

Introduction à ROMS

Etude du Golfe d'Aden

Jeanne CASTILLE

13/05/2016

SOMMAIRE

Résumé	3
<i>Abstract</i>	3
I. INTRODUCTION	4
II. MATERIELS ET METHODES.....	4
➤ Les équations	4
➤ Les hypothèses.....	5
➤ Configuration du modèle	6
III. RESULTATS ET DISCUSSION	8
➤ Stabilité du modèle	8
➤ Circulation océanique dans le Golfe d'Aden.....	8
IV. CONCLUSION	11
Références	11

RESUME

La modélisation des courants océaniques s'est considérablement développée avec l'apparition d'outils mathématiques et informatiques de plus en plus performants capables de résoudre les principales équations de la dynamique des fluides. Différents modèles de modélisation océanique existent comme POM ou SYMPHONIE. Dans cette étude, le modèle utilisé est ROMS (Regional Ocean Modeling System) mis au point par des chercheurs de l'IRD et de l'INRIA (version française). Pour fonctionner, le modèle a besoin de conditions initiales (fournies par des atlas mondiaux de qualité tel qu'ICOADS pour les forçages de surface et WOA pour la température et la salinité), les équations dynamiques du mouvement ainsi que les forçages. L'utilisateur du modèle peut également définir une zone d'étude et ajouter des conditions aux frontières (élévation de la surface, tension de surface due au vent, flux de chaleur, bilan de salinité...). Le modèle a été adapté à la bande d'eau entre la Somalie et le Yémen : le Golfe d'Aden. Celui-ci possède une étroite connexion à la Mer Rouge au travers du détroit de Bab el Mandeb au nord-ouest et une large ouverture à la Mer d'Arabie à l'est.

ABSTRACT

Modeling of ocean currents has significantly expanded with the emergence of mathematical and computational tools more efficient which are able to solve the main equations of fluid dynamics. Different models of ocean modeling exist as POM or SYMPHONIE. In this study, the model used is ROM (Regional Ocean Modeling System) developed by IRD and INRIA researchers (French version). To function, the model needs initial conditions (data supplied by world atlas quality as ICOADS for surface forcing and WOA for temperature and salinity), the equations of movement and forcing. The model user can also define a study area and add the boundary conditions (surface elevation, surface tension due to the wind, heat flux and salt balance). The model was adapted to the strip of water between Somalia and Yemen : The Aden Gulf. This one has a narrow connection to the Red Sea through the Strait of Bab el Mandeb in the northwest and a wide opening to the Arabian Sea in the east.

I. INTRODUCTION

Pour mieux comprendre les processus physiques et biogéochimiques de l'océan, la modélisation océanique reste un des outils les plus puissants notamment grâce à l'évolution de l'informatique, qui a permis d'optimiser le coût et la puissance de calcul. En effet, utilisés sur une zone océanique précise, les modèles permettent de prédire de façon plus ou moins réaliste l'évolution du comportement des paramètres biogéochimiques ou physiques de la zone d'étude.

L'objectif de l'étude, illustrée par ce rapport, est d'implémenter le modèle de circulation océanique régional réaliste ROMS (Regional Oceanic Modeling System) sur la zone du Golfe d'Aden. La version utilisée pour réaliser la simulation de ce rapport est la version française développée par l'IRD et l'INRIA, ROMS_AGRIF [<http://www.romsagrif.org/>].

Les modèles de haute résolution ont montré l'existence d'un upwelling de grande-échelle durant la mousson de sud-ouest, c'est-à-dire durant l'été, qui serait responsable de l'intrusion d'eau intermédiaire du Golfe d'Aden dans la Mer Rouge en hiver. C'est à cette circulation que nous nous intéresserons ainsi qu'à ses variations saisonnières.

II. MATERIELS ET METHODES

➤ Les équations

La dynamique océanique du Golfe d'Aden a été modélisée grâce au modèle ROMS appliqué à cette région. Celui-ci résout les équations de Navier-Stokes, couplées aux équations de conservation de la chaleur et de la salinité, à l'équation de continuité ainsi qu'à l'équation d'état de l'eau de mer.

Les équations du mouvement (N-S) :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + U \cdot \nabla u = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + f v + A_h \nabla_h^2 u + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + U \cdot \nabla v = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} - f u + A_h \nabla_h^2 v + A_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (2)$$

Les équations de conservation de la chaleur et du sel :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U \cdot \nabla T = A_h \nabla_h^2 T + A_v \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{Q_c}{\rho C_p} \frac{\partial}{\partial z} \quad (3)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + U \cdot \nabla S = A_h \nabla_h^2 S + A_v \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \quad (4)$$

L'équation de continuité :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

L'équation d'état de l'eau de mer :

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

Avec, u et v les vitesses horizontales, T la température, S la salinité, P la pression, ρ et ρ_0 la masse volumique et la masse volumique à la pression atmosphérique, A_h et A_v les coefficients de viscosité horizontaux et verticaux, Q_c le flux de chaleur incidente, I l'incidence, C_p le coefficient de chaleur massique et f la force de Coriolis.

➤ Les hypothèses

Néanmoins, leur formulation dans le modèle va dépendre de diverses hypothèses, simplifications et méthodes de calculs, telles que :

- **L'approximation hydrostatique** : le mouvement vertical se réduit à l'équilibre entre la force de pression et de pesanteur, c'est-à-dire que la pression en un point est égale au poids de la colonne d'eau au-dessus ; $\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} = g$
- **Hypothèse d'incompressibilité** : la masse volumique ne varie pas en suivant une particule
- **L'approximation de Boussinesq** : la masse volumique de l'eau est considérée comme constante du fait de variations négligeables dans l'océan global;
- **La fermeture de la turbulence de Reynolds** : le flux de quantité de mouvement est dû à la turbulence (proportionnel au cisaillement de la vitesse), faisant apparaître des termes turbulents dans les équations de Navier-Stokes alors appelées équations de Reynolds-Average Navier-Stokes (RANS equations).
- **Proposition de Boussinesq** : permet de relier les tensions de Reynolds aux composantes du gradient des vitesses moyennes en faisant apparaître les coefficients d'échange turbulent A_x, A_y, A_z égaux entre eux.

Dans le modèle ROMS, les coefficients horizontaux peuvent être estimés grâce à la formule de Smagorinski (1963) ou être choisis constants. Ces coefficients verticaux sont déterminés par l'approche de Large et al. (1994) dite à K-profil et les coefficients horizontaux sont calculés avec l'approche de Smagorinski (1963).

Ces approximations permettent d'obtenir les équations primitives dont la discrétisation spatiale pour l'horizontale se fait selon une grille d'Arakawa C. Pour la verticale, la discrétisation se fait selon les coordonnées sigma qui suivent la topographie et dont les avantages d'utilisation sont une fidélité au relief et une couche limite de fond bien résolue.

La discrétisation temporelle se fait selon la méthode dite du «time-splitting» c'est à dire une séparation du pas de temps. Cette méthode permet d'économiser du temps de calcul et consiste à effectuer les calculs à un pas de temps rapide qui sert au calcul 2D en mode barotrope et un pas de temps lent qui sert au calcul en 3D en mode barocline.

➤ Configuration du modèle

En premier lieu, les coordonnées de la zone d'étude ont été paramétrées dans le fichier *romstools_param.m* ainsi que les conditions aux frontières et la résolution de la grille (Tab. 1).

La résolution de la grille a été prise à $1/20^\circ$. Avec cette résolution, le nombre de mailles total est de 154 280 ce qui est légèrement supérieur à l'ordre de 10^5 préconisé mais le temps de calcul reste convenable. La résolution de la grille est bien adaptée à la zone étudiée étant donné sa petitesse.

Tableau 1 : Paramètres du modèle

Paramètre	Valeur
Longitude min – max	40,8°E – 51°E
Latitude min – max	10,1°N – 14,4°N
Résolution R de la grille	1/20
LLm – MMm – N	203 – 40 – 32
Frontières ouvertes [S E N W]	[0 1 1 0]
NTIMES – dt (s) – NDTFAST	720 – 3600 – 60

LLm, MMm et N (Tab.1) correspondent au nombre de mailles dans les 3 directions, respectivement x, y et z. La largeur des mailles sur la latitude et la longitude est donnée par un «dx» et un «dy» qui ne sont pas constants sur l'ensemble de la grille et varient entre une valeur minimum (29km) et une valeur maximum (33km). De plus, les frontières de la zone sont ouvertes aux bords Nord et Sud.

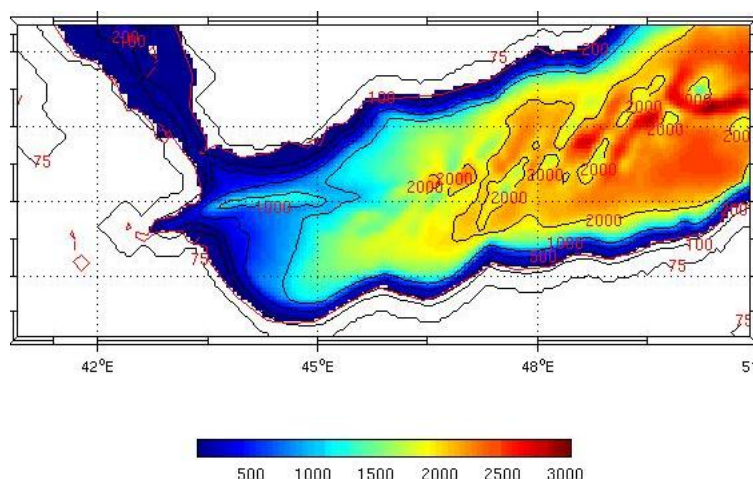


Figure 1 : Carte bathymétrique du Golfe d'Aden (en rouge sont dessinées les lignes d'iso-valeurs de profondeur), tirée de la simulation avec ROMS.

Pour finir, NTIMES correspond au nombre d'itérations, dt est le pas temporel en seconde correspondant au pas de temps 3D (boucle lente) et NDTFAST le pas de temps 2D (paramètre donnant le ratio entre les boucles du pas 2D et 3D).

Ces deux derniers paramètres ont été calculés pour être adaptés à notre grille, à sa résolution ainsi qu'au temps de simulation grâce au fichier *ad_cfl.m*. Celui-ci se base sur le critère CFL (Courant Friedrichs Levy) permettant de lier la résolution spatiale et temporelle pour éviter qu'un processus ne se propage de plus d'une maille à chaque pas de temps (Tab. 1). En général le pas spatial est déterminé en premier puis le pas de temps est calculé en utilisant la bathymétrie maximale du domaine de la façon suivante :

$$\Delta t \leq \frac{1}{\sqrt{gh}} \left[\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right]^{-\frac{1}{2}}$$

Le pas de temps et le pas d'espace sont donc reliés par la vitesse de propagation de l'évènement noté \sqrt{gh} dans l'équation (6). L'augmentation de la résolution spatiale et temporelle est ainsi liée et tend vers une augmentation du coût de calcul.

L'utilisateur peut ensuite lancer des simulations annuelles ou pluriannuelles en changeant la durée de simulation (NTIMES) et la fréquence de sauvegarde des sorties instantanées et moyennées (NWRT et NAVG). Pour ce rapport, la durée de simulation a été fixée 12 mois comprenant 30 jours et sur 10 ans. La fréquence de sauvegarde des sorties moyennées est de 3 jours.

III. RESULTATS ET DISCUSSION

➤ Stabilité du modèle

Le diagnostic des paramètres moyennés permet de déterminer le moment à partir duquel le modèle est stabilisé. Ainsi le modèle est considéré comme stable si après une légère variation d'un paramètre, celui ci va tendre vers sa valeur moyenne d'équilibre. Les variables diagnostiques ont été générées (Fig. 2) grâce aux fichiers *roms_diag.m* et *plot_diags.m*. La salinité moyennée sur le volume montre une évolution jusqu'à la 6^{ème} année avant de présenter des variations concentrées autour de la valeur moyenne du paramètre jusqu'à la fin de la simulation. Ainsi il sera considéré que le modèle est stable à partir de la 6^{ème} année de simulation (dans ce rapport l'année 8 a été sélectionnée).

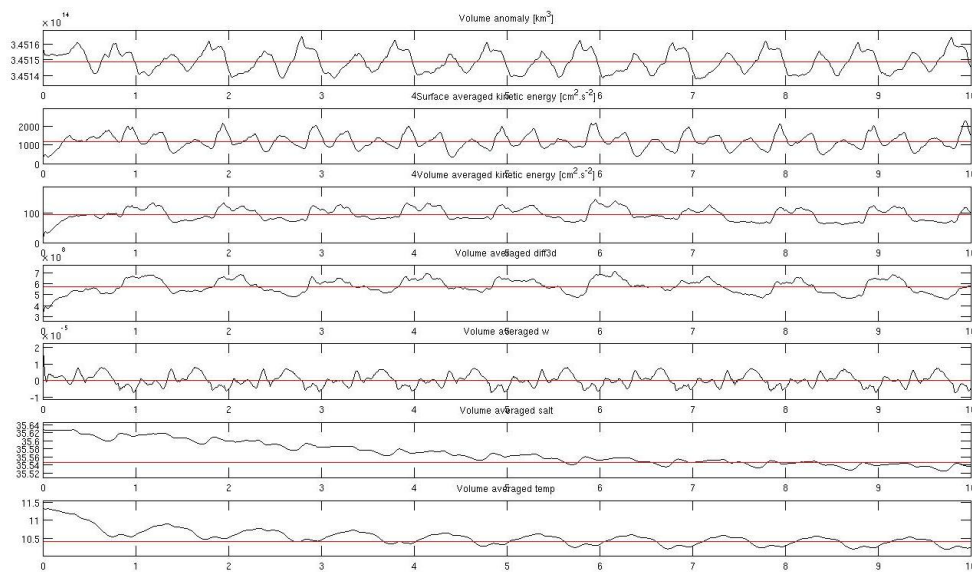


Figure 2 : Diagnostic de la stabilité du modèle. De haut en bas : (a) Volume total, (b) Energie cinétique moyenne en surface, (c) Energie cinétique moyennée sur le volume, (d) Moyenne volumique diff3d, (e) Moyenne volumique w, (f) Salinité moyennée sur le volume, (g) Température moyennée sur le volume.

➤ Circulation océanique dans le Golfe d'Aden

Yao et al (2014) décrit une circulation dans le bassin qui se caractérise par une variabilité saisonnière de la direction des courants. En effet, le vent de surface dans le Golfe d'Aden est influencé par la mousson indienne qui s'inverse en été dans la direction sud-ouest, et en hiver dans la direction nord-est (Fig.3).

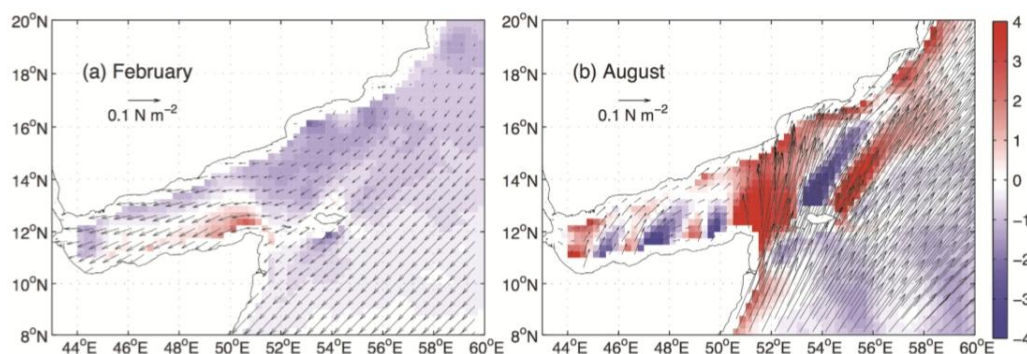


Figure 3 : Forçage du vent dans le Golfe d'Aden et la Mer d'Arabie en Février (à gauche) et en Août (à droite), d'après Yao et al (2014).

Cela semble résulter en un changement de direction des courants eux-mêmes. Avec un courant sortant de la Mer Rouge (Red Sea outflow) en été, et un courant entrant dans la Mer Rouge (Gulf of Aden Intermediate Water) durant l'hiver.

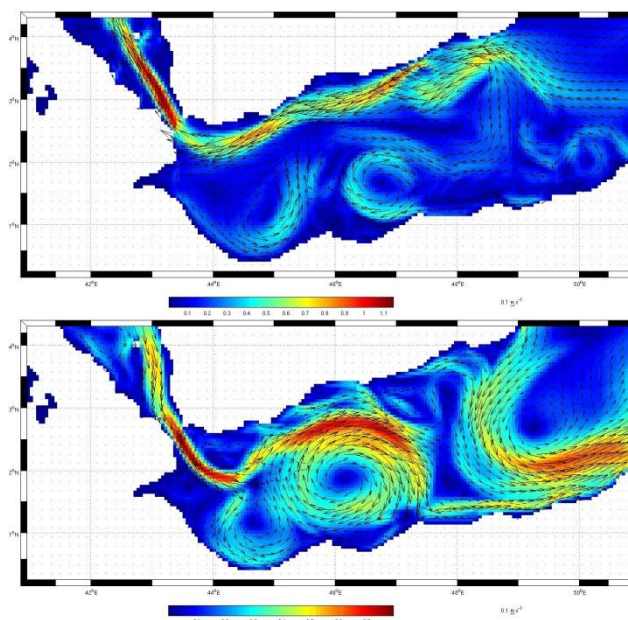


Figure 4 : Vitesse et sens de circulation des courants dans le bassin. En haut : 1^{er} Février (de 0,1 à 1,1 m.s⁻¹), en bas : 2 Août (de 0,1 à 0,7 m.s⁻¹) de l'année 8 de la simulation, obtenus par le modèle ROMS.

De plus, selon Bower et al (2005), le maximum de vitesse de l'eau de la Mer Rouge s'écoulant dans le Golfe d'Aden (jusque dans la Mer d'Arabie) a lieu en hiver à une profondeur intermédiaire de 650m.

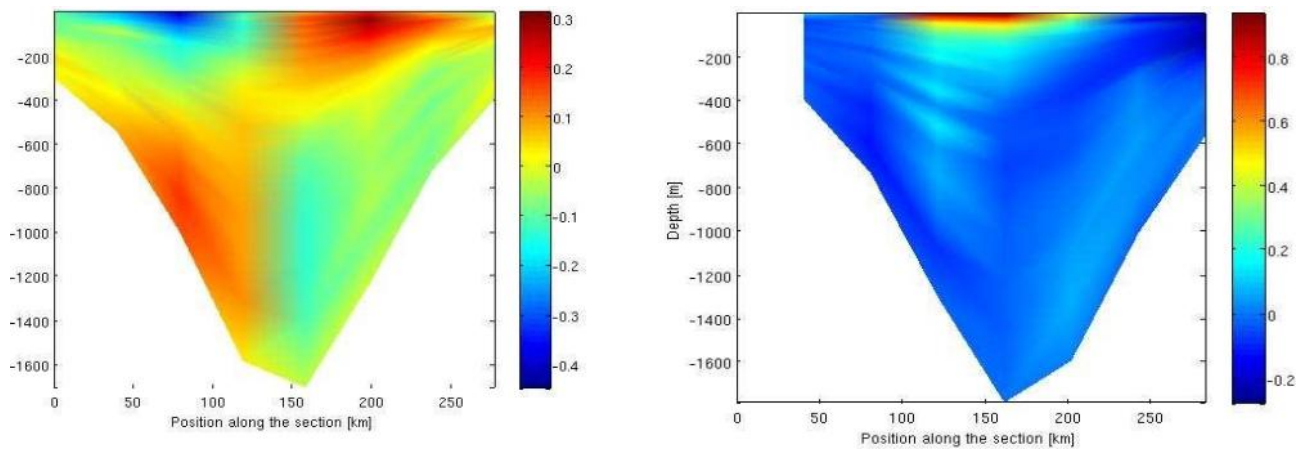


Figure 6 : Section verticale méridionale de vitesse dans le Golfe d'Aden en février (à gauche) et en août (à droite).

Ainsi, on observe un changement de direction du courant durant l'été apparemment dû au changement de direction des vents de mousson. Or, il existe un autre mécanisme en jeu qui serait majoritairement responsable de ce changement de circulation et qui correspond à un upwelling de grande échelle dans le bassin du Golfe d'Aden.

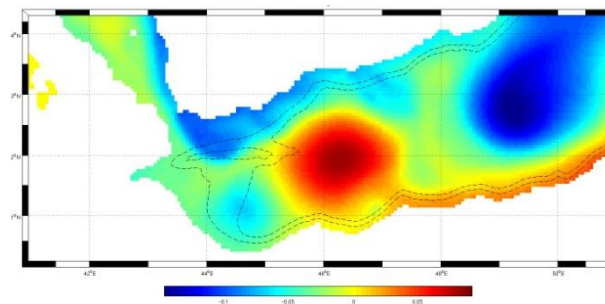


Figure 5 : Carte d'élévation de la surface océanique variant de -0,1 à 0,05 m.

Cet upwelling crée un gradient de pression inverse dans les eaux intermédiaires créant une pente océanique amenant plus tard l'intrusion de la GAIW dans les eaux de la Mer Rouge.

Ainsi, la saisonnalité en termes d'échanges d'eau dans le détroit de Bab el Mandeb a été simulée avec succès et les structures de courant de sub-surface entrant dans la Mer Rouge sont en corrélation avec la littérature.

IV. CONCLUSION

Les paramètres obtenus avec ROMS comparés avec ceux présentés dans la littérature concordent bien. Le modèle semble donc présenter de manière fiable les phénomènes observables dans le Golfe d'Aden. Il a permis de mettre en évidence la présence de l'upwelling de grande échelle. Repérer de telles structures grâce à un modèle peut s'avérer très utile car les upwellings correspondent à une remontée de sels nutritifs des couches profondes permettant un fort développement biologique. Le Golfe d'Aden pourrait donc se comporter comme une importante source de nutriments pour le secteur sud de la Mer Rouge pendant l'intrusion de sub-surface d'hiver.

En conclusion, le modèle ROMS donne de bons résultats pour une simulation appliquée au cas du Golfe d'Aden.

RÉFÉRENCES

Bower AS, W. E. Johns, D. M. Fratantoni, H. Peters. *Equilibration and Circulation of Red Sea Outflow Water in the Western Gulf of Aden*. J. Phys. Oceanogr., 2005, 35, 1963-1985.

Yao F, Hoteit I, Pratt LJ, Bower AS, Zhai P, Gopalakrishnan G, et al. *Seasonal overturning circulation in the Red Sea: 1. Model validation and summer circulation*. Journal of Geophysical Research-Oceans, 2014, 119: 2238-2262