.3 Structure verticale de la vélocité	7
3.4 Cycle annuel et saisonnalité	8
4 Conclusion	10
5 Références bibliographiques	10

Table des illustrations

Figure 1: Grille horizontale et bathymétrie en m utilisée lors de la simulation de la circulation oceanique dans la zone d'étude.	3
Figure 2 ; représentation des forçages du vent dans la zone d'étude (a) en hiver, (b) en été. 4	4
Figure 3 ; les conditions initiale de salinité à deux région du bassin à deux index de temps différents.....	4
Figure 4 : diagnostique de la simulation	5
Figure 5: vecteurs des courants et vélocité (I) février au profondeurs de (a)100m,(b)300m,(c)600m.et en (II) juillet. Avec des surfaces de salinité.....	6
Figure 6: section verticale de la température au long du bassin sur les 400 premiers m de profondeur à différentes périodes. (a) Octobre, (b) Mars, (c) juin, (d) Aout.....	7
Figure 7 : élévation de surface pendant l'année 6 et 7 de la simulation	9
Tableau 1: tableau récapitulatif résumant les paramètres spatiaux de la grille	3
Tableau 2: tableau récapitulatif des paramètres temporels calculés.....	5

Résumé

Le golfe d'Aden (GOA) dans le nord-ouest de l'océan Indien est le bassin de réception pour Outflow Mer Rouge Eau (RSOW), l'un des rares outflow à haute salinité et densité du monde, mais relativement peu est connu sur sa propagation et de la transformation de RSOW dans golfe. Ici j'ai essayé de mettre d'implémenter le modèle ROMS à cette région afin de caractériser les tourbillons caractéristiques de la zone et leurs formations.

Les résultats indiquent que les importantes anomalies du niveau de la mer positive et négative sont fréquemment observés dans le GOA sont associées à des tourbillons anticycloniques et cycloniques profonds (au moins 1000 m). Ils dominent la propagation des RSOW et aident au mélange. Le golfe transportent souvent un noyau d'eau fraîche de la mer d'Oman jusqu'à l'extrémité ouest de la GO. Cela génère des gradients verticaux et horizontaux de la température et de la salinité, mettant en place des conditions favorables pour la convection diffusive du sel.

Enfin il y a une cyclicité annuelle dépendante des moussons qui régissent le sens des tourbillons et leurs natures. Généralement ces résultats sont tout à fait en conformité avec la littérature, mais afin de comprendre pleinement ce processus et de pousser la démarche encore plus loin. Une simulation de résolution beaucoup plus élevée doit être menée.

Abstract

The Gulf of Aden (GOA) in the northwestern Indian Ocean is the receiving basin for Red Sea Outflow Water (RSOW), one of the World's few high-salinity dense overflows, but relatively little is known about spreading pathways and transformation of RSOW through the gulf. Here i tried to implement ROMS Model to this reagion in order to caractériser the eddies formations

The results indicate that the prominent positive and negative sea level anomalies frequently observed in the GOA are associated with anticyclonic and cyclonic eddies that often reach to at least 1000 m depth. The eddies dominate RSOW spreading pathways and help to rapidly mix the outflow water with the background. Eddies in the central

the gulf often transport a core of much cooler, fresher water from the Arabian Sea all the way to the western end of the GOA, where the highest-salinity outflow water is found. This generates large vertical and horizontal gradients of temperature and salinity, setting up favorable conditions for salt fingering and diffusive convection. Both of these mixing processes were observed to be active in the gulf. and finally there is an anual cyclicity in the eddies direction and outcom dependant of the mousson. Generally those results are quite in accordance with the litterature but in order to fully understand this process and to be certify the model accordance. A much higher resolution simulation have to be conducted.

1 Introduction

Le Golfe d'Aden est le bassin récepteur de l'overflow d'eaux denses et salines venant de la Mer Rouge (RSW). Cet overflow résulte de l'excès d'évaporation provoqué par les vents de mousson dans la mer rouge (estimé à 2m.an^{-1}) (Morcos, 1970). Contrairement à beaucoup d'autres overflows de bassin mineurs, le transport de ce dernier est fortement saisonnier en raison des vents de moussons. L'écoulement dense quittant la mer Rouge descend de la profondeur seuil de 150 m au niveau du détroit de la porte des lamentations (Bab el Mandeb), entraînant des eaux du golfe d'Aden, plus jeunes et moins denses, pour se stabiliser vers la partie occidentale du golf à 600 m de profondeur. Et ce, entre une multitude de couches d'eaux intermédiaires à forte densité. Cette eau (RSW) se propage littéralement à travers le golf (Siedler, 1968; Bower et al., 2000). Le mélange et l'agitation prennent place dans le Golf mettent en place les propriétés des RSW avant que elle ne se propagent encore plus dans l'océan indien ouvert où elle sont une des masses d'eaux intermédiaires (Wyrtki, 1971; Beal et al., 2000).

Le manque de donnée in situ récentes ont sévèrement limité la compréhension de l'océanographie physique de ce bassin. Pour y pallier, un large programme appelé Red Sea Outflow Experiment (REDSOX) a récemment été entrepris pour observer le mélange de la propagation des RSW permettant d'obtenir la première description tridimensionnelle de la structure de l'hydrographie et la vitesse des RSW dépendantes et en équilibre durant l'été et l'hiver, révélant de nombreux tourbillons très énergétiques et profonds qui influencent fondamentalement la propagation des RSW. Il n'en demeure pas moins essentiel d'acquérir plus de donnée et de mieux comprendre l'hydrographie de cette zone. La modélisation océanique est un outil puissant pour comprendre la dynamique complexe des courants dans cette zone. Le modèle de circulation océanique ROMS (Regional Ocean Modeling System) a été utilisé pour caractériser la circulation océanique en place dans le Golfe d'Aden et ces fameux tourbillons.

2 Matériel et méthodes

2.1 Modélisation numériques de la circulation océanique

A partir de la moitié du XXème siècle, les progrès au niveau du développement de la modélisation numérique de la circulation océanique ont vu le jour. Un des fondements de cette évolution a été l'assimilation entre les bases acquises de la prévision numérique du temps en météorologie et la circulation océanique. Le résultat de ce développement intensif et l'existence d'outils de recherche puissants basés sur les ordinateurs, permettent une interaction sans précédent entre les expériences physiques et numériques. Ces améliorations ont considérablement changé notre compréhension de nombreux aspects des mécanismes d'écoulements, permettant un traitement complet des processus spatio-temporels dans les écoulements des fluides.

2.2 Modèle numérique ROMS

Le modèle ROMS (Regional Ocean Modeling System) est un modèle, à surface libre, de nouvelle génération et a été créé pour effectuer des simulations réalistes de circulation océanique à échelle régionale qui permettent de calculer la vitesse des courants, l'élévation de la surface libre mais aussi l'évolution de grandeurs telles que la température ou la salinité. Pour cela le modèle résous les équations de la mécanique des fluides géophysiques suivant les approximations de Boussinesq, hydrostatique et d'incompressibilité. Depuis plusieurs années, ROMS a connu sous l'impulsion de la communauté internationale d'utilisateurs, de nombreux développements qui font de lui un outil polyvalent tant dans la diversité des configurations employées (de la circulation côtière jusqu'à la circulation en bassin), que dans les moyens mis en œuvre (outils pré et post processing, ROMS Tools).

2.2.1 Conditions initiales et aux frontières

Les conditions initiales et aux frontières sont paramétrées en utilisant des données océanographiques mondiales (World Ocean Atlas (WOA), SeaWiFS, QuickSCAT winds...). Les

résultats issus de la simulation peuvent ensuite être visualisés à l'aide de la toolbox ROMS_tools qui fournit un ensemble de scripts Matlab. L'équation d'état de l'eau de mer utilisée est l'équation TEOS-10.

2.2.2 Équations résolues :

2.2.2.1 Équations du mouvement

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} + U \cdot \nabla u &= -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial P}{\partial x} + fv + A_h \nabla_h^2 u + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + U \cdot \nabla v &= -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial P}{\partial y} - fu + A_h \nabla_h^2 v + A_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\end{aligned}$$

2.2.2.2 Équation de continuité

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

2.2.2.3 Équation de conservation de la chaleur et du sel

$$\begin{aligned}\frac{\partial T}{\partial t} + U \cdot \nabla T &= A_h \nabla_h^2 T + A_v \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{Q_c}{\rho C_p} \frac{\partial I}{\partial z} \\ \frac{\partial S}{\partial t} + U \cdot \nabla S &= A_h \nabla_h^2 S + A_v \frac{\partial^2 S}{\partial z^2}\end{aligned}$$

2.3 Implémentation du modèle dans le golfe d'Aden

2.3.1 Étape 1 : Mise en place de la grille (script Matlab : </find_geocoord.m>, </Make_grid>)

Tableau 1: tableau récapitulatif résumant les paramètres spatiaux de la grille

Résolutions	Frontières			
1/15	Sud	Est	Nord	Ouest
	Ouvete	Ouverte	Ouverte	Ouverte
Cordonnées géographiques	Longitudes min	Longitude max	Latitude min	Latitude max
	45°	52°	10°	15°

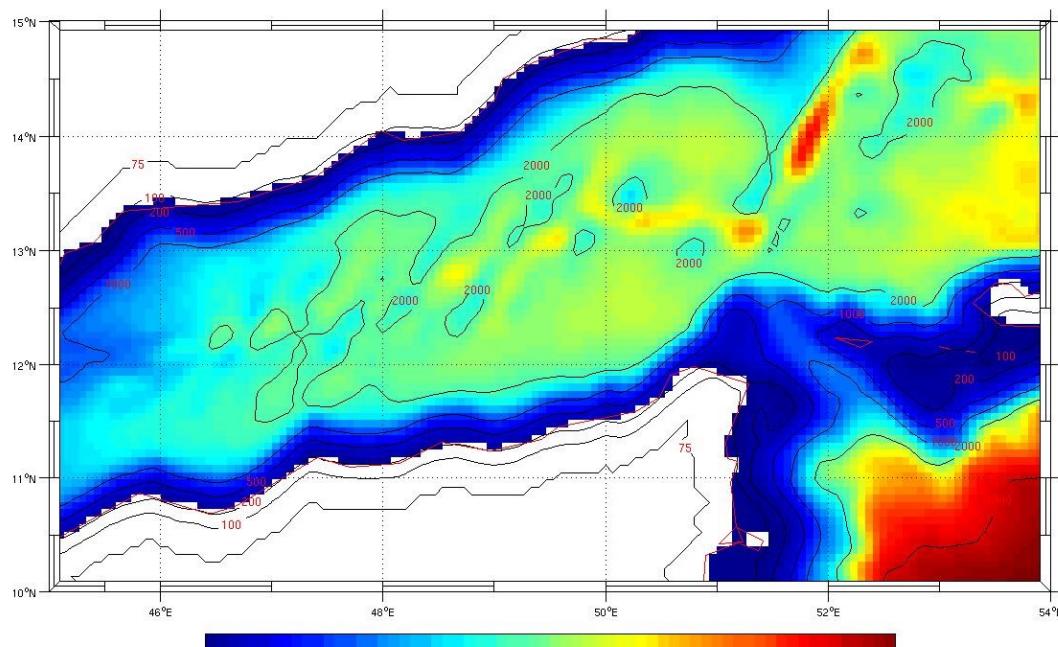


Figure 1: Grille horizontale et bathymétrie en m utilisée lors de la simulation de la circulation oceânique dans la zone d'étude.

Cette zone est caractérisée par une topographie complexe et abrupte avec un gradient de profondeur est-ouest. Le bassin atteint en moyenne de profondeurs de 2200m avec des maximums atteignant les 5000m.

Le modèle ROMS est un modèle de circulation océanique, ainsi les équations du mouvement appliquées aux eaux peu profondes n'y sont pas représentées. De ce fait l'application du modèle aux zones côtières est extrêmement difficile ce qui nous a malheureusement empêcher d'inclure Bab el Mandeb dans la simulation afin de caractériser l'overflow. L'étroitesse de détroit et sa faible profondeur ont fortement posés problème lors des deux premières simulations. Pour pallier à ce problème plusieurs maillages, ainsi que différentes coordonnées géographiques, ont été essayés. Ces coordonnées ont été obtenues grâce à un script MATLAB `</Find_geocoord.m>`. Il a suffi ensuite de les entrer dans les fichiers de paramétrisations `</romstools_param>`, `</param.h>`. Puis de faire tourner le script `</make_grid.m>` qui nous a donné la carte bathymétrique.

2.3.2 Etape 2 : Condition initiales et forçages

Scripts matlab `</make_forcing.m>`, `</make_clim.m>`.

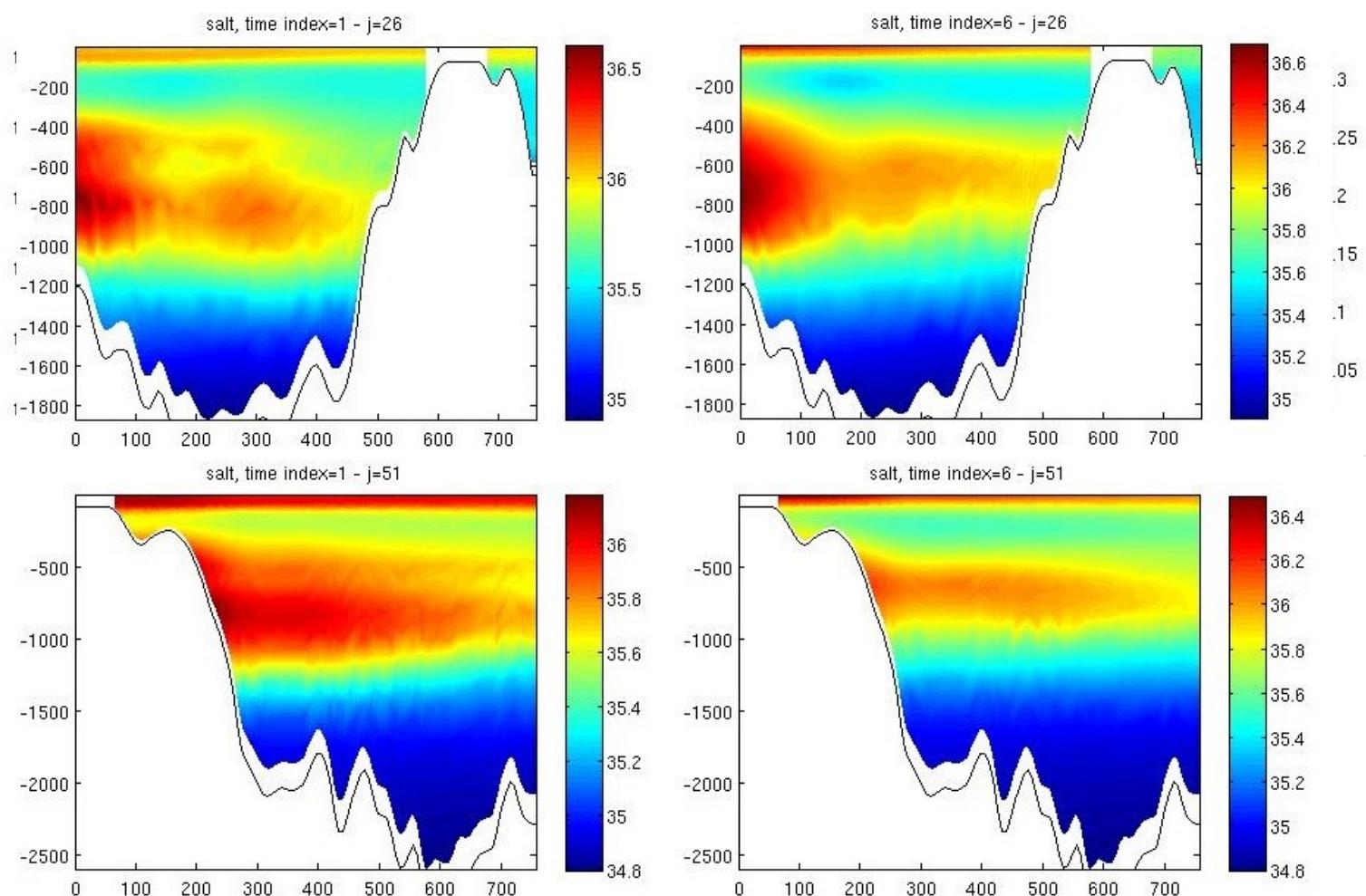


Figure 3 : les conditions initiale de salinité à deux régions du bassin à deux index de temps différents

Une fois la grille mise en place, les forçages, les conditions initiales et aux frontières doivent être fournis au modèle grâce à l'exécution des scripts `</make_forcing.m>` et `</make_clim.m>`. Afin de calculer les différents forçages. La figure 3 représente les conditions initiales de salinité extraites WOA09 (WORLD OCEAN ATLAS 2009) et sont réutiliser chaque année de la simulation. On remarque déjà une forte saisonnalité dans les conditions initiales. En ce qui concerne le vent on remarque clairement une saisonnalité avec des vents carrément aux antipodes l'un de l'autre selon la période.

2.3.3 Etape 3 Critères temporels :

Scripts matlab </ad_cfl.m>

Le respect du critère CFL était un paramètre primordial dans le choix du pas de temps. Après calcul à l'aide du script </ad_cfl.m> qui calcul les différents paramètres (Tableau 2) Les paramètres temporels sont entrés dans le modèle via les fichiers roms.in, </roms_inter.in> et </run_roms.csh>.

Tableau 2: tableau récapitulatif des paramètres temporels calculés

Paramètres de la grille	LLm	MMm	NAVG
	104	76	360
Paramètres temporels	NTDFAST	NTIMES	Dt DTE
	60	3600	720 12

Une dernière modification doit être effectuée sur les fichiers </param.h> et </cppdefs.h> pour entrer les résultats présentées dans le tableau 2 ainsi que de s'assurer de la condition des frontières. Après cela la compilation du modèle se fait via le Cluster du MOI à l'aide de l'instruction </ ./jobcomp>. Suite à cela une vérification des paramètres est nécessaire avant d'utiliser la commande </qsub qsub_run_roms.sh> pour une simulation pluriannuelle.

3 Résultats et discussions

3.1 Stabilité du modèle

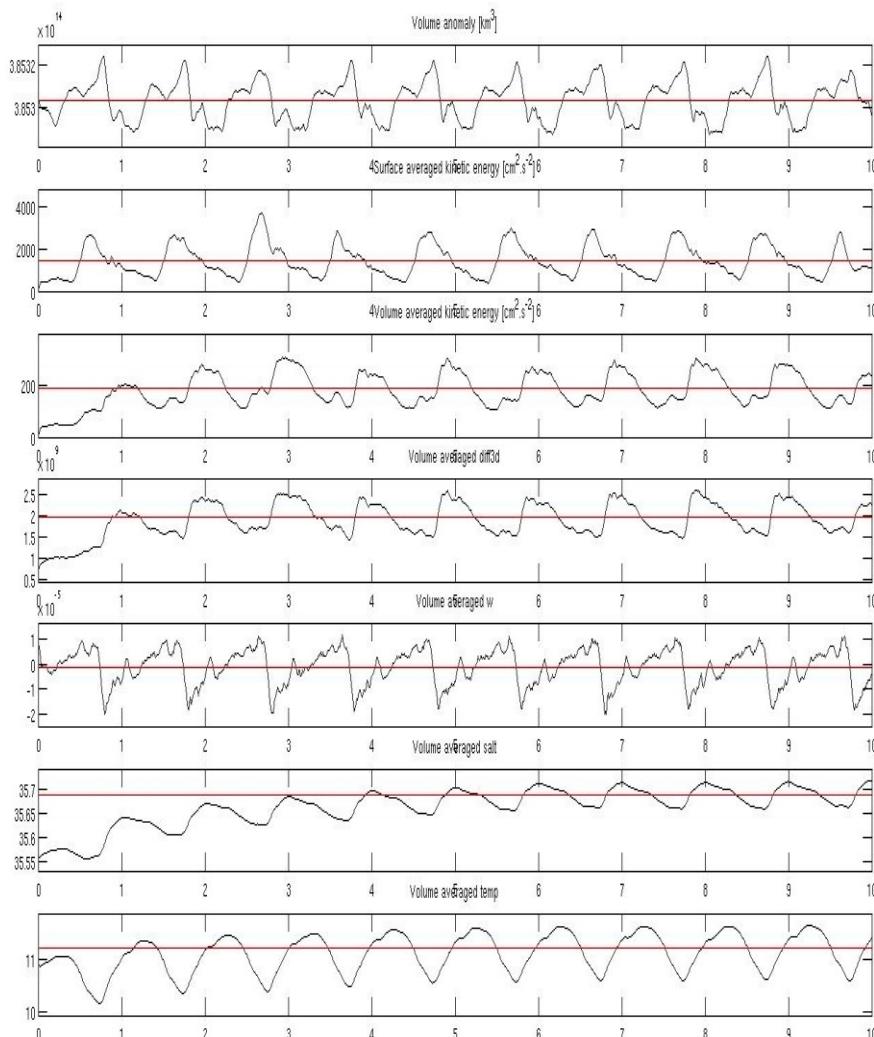


Figure 4 : diagnostique de la simulation

Le script </roms_diags.m> génère différents graphes permettant de suivre la stabilité du modèle. Pour notre cas on remarque une stabilisation après l'année 4 ce qui m'a mener à baser mes interprétations sur les années 6 et 7.

3.2 Structure horizontale de la vitesse de surface

L'observation des élévations de surfaces et leurs évolutions durant l'année révèlent quelques points intéressants. En période de transition des vents (inversement la mousson) on remarque l'apparition d'une intrusion d'eau en provenance de la mer d'Arabie, confirmé par les données de Bower et al., 2000, Fratantoni et al., 2006). On voit également un dénivelé moins marqué au centre du bassin. Ces deux tourbillons d'été apparaissent tous les étés et début d'automne. La partie ouest quant à elle est relativement basse. Durant toute la mousson d'hiver, ces anticyclones s'entre-chevêtrent avec des cyclones pour former en moyenne 5 anticyclones forts durant la saison ce qui semble être dans les normales décrites par (Bower et Furey ,2011). Au fur et à mesure du temps ces anomalies d'élévation se déplacent de plus en plus profondeur dans le golfe (vers l'ouest) et ce jusqu'à la transition des vents de moussons ayant lieu en mai.

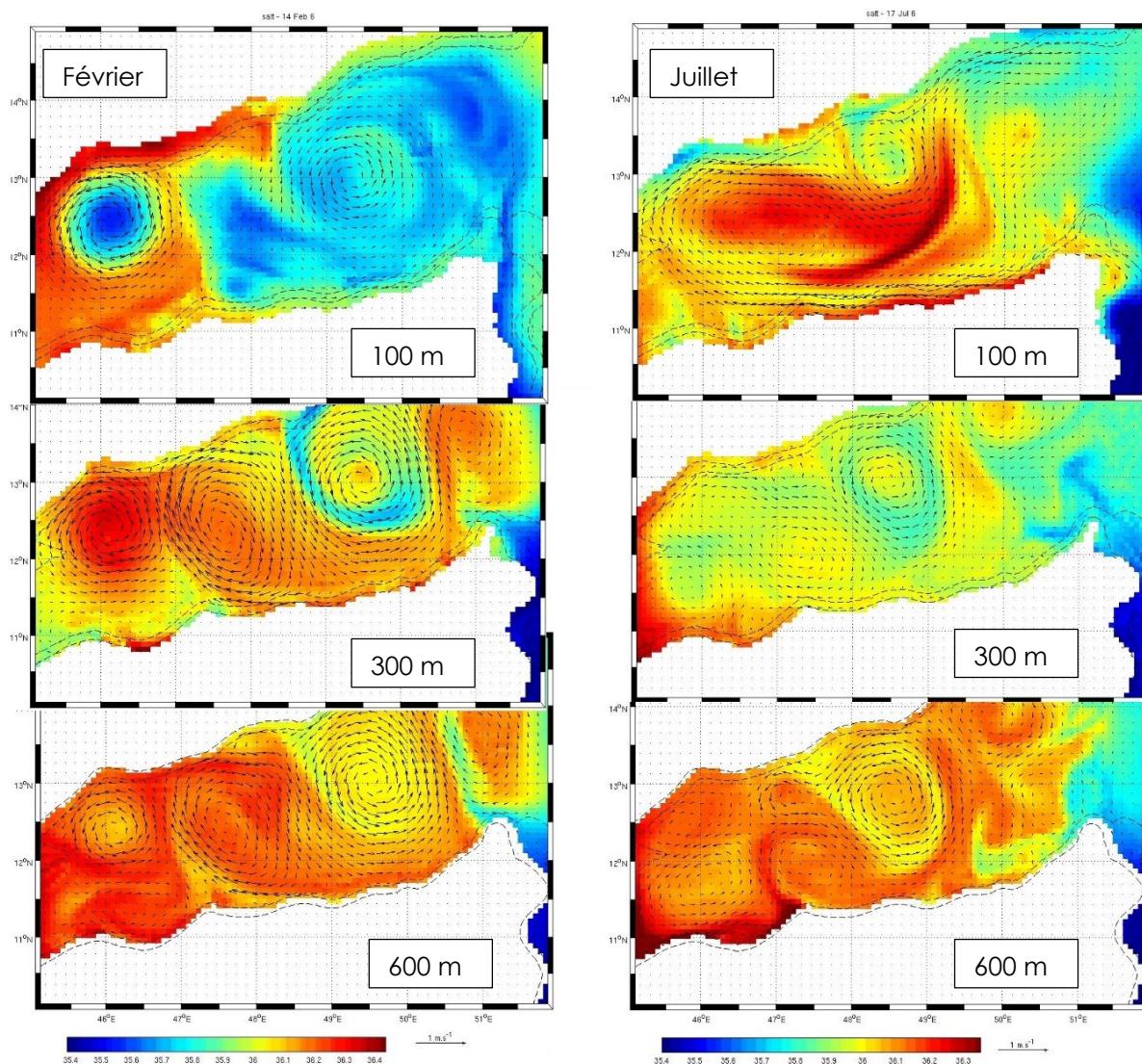


Figure 5: vecteurs des courants et vitesse (I) février au profondeurs de (a) 100m,(b)300m,(c)600m.et en (II) juillet. Avec des surfaces de salinité

Durant le mois de mai la propagation occidentale de ces anomalies diminue fortement et les tourbillons s'estompent au fur et à mesure du temps. A l'ouest, les anomalies positives et négatives d'élévation persistent pendant cette période de temps. En Juin et Juillet (de

mousson d'été), une zone de faible élévation (dépression) se développe et s'approfondit le long de la côte est de la Somalie, à travers le Passage Socotra et à l'entrée du Golfe en raison de la remontée de l'eau plus froide associée à l'apparition de la mousson d'été (Schott et McCreary, 2001).

3.3 Structure verticale de la vitesse

Les anomalies d'élévation de surface positifs et négatifs fréquemment observés dans le GOA centrale et orientale avec des amplitudes ± 30 sont associés à des variations de 100 m dans la profondeur de la thermocline principale et des courants anticyclonique et cycloniques qui se prolongent en profondeur dans la colonne d'eau (**Figure 6:**). La plupart des tourbillons observés étaient en surface renforcée avec des vitesses azimutales élevées.

Ces tourbillons dominent la propagation des RSOW et aident au mélange. Le golfe transporte souvent un noyau d'eau fraîche de la mer d'Oman jusqu'à l'extrémité ouest. Cela génère des gradients verticaux et horizontaux de la température et de la salinité, mettant en place des conditions favorables pour la convection diffusive du sel.

De plus petit anticyclonique et tourbillons cycloniques (diamètre de 100 km ou moins) existent également dans le golfe, en particulier dans l'ouest du golfe (Figure 5). Ces tourbillons sont trop petits pour être résolus avec l'altimétrie par satellite, il donc assez difficile de les confirmées avec la littérature sur la zone, cependant ils semblerent bien présent dans l'étude de Bower et Furey., (2012) qui soutiennent que bien que leurs tailles soit moindre ils dominent la diffusion de RSOW récemment équilibrée dans l'ouest du golfe. Certains semblent être ce qui reste des grands tourbillons qui ont été clivés en petits tourbillons par la forte topographie du Tadjura Rift.

Justement les plus fortes salinités au niveau des RSOW ont été observés dans le Tadjura Rift et dans le sud-ouest du golfe, ce qui indique une voie d'étalement se fisaant en entourant les cyclones (Figure 6) les enveloppant tout au long du golfe. Ces tourbillons ayant généralement des salinités beaucoup plus faibles dans leurs noyaux surtout dans l'ouest du golfe. ce qui génère des gradients exceptionnellement élevés de propriété latérale et verticale qui suggère un mélange rapide de l'RSOW . cette dynamique est relativement en accord avec l'estimation de Ilicak et al. (2011).

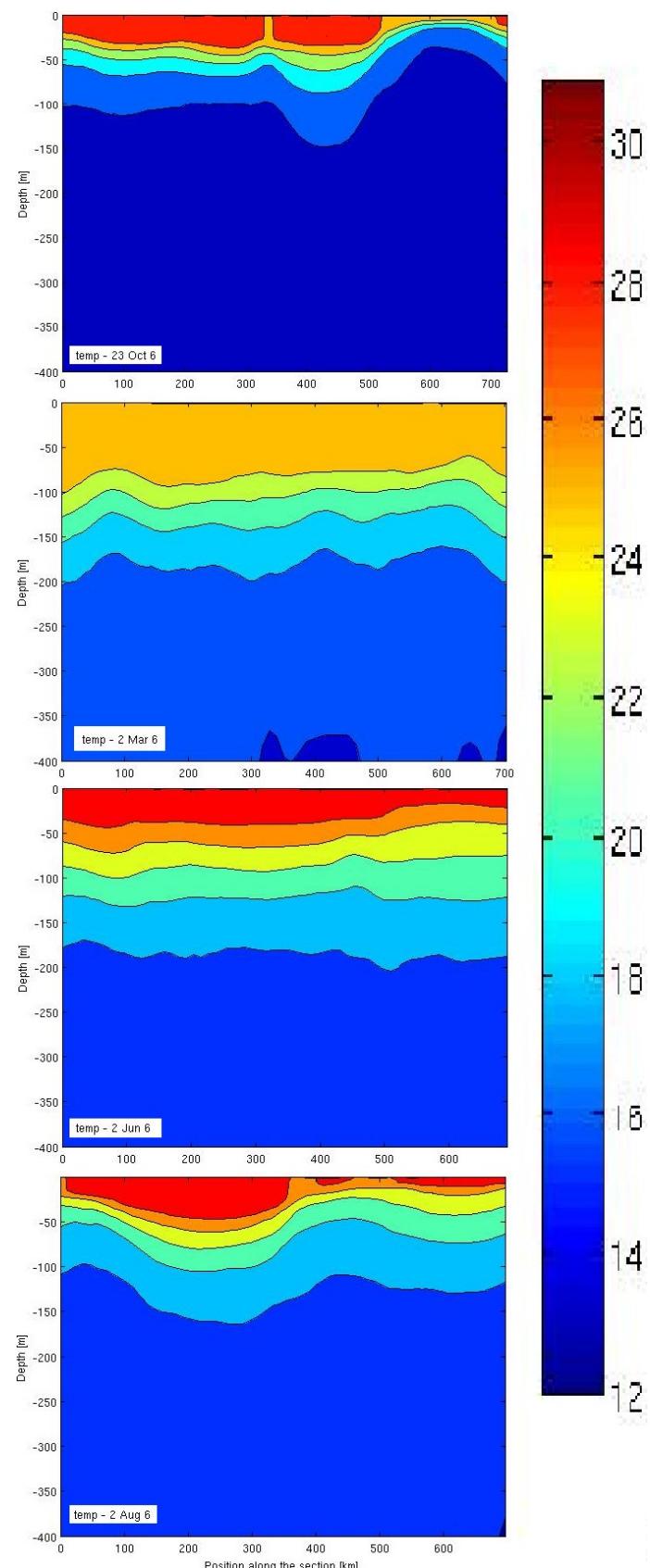


Figure 6: section verticale de la température au long du bassin sur les 400 premiers m de profondeur à différentes périodes. (a) Octobre, (b) Mars, (c) juin, (d) Aout.

3.4 Cycle annuel et saisonnalité

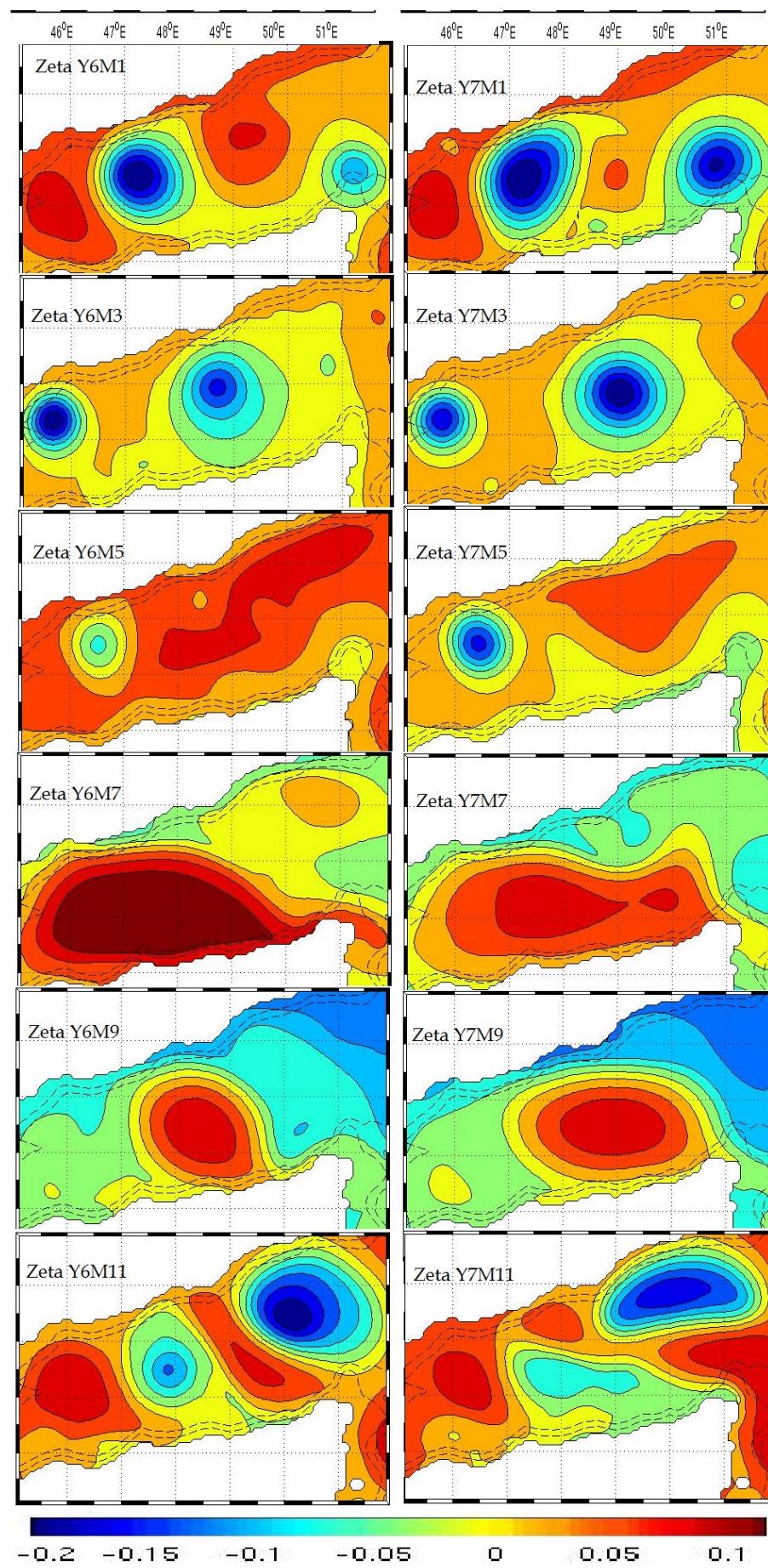
La figure montre que les séquences de grands tourbillons observés dans le GOA sont plus ou moins répétées chaque année avec des variations mineures. Présentant ainsi un comportement cyclique annuel dans l'apparition, la propagation et la disparition des anomalies importantes dans la mer d'Arabie occidentale et le GOA.

L'anomalie positive qui apparaît presque chaque année à environ 52E (la longitude du Socotra Passage), entre Octobre et Janvier (Fratantoni et al., 2006), commence sa propagation vers l'ouest et dérive vers l'ouest (5 mois), 47E. Également, l'apparition du GAE (Prasad et Ikeda, 2001), dans la plage de longitude 50-57E, qui commence à intensifier en Mars-Avril de chaque année et atteint une amplitude maximale en mai. À l'opposé de la SCR, il ne se propage pas vers l'ouest dans le golfe dans son ensemble. Au contraire, il reste relativement stationnaire jusqu'à 2 mois (Prasad et Ikeda, 2001). L'apparition de la GAE est parfois précédée d'une ou plusieurs caractéristiques qui semblent caler et former le GAE ouest-propagation.

Dans la plupart des années, l'élévation de surface maximale du GAE semble déplacer lentement vers l'est à travers l'été, pour être remplacé à l'entrée du Golfe par une anomalie négative d'élévation de surface en développement, comme décrit par Al Saafani et al. (2007).

Les travaux de Bower., (2012) ont montré que le SCR et GAE apparaissent dans le GOA plus ou moins chaque année en même temps, et que le SCR se propage vers l'ouest dans l'GOA tandis que le GAE reste stationnaire. Ils ajoutent également des tourbillons d'été et d'hiver aux phénomènes de la méso-échelle qui apparaissent chaque année, à savoir le Eddy Summer (SE) et le Lee Eddy (LE). Ces deux tourbillons forment au début de la mousson d'été, la tension du vent et de la hausse thermocline à l'entrée du golfe divisent le GAE en deux petits tourbillons anticycloniques. Le SE se propage vers l'ouest dans le GOA, le renforcement souvent comme il se déplace vers l'ouest.

La concordance entre le modèle et la littérature en ce qui concerne la cyclicité reste cependant très difficile à interpréter et il serait dangereux de succomber à la tentation de l'extrapolation abusive. En effet la cyclicité des tourbillons du GOA et de la mer d'Arabie bien que ayant fait l'objet de beaucoup d'étude. Souffre d'un manque de donnée in situ flagrant causé entre autre par l'instabilité de la région et donc la difficulté de récolter des données. A ce titre la modélisation peut sembler être un outil idéal pour approfondir nos connaissances sur les processus contrôlant la circulation en place et sa saisonnalité. Mais à cet effet, il est nécessaire de s'approfondir sur le modèle en question et de bien tester ces limites.



4 Conclusion

Le modèle ROMS donne une relativement bonne description de la circulation océanique des tourbillons du GOA, leurs origines et relation avec d'autre phénomènes de la méso échelle n'a pas été précédemment documenté, bien que Fratantoni et al. (2006) a brièvement noté la réapparition d'un tourbillon dans six septembre consécutifs en altimétrie à environ 48E. D'où l'intérêt de faire une simulation à très hautes résolution avec des conditions initiales de climatologies plus récentes et précises. Afin d'étudier plus en détails la multitude d'interactions de ces tourbillons et leurs devenirs précis. Ceci permettra également de pouvoir inclure la zone de bab el Mendeb (pas très large nécessite donc un maillage fin) dont l'overflow est supposée être le catalyseur de la circulation dans cette zone. Le modèle montre cependant quelques limites dans la partie orientale de la GAE, où les tourbillons subsistent plus longtemps que ce que la littérature semble indiquer. Il paraît nécessaire de prendre cette information avec précaution sachant qu'il n'existe que très peu de données in situ sur ce point.

5 Références bibliographiques

- AL SAAFANI, M. A., SHENOI, S. S. C., SHANKAR, D., et al. Westward movement of eddies into the Gulf of Aden from the Arabian Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2007, vol. 112, no C11.
- BEAL, Lisa M., FFIELD, Amy, et GORDON, Arnold L. Spreading of Red Sea overflow waters in the Indian Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2000, vol. 105, no C4, p. 8549-8564.
- BOWER, Amy S. et FUREY, Heather H. Mesoscale eddies in the Gulf of Aden and their impact on the spreading of Red Sea Outflow Water. *Progress in Oceanography*, 2012, vol. 96, no 1, p. 14-39.
- BOWER, Amy S., FRATANTONI, David M., JOHNS, William E., et al. Gulf of Aden eddies and their impact on Red Sea Water. *Geophysical Research Letters*, 2002, vol. 29, no 21.
- BOWER, Amy S., HUNT, Heather D., et PRICE, James F. Character and dynamics of the Red Sea and Persian Gulf outflows. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2000, vol. 105, no C3, p. 6387-6414.
- FRATANTONI, David M., BOWER, Amy S., JOHNS, William E., et al. Somali Current rings in the eastern Gulf of Aden. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2006, vol. 111, no C9.
- ILICAK, Mehmet, ÖZGÖKMEN, Tamay M., et JOHNS, William E. How does the Red Sea outflow water interact with Gulf of Aden Eddies?. *Ocean Modelling*, 2011, vol. 36, no 1, p. 133-148.
- MORCOS, Selim A. Physical and chemical oceanography of the Red Sea. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, 1970, vol. 8, p. 73-202.
- Myroms.org. (2016). ROMS> start. [online] Available at: <https://www.myroms.org/> [Accessed 16 May 2016].
- PRASAD, T. G. et IKEDA, M. Spring evolution of Arabian Sea High in the Indian Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2001, vol. 106, no C12, p. 31085-31098.
- PRASAD, T. G., IKEDA, M., et KUMAR, S. Prasanna. Seasonal spreading of the Persian Gulf Water mass in the Arabian Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2001, vol. 106, no C8, p. 17059-17071.
- SCHOTT, Friedrich A. et MCCREARY, Julian P. The monsoon circulation of the Indian Ocean. *Progress in Oceanography*, 2001, vol. 51, no 1, p. 1-123.
- SIEDLER, Gerold. Die Häufigkeitsverteilung von Wasserarten im Ausstrombereich von Meeresträßen. *Kieler Meeresforschungen*, 1968, vol. 24, no 2, p. 59-65.
- WYRTKI, Klaus. Oceanographic atlas of the international Indian Ocean expedition. 1971.