



Aix-Marseille Université  
Institut Méditerranéen d'Océanologie (MIO)  
Master d'Océanographie Physique et Biogéochimique  
OPB 205 - Modélisation de la circulation océanique  
1er année  
Responsable : Dr. DOGLIOLI Andrea

---

## Modélisation et étude de l'upwelling Somalien.

---

Par Susini Michaël  
<susini.michael@laposte.net>

Marseille, Mai 2014

# Table des matières

Résumé : .....	3
Abstract : .....	3
Introduction : .....	4
Matériels et méthodes : .....	4
Equations du modèle : .....	4
Configuration du modèle : .....	5
Choix de la configuration verticale : .....	5
Choix de la configuration temporelle : .....	6
Résultats et discussion : .....	7
Stabilité du modèle : .....	7
La circulation océanique à proximité des côtes Somaliennes : .....	8
Structures de courants obtenus par le modèle : .....	9
Mise en place de l'upwelling : .....	11
Conclusion : .....	12
Bibliographie : .....	13

## Résumé :

La modélisation des courants océaniques s'est considérablement développé 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, SYMPHONIE, dans cette étude le modèle utilisé est ROMS-AGRIF (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, ces données sont fournies par des atlas mondiaux de qualité tel que ICOADS pour les forçages de surface et WOA pour la température et la salinité (établis grâce aux mesures réalisées par des scientifiques ou militaires lors de leurs expéditions en mer). L'utilisateur du modèle peut également définir une zone d'étude (sans aller dans des latitudes trop hautes) et ajouter des conditions aux frontières (élévation de la surface, tension de surface due au vent, flux de chaleur et bilan de salinité...). Le modèle a donc été adapté à la côte Est Africaine et plus particulièrement à la côte Somalienne afin d'étudier un phénomène rare en bord Est : l'upwelling Somalien. Ce phénomène qui entraîne la remontée d'eau froide est facilement observable au Nord-Est de la Somalie et encore plus au Nord de la zone d'étude dans la mer d'Arabie. Roms s'avère donc être un outil efficace pour la détection de telles structures dont l'importance se caractérise par un fort développement biologique.

## Abstract :

Modeling of ocean currents has grown considerably with the emergence of mathematical and computational tools more efficient who solve the main equations of fluid dynamics . Different models of ocean modeling exist as POM, SYMPHONIE , in this study the model is ROMS-AGRIF (Regional Ocean Modeling System) developed by IRD and INRIA researchers ( French version) . To run the model needs initial conditions, these data are supplied by world atlas quality as ICOADS for surface forcings and WOA for temperature and salinity ( established through measurements made by scientists or military in their shipments at sea). The model user can also define a study area (without going into too high latitudes) and add the boundary conditions ( surface elevation , surface tension due to wind , heat flux and salt balance . . . ) . The model was adapted to the East African coast and more particularly to the Somali coast to study a rare phenomenon in East edge : the Somali upwelling . This phenomenon causes the upwelling is easily observable in the North East of Somalia and further north of the study area in the Arabian Sea . So ROMS is an effective tool for detecting such structures whose importance is characterized by a strong biological development.

## Introduction :

La zone d'étude modélisée à l'aide de ROMS s'étend le long des côtes de Somalie en passant par le Kenya, la Tanzanie jusqu'au Mozambique et l'île de Madagascar. Le but est d'étudier l'upwelling observé sur les côtes somaliennes, la zone configurée sur le modèle est large afin d'avoir un bon recul sur le phénomène. L'upwelling Somalien est intéressant à étudier car il est différent des upwellings classiques qui s'observent en bord Ouest. L'enjeu est donc de comprendre comment un tel phénomène peut se produire en bord Est. Pour se faire les sorties du modèle sont comparées et mises en relation avec d'autres études également menées sur cet upwelling.

## Matériels et méthodes :

### ***Equations du modèle :***

Le développement de la modélisation numérique a commencé dans la deuxième moitié du 20ème siècle, il suit le développement des puissants outils de calculs numériques. La modélisation océanographique est cependant plus en retard que la prévision numérique en météorologie qui s'explique par une moins bonne compréhension de la circulation océanique et une demande moins importante.

La dynamique océanique des côtes somaliennes a été modélisée grâce au modèle ROMS appliqué à cette région. Le modèle ROMS résout les équations de Navier-Stokes (1), couplées à des équations de conservation de la chaleur et de la salinité (2)&(3), à l'équation de continuité (4), , ainsi qu'à l'équation d'état de l'eau de mer (5). Les équations primitives du mouvement sont impossibles à résoudre analytiquement jusqu'à aujourd'hui leurs formulations va donc dépendre de diverses hypothèses, simplifications et méthodes de calculs

-Approximation hydrostatique : l'équation du mouvement vertical se réduit à l'équilibre entre la pression et la force de pesanteur.

-Approximation de Boussinesq : la masse volumique de l'eau est considérée constante du fait des ses faibles variations dans l'océan global. Les variations de masse volumique sont considérées uniquement dans le terme de flottabilité.

-La fermeture de la turbulence de Reynolds et l'approche de Boussinesq : la vitesse d'écoulement se résume à la somme d'une vitesse moyenne et d'une perturbation. Cette écriture permet donc de faire apparaître des termes de viscosité turbulente ( $A_x$  ; $A_y$ ;  $A_z$ ). Boussinesq propose de relier ces termes aux composantes du gradient des vitesses moyennes avec un terme d'échange turbulent selon une direction.

-Hypothèse que les coefficients verticaux de viscosité turbulente sont égaux:  $A_x=A_y=A_z$ . Ces coefficients sont calculés par l'approche de Large et al. (1994) dite à K-profil et les coefficients horizontaux sont calculés avec l'approche de Smagorinski.

$$\frac{\delta u}{\delta t} + \vec{U} \nabla u - fv = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\delta P}{\delta x} + A_h \nabla_h^2 u + A_v \frac{\delta^2 u}{\delta z^2} \quad (1)$$

$$\frac{\delta v}{\delta t} + \vec{U} \nabla v - fu = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\delta P}{\delta y} + A_h \nabla_h^2 v + A_v \frac{\delta^2 v}{\delta z^2}$$

$$\frac{\delta T}{\delta t} + \vec{U} \nabla T = A_h \nabla_h^2 T + A_v \frac{\delta^2 u}{\delta z^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} \frac{\delta I}{\delta z} \quad (2)$$

$$\frac{\delta S}{\delta t} + \vec{U} \nabla S = A_h \nabla_h^2 S + A_v \frac{\delta^2 S}{\delta z^2} \quad (3)$$

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

$$\rho = \rho(T, S, z) \quad (5)$$

Ces approximations permettent d'obtenir les équations primitives dont la discrétisation spatiale pour l'horizontale se fait selon une grille d'Arakawa C qui se comporte bien aux fines résolutions spatiales et pour la verticale selon les coordonnées sigma qui suivent la topographie 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 à calcul 2D en mode barotrope et un pas de temps lent qui sert au calcul en 3D en mode barocline.

### **Configuration du modèle :**

#### Choix de la configuration verticale :

Vu la puissance des machines mises à notre disposition, la résolution de la grille est prise à  $\frac{1}{4}$ . Avec cette résolution le nombre de mailles total est de 305 888. Légèrement supérieur au nombre de mailles de l'ordre de  $10^5$  préconisé mais le temps de calcul reste convenable. La résolution de la grille s'adapte bien à la superficie assez importante de la zone étudiée.

Paramètre :	Valeur :
Longitude min (°Est)	38
Longitude max (°Est)	58
Latitude min (°Nord)	-20
Latitude max (°Nord)	10
Résolution de la grille (°)	$\frac{1}{4}$
<del>L1m</del>	79
<del>Mmm</del>	121
Nombre de niveaux verticaux	32

TABLE 1 – Paramètres du modèle.

LLm et MMm (Tab1.) correspondent aux nombres de mailles sur l'horizontale et sur la verticale. 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 et une valeur maximum de l'ordre de la dizaine de kilomètre (20km en moyenne pour la simulation).

Les frontières de la zone sont ouvertes aux 4 bords (Est, Ouest, Nord, Sud). Même si à l'Ouest la quasi totalité du bord soit continentale, la frontière est considérée comme ouverte, une seule maille d'eau sur un bord est suffisante pour dire que ce bord est une frontière ouverte.

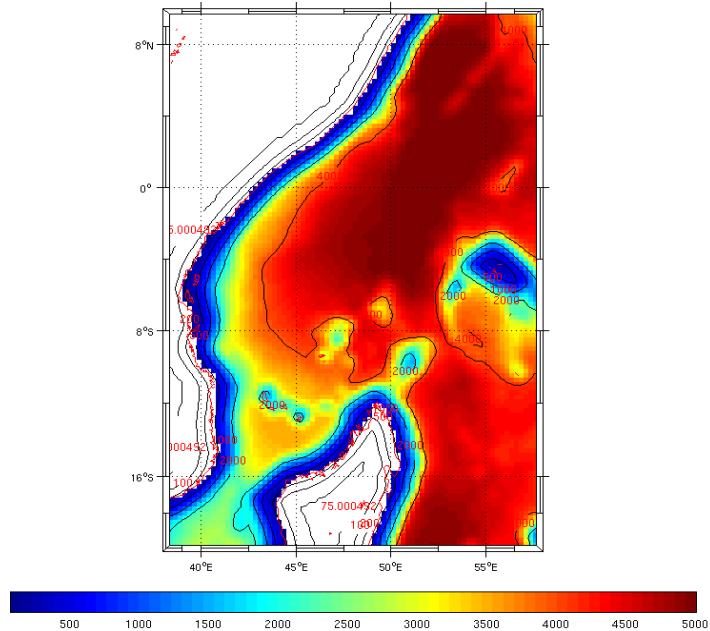


FIGURE 1 – Carte bathymétrique.

Le zref correspond au niveau de non-mouvement pour les conditions frontières, initialement placé à 1000m de profondeur sur le modèle est fixé à 2000m, ce qui permet une meilleure adaptation à la profondeur maximum de 5000m.

### Choix de la configuration temporelle :

Le programme Matlab « ad\_CFL.m » permet de calculer les critère CFL à partir de la profondeur maximum de dx et de dy. Selon la formule suivante :

$$\Delta t \leq \frac{1}{c} \left[ \frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (6)$$

Le critère de stabilité CFL (Courant Friedrichs Levy) (6) lie la résolution spatiale et la résolution temporelle afin d'éviter qu'une onde ou un courant par exemple

ne se propagent pas de plus d'une maille pour chaque pas de temps. le pas de temps et le pas d'espace sont donc reliés par la vitesse de propagation de l'évènement noté  $c$  dans l'équation (6). l'augmentation de la résolution spatiale et temporelle est ainsi liée et tend vers une augmentation du coût de calcul.

Time stepping :	Valeur :
NTIMES	1080
dt(sec)	2400
NDTFAST	60

TABLE 2 - Configuration temporelle

Pour lancer la simulation il est nécessaire de calculer des pas de temps internes (Dt) et externes (NDTFAST), adaptés à la grille (NTIMES : nombre de boucles internes pour parcourir toute la zone pendant la durée de simulation), à sa résolution mais aussi au temps de simulation et au temps de calcul désiré. Ces deux paramètres sont déterminés sur la base du critère CFL (6).

Il est ensuite possible de lancer des simulations annuelles ou pluriannuelles dans le cas de l'étude la durée de simulation a été fixée à 12 mois de 30 jours pendant 10 ans. La fréquence de sauvegarde des sorties moyennées est de 3 jours.

## Résultats et discussion :

### Stabilité du modèle :

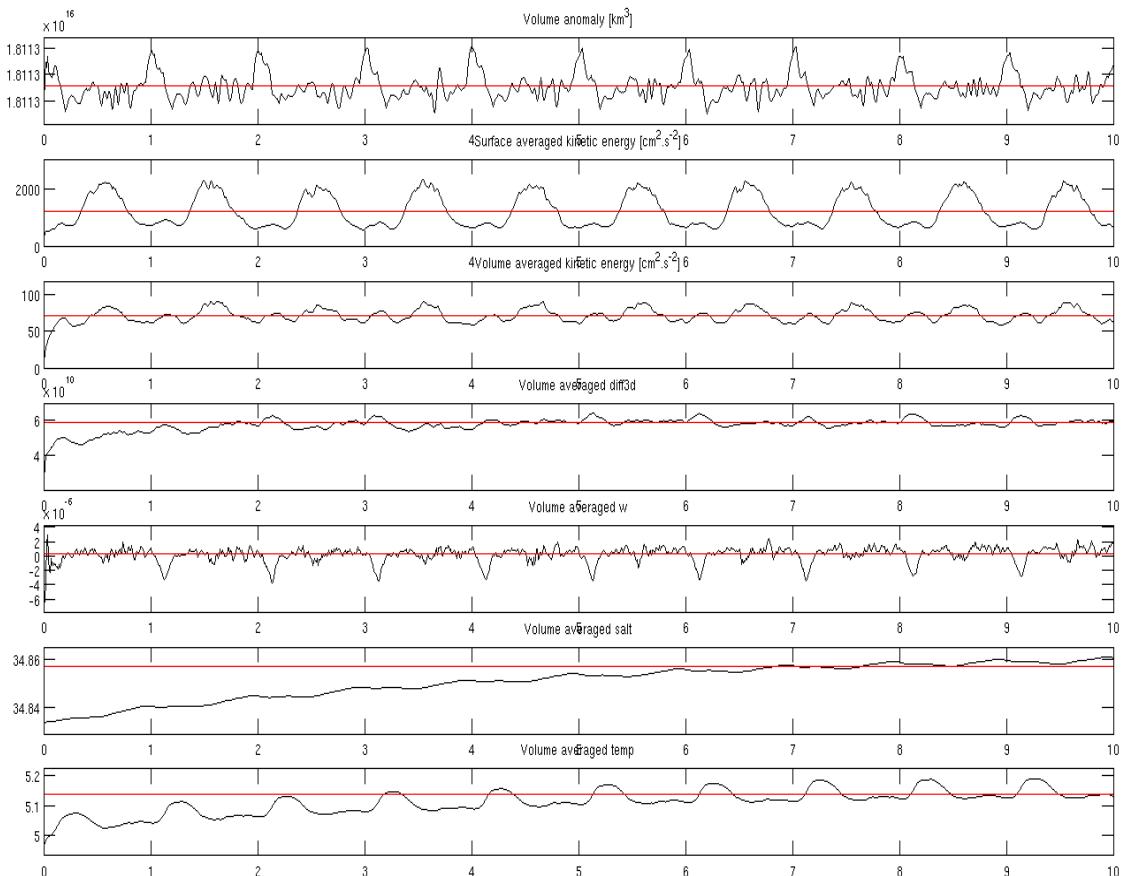


FIGURE 2 - Stabilité du modèle sur 10ans.

Le script « roms\_diags.m » et le « script plot\_diags.m » , ont généré différents graphes (Fig2.) sur les 10 ans de simulation ce qui permet de suivre l'évolution et la stabilité du modèle. La stabilité énergétique du modèle est rapidement atteinte dès les premières années. Cependant les valeurs de température restent instables jusqu'à la 5ème année. Les valeurs de salinité également instables le resteront jusqu'à la 9ème année du modèle. Le modèle est donc sensé être au plus stable lors de la dixième année de modélisation. Seule la 10ème année de simulation sera donc utilisée dans le rapport.

### ***La circulation océanique à proximité des côtes Somaliennes :***

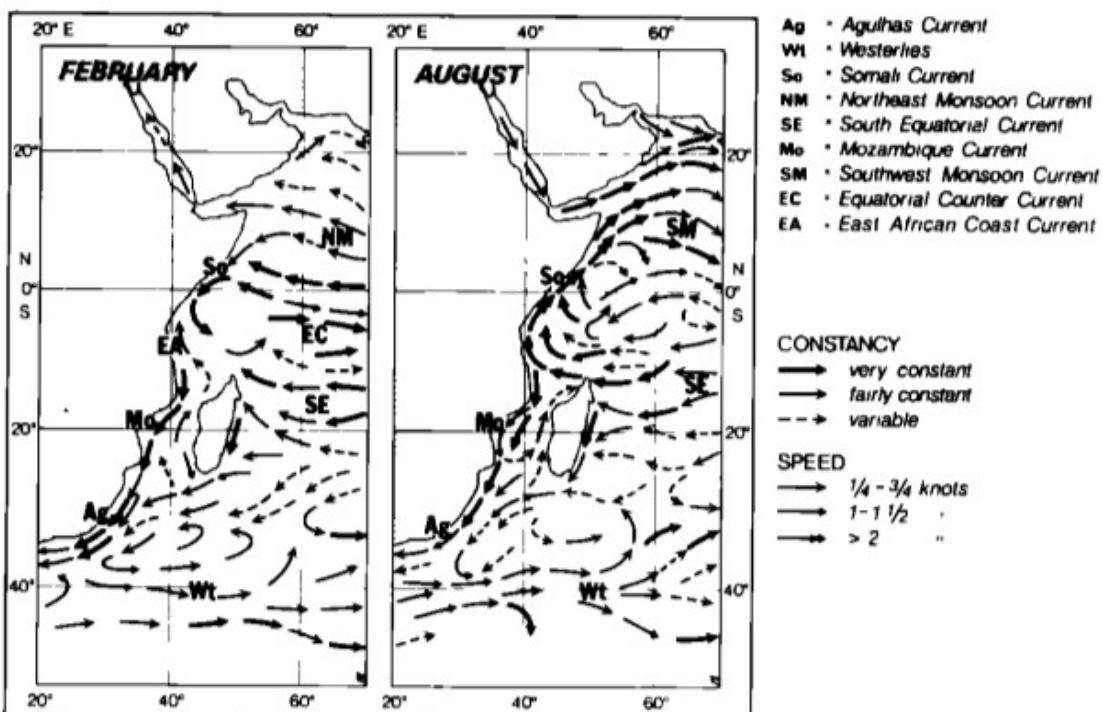


FIGURE 3 – La circulation selon Friedrich Schott.

(Schott 1983) décrit une circulation, qui se caractérise avec une variabilité saisonnière de la direction des courants à proximité des côtes Somaliennes. En Février, le courant de mousson Nord-Est (NM) longe la côte dans la direction du Sud-Ouest avant d'être dévié par le courant Sud équatorial (SE). En Août, la structure des courants est considérablement différente, le courant de mousson Sud-Ouest (SM) est entraîné par le courant Sud équatorial au niveau de la pointe Nord de Madagascar puis longe la côte Somalienne en direction du Nord-Est.

Il y a donc une alternance entre un courant longeant les côtes dans la direction Sud en hiver et un courant dans la direction Nord en été.

Structures de courants obtenus par le modèle :

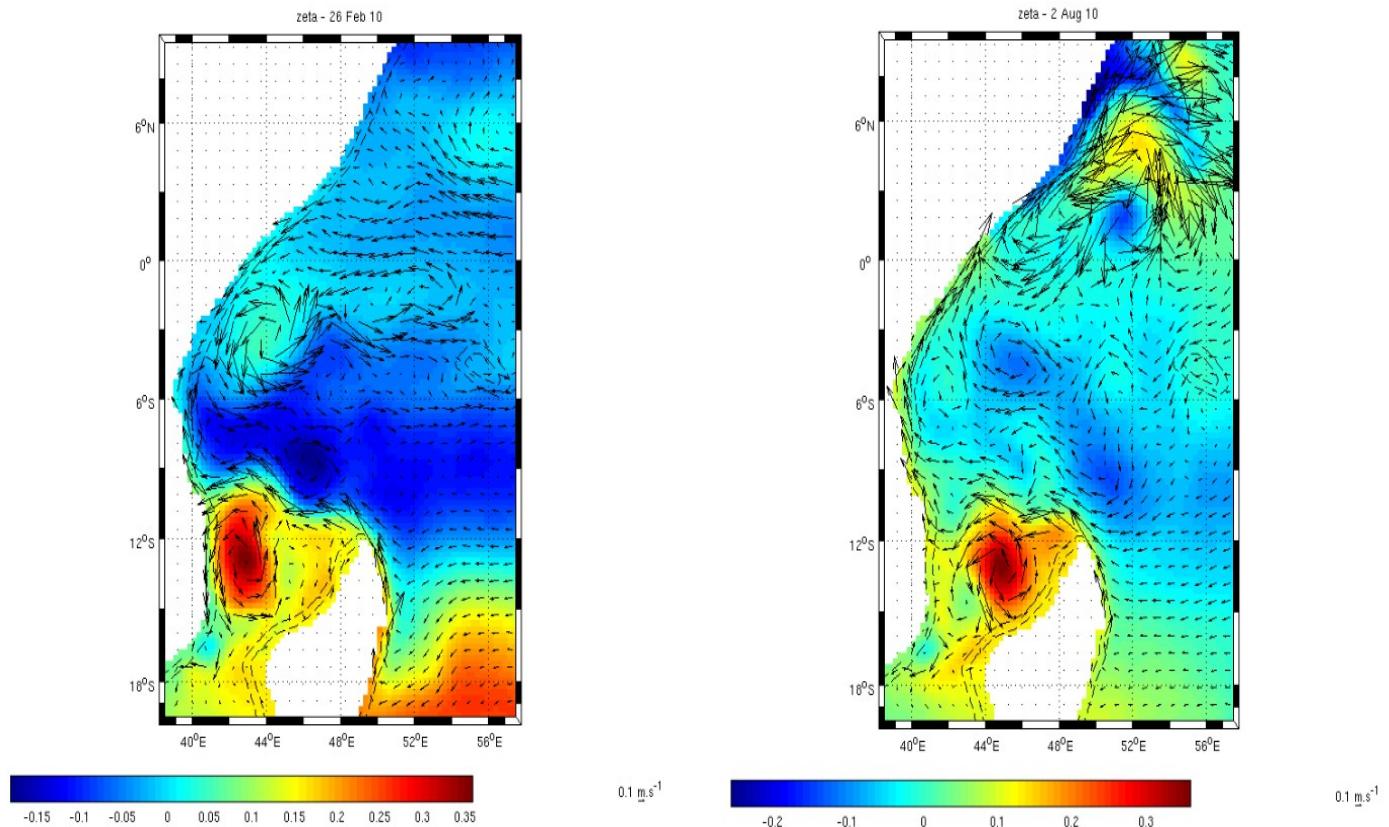


FIGURE 4 – Les deux figures représentent les anomalies du niveau marin, à gauche pour le 26 Février à droite pour le 2 Août.

Les figures représentant les anomalies du niveau marin superposées avec les courants (Fig4.) ont été sélectionnées le 26 février et le 2 août de la 10ème année afin d'étudier la variabilité saisonnière mise en avant par Schott (1983). Les structures hydrodynamiques des courants obtenues grâce au modèle sont très similaires à celles présentées par Schott (1983).

Les résultats du modèle sont comparés à des images satellitaires datant de 2008 disponibles sur le site Aviso afin de valider les sorties du modèle.

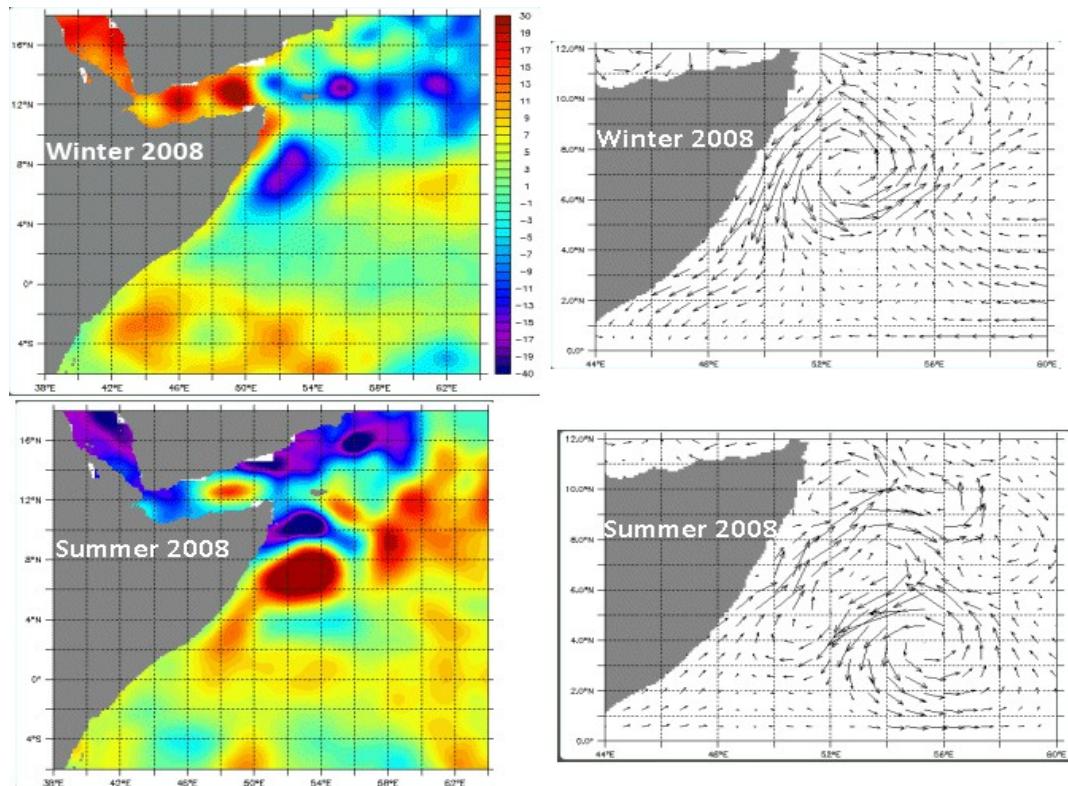


FIGURE 4 – Figures représentant les anomalies d'élévations de surface et courants issues du site Aviso.

Durant l'hiver 2008 (Fig4.) un tourbillon avec une rotation anti-horaire c'est à dire cyclonique est observée par satellite au large des côtes Somaliennes, sur la sortie hivernale du modèle ce tourbillon est également présent dans des proportions un peu plus faibles.

Durant l'été 2008 (Fig4.) les images satellite permettent d'observer deux tourbillons, le premier plus au Nord cyclonique et le second plus au Sud anti-cyclonique, ces deux tourbillons sont très bien représentés sur la sortie estivale du modèle.

Les images satellite viennent donc appuyer la fiabilité des sorties du modèle. De plus l'alternance (Nord-Est / Sud-Ouest) d'écoulement le long de la côte Somalienne mis en évidence par Schott (1983) est également présent durant l'année 2008 ce qui vient conforter ces résultats. La comparaison entre images satellitaires et sorties du modèle est à considérer avec précaution car la plupart du temps les cartes fournies par les satellites sont également réalisées à partir de modèle, il faut donc faire attention à ne pas comparer des résultats

identiques. Dans ce cas la comparaison est faite uniquement à titre indicatif pour appuyer la validité des sorties du modèle.

Mise en place de l'upwelling :

En été, pendant la mousson de sud-ouest, les vents soufflent vers le nord-est. Un upwelling côtier s'installe alors. En effet, sous l'action de la force Coriolis, les eaux chaudes de surface sont déviées à 45° vers la droite, par rapport à la direction du vent (c'est le transport d'Ekman). Ces eaux chaudes de surface étant donc déviées vers le large, une remontée d'eaux froides profondes rééquilibrent les masses d'eaux, vers les côtes. La différence avec les cartes d'hiver est évidente.

L'upwelling de Somalie peut-être schématisé de cette manière :

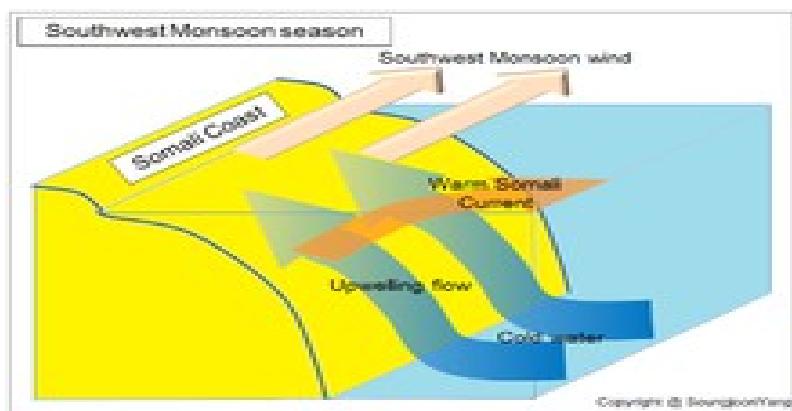


FIGURE 5 – Schéma de l'upwelling Somalien (source : Wikipedia)

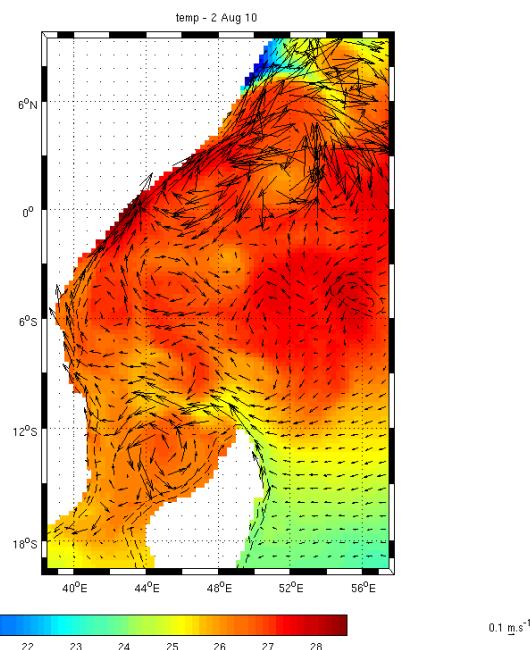


FIGURE 6 – Carte des températures pour Août

Sur la carte des température la remontée d'eau chaude (environ 28°C) le long de la côte puis leur dérive à 45° est mise en évidence, ce qui permet la remontée d'eau froide caractéristique de l'upwelling représentée en bleu au nord de la carte avec une eau d'environ 20°C. La zone d'upwelling s'étend encore plus au Nord de la zone d'étude et dans la mer d'Arabie. Mais le but est de mettre en avant la formation de l'upwelling due à la variabilité saisonnière des courants et non pas de délimiter une zone précise de remontée de l'eau profonde.

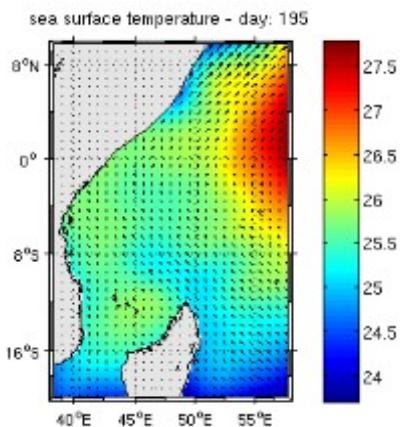


FIGURE 7 – Sortie du modèle représentant la température de surface mi-juillet. Le forçage confirme la tendance observée sur la (Fig 6.) avec une remontée d'eau froide au Nord Est de la côte Somalienne.

Le courant de Somalie (SM) pendant la mousson d'été rejoint celle des courants de bord ouest. À ce titre, le courant de Somalie est l'analogue des autres grands courants de bord ouest de l'hémisphère nord, tels que le Gulf Stream ou le Kuroshio. Mais à la différence de ces derniers, le courant de bord ouest du nord de l'océan Indien n'est présent qu'une partie de l'année (alternance été/hiver).

## Conclusion :

Les paramètres obtenus avec ROMS comparés avec ceux présentés dans la littérature concordent bien. Le modèle semble donc représenter de manière fiable les phénomènes observables sur la côte Somalienne. Il a permis de mettre en évidence la présence de l'upwelling Somalien, repérer de telles structures grâce à un modèle peut s'avérer très utile car les upwellings correspondent à une remontée de sel nutritif des couches profonde permettant un fort développement biologique. En conclusion le modèle ROMS donne de bons résultats pour une simulation appliquée au cas des côtes Est Africaines. L'amélioration de l'étude pourrait se faire par un agrandissement la zone plus au Nord de manière à mieux représenter la remontée d'eau profonde.

## **Bibliographie :**

Aviso, seasonal reverse in the somalie current, 2008, disponible sur internet:  
<http://www.aviso.altimetry.fr/en/data/data-access/las-live-access-server/lively-data/2010/jan-29-2010-seasonal-reverse-in-the-somali-current.html>

Doglioli A. Notes de cours Modélisation de la circulation océanique, mis à jour 2014, disponible sur internet : <http://www.com.univ-mrs.fr/~doglioli/>

Large et al., 1994

Schott F. Monsoon Response of the Somali Current and Associated, 1983.

Wikipédia, Somali Current, disponible sur internet :  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Somali\\_Current](http://en.wikipedia.org/wiki/Somali_Current)