

1. INTRODUCTION

Pendant plusieurs années, plusieurs méthodes ont été développées avec l'intérêt de mieux décrire et comprendre les aspects hydrodynamiques des océans. La modélisation figure comme une de ces méthodes et consiste à utiliser les équations de la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de transport (circulation thermohaline), pour simuler le comportement des processus océaniques à court temps, couvrant une large échelle spatiale et les coûts relativement réduits.

Dans le présent travail on a appliqué le modèle ROMS-Romstools (version *IRD-Institut de Recherche pour le Developpement*) pour étudier les aspects hydrodynamiques du canal de Mozambique et comparer les résultats obtenus avec ceux de la littérature. Le modèle ROMS (*Regional Ocean Modeling System*) est un modèle multidisciplinaire qui focalise les phénomènes océaniques dans le domaine physiques, biogéochimiques, sédimentaires, etc (<http://www.myroms.org>).

Aspects Hydrodynamiques du Canal de Mozambique

Le canal de Mozambique se situe dans la partie Ouest de l'océan Indien, séparant le Madagascar du continent Africain. Cette partie de l'océan Indien contribue à la redistribution globale de masse, de chaleur, d'eau douce et autres propriétés (DiMarco, S.F. *et al.*, 2002).

La couche de surface de l'océan Indien est caractérisée pour une variation saisonnière de la salinité et de la température. En été (Janvier- Février), dans la partie nord du Madagascar s'observent des salinités et des températures qui varient respectivement entre 34.5-35.0 et 28.0-29.0°C. En hiver (Mai-Août), la température décroît jusqu'à 25.0-27.0°C et la salinité augmente pour environs 35.2. Par contre dans la partie sud, les eaux de surface sont caractérisées par des basses températures entre 24.0-25.0°C en été et 20.0-22.0°C en hiver et hautes salinités, entre 35.5-35.6 à 30°S, pouvant arriver des salinités entre 35.2-35.3 au voisinage de cette latitude (DiMarco, S.F. *et al.* 2002).

R. Saetre et A. Jorge Da Silva (1984) ont réfétré que la circulation, le long de la côte Mozambicaine, est caractérisé par trois cellules anticyclonique qui changent de position le long de la côte et par quelques petites gyres cycloniques (fig. 1). Ils ont aussi réfétré qu'une des gyres cycloniques, situé entre 17-19°S, résulte probablement des apports du fleuve du Zambèze. Le gyre *e* a été trouvé plus au large de la côte Africaine dans les mois de Février et Mars 1980 qui en Décembre 1978 était plus près de la côte.

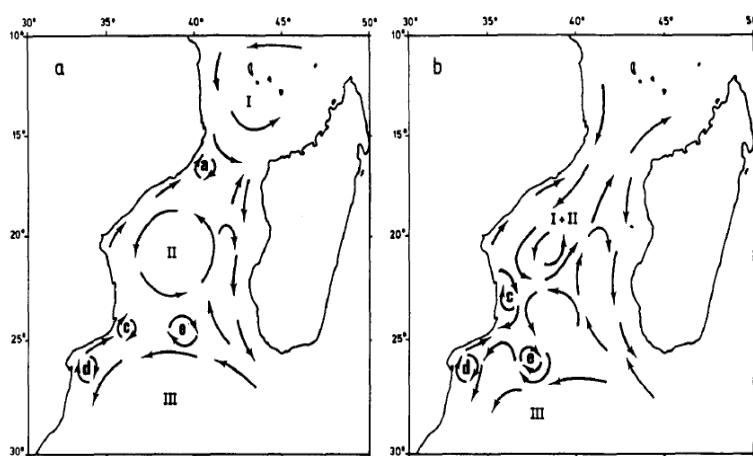


Fig.1. Tentative de modèle de circulation superficielle dans le canal de Mozambique

Selon R. Saetre et A. Jorge Da Silva (1984), le transporte massique dans le canal est fait par le courant du Mozambique (écoulement vers sud), considéré comme une partie du gyre subtropical anticyclonique, constitué par le courant sud Equatorial, le courant des Aiguilles et le flux nord de la zone de convergence subtropicale. La partie nord du courant du Mozambique est influencé par des vents des moussons ce que peut causer une variation en intensité et volume du transport dans le canal. Lutjeharms (1976), cité par R. Saetre et A. Jorge Da Silva (1984), a suggéré que le courant de Mozambique est la source majoritaire d'influx dans le courant des Aiguilles, durant la saison des moussons.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1. Description du modèle

ROMS-Romstools est un modèle océanique qui résout les équations primitives (équations de Navier Stokes) basées sur l'approximation de Boussinesq et l'hypothèse hydrostatique. La paramétrisation du mélange vertical est fait en utilisant le modèle k-profile de Large *et al* 1994, qui prend en considération la colonne de surface et la couche intérieur de l'océan (<http://www.myroms.org>).

Les équations sont discrétisées selon un schéma salt mottent (*leap flog*) et le filtrage est fait en utilisant le filtre d'Adams-Molton. En horizontal la discrétisation est faite utilisant les coordonnées curvilinéaire et en vertical en utilisant les coordonnées verticales qui suivent le terrain (coordonnée sigma), ce qui est avantageuses en cas d'une bathymétrie irrégulière. Les variables du modèle sont organisés selon la grille d'Arakawa de type C, qui prend en considération la conservation de la masse (<http://www.myroms.org>).

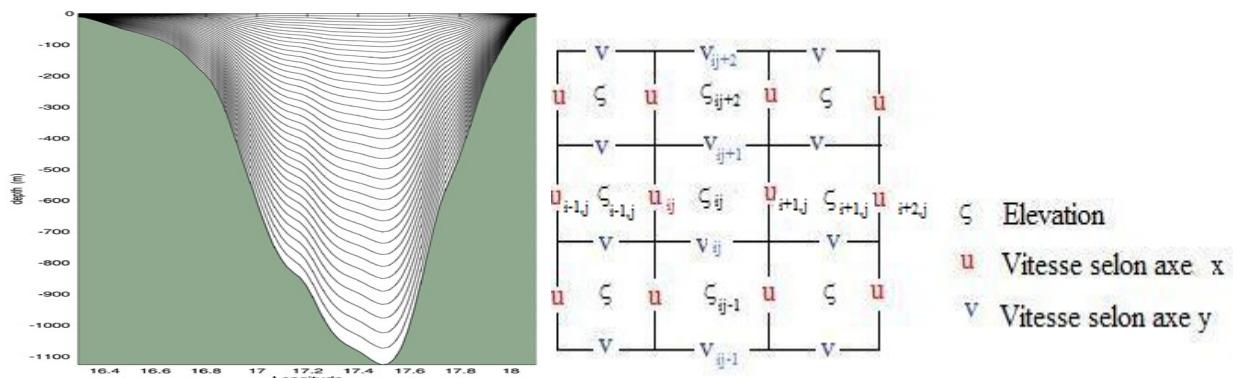


Fig. 2. Coordonnée verticale que suit le terrain (à gauche, source: <http://www.myroms.org>) et la grille Arakawa C (à droit)

Le modèle ROMS utilise la séparation de pas de temps (*Mode splitting*) ce qui permet de résoudre des processus de différentes échelles, comme le cas des ondes de gravité qui ne peuvent pas être résolues dans un modèle 3D. Cependant il existe un mode barotrope, de pas de temps court, qui

ré.solve des équations des eaux peu profondes (2D) et un autre mode, le mode barocline qui résout les équations en 3D, étant plus lent que le barotrope. Le critère de stabilité utilisé dans le modèle est celui de Courant -Friedrich – Levy (CFL), notamment dans le mode barotrope la vitesse de calcule doit être supérieur à la célérité des ondes plus rapides (onde de gravité) et que par un pas de temps long pour le mode tridimensionnel, il prend en considération la vitesse de propagation des ondes internes (<http://www.myroms.org>).

Ce modèle utilise les conditions aux limites d'*Atlas of Surface Marine Data 1994*, comprennent les conditions à la surface libre et au fond. À la surface, il prend en considération la tension du vent et la pression atmosphérique qui agissent sur la surface de l'eau, le bilan de chaleur (flux de chaleur latente et sensible, flux radioactif des ondes courtes et longues), le flux du sel traduit par l'évaporation, la précipitation et les apports continentaux. Au fond le flux de chaleur et de sel sont nuls, et le frottement est dû à la tension de cisaillement sur le fond. L'initialisation du modèle est faite avec les données de WOA (*World Ocean Atlas 1998*) concernant à la température et la salinité d'océan (<http://www.myroms.org>).

2.2. Implémentation du modèle dans le canal de Mozambique

Après avoir installé le modèle et avoir fait le cas test (exemple de Benguela) comme aussi avoir téléchargé et décompacté le fichier *ad_tools_2008.tar* depuis <http://www.com.univ-mrs.fr/~doglioli/UE07>, l'implémentation du modèle pour le canal de Mozambique a consisté en suivre les étapes suivantes:

✓ Introduction des coordonnées

À l'aide du fichier *ad_findgeocoord.m*, ont été fixé les coordonnées du canal de Mozambique, *lonmin= 31, lonmax=41, latmin=-30, latmax=-17*, qui ont été après introduites dans le fichier *romstools_param.m*. Encore dans le *romstools_param.m*, a été définit la résolution de grille,

$dl=1/5$, et a été fermé la frontière ouest du canal, [1 0 1 1]. Après a été lancé le *make_grid.m* qui a comme données de sortie la figure de la bathymétrie et les valeurs de la grille qui ont été sauvegardé dans un fichier nomme *memo.mat* avec les instructions *matlab* suivantes:

```
>>LLM=L-1;MMm=M-1;  
>>save memo LLm Mmm dxmin dymin dxmax dyname grdname
```

✓ **Conditions initiales et aux limites, critères de stabilité**

Les conditions initiales et aux limites ont été déterminés exécutant les scripts *make_forcing.m* et *make_clim.m*. Il apparaît que les flux radioactifs des ondes courtes et longues sont plus élevé dans le mois de Janvier, ce qui reflète les hautes valeurs de la température et de la salinité des eaux de surface, et sont basses dans le mois de Juillet ce qui reflète les plus basses valeurs de la salinité et de la température observés. Par contre, l'intensité du vent est plus élevée dans le mois de Juillet. L'évaporation apparaît plus élevée dans le mois d'Avril pendant que, dans le mois de Janvier l'évaporation et les apports d'eau douce sont presque équilibrés. Il montre encore que la partie sud du canal est froide en comparaison avec la partie nord (voir détails on annexe).

Le critère de stabilité a été calculé à l'aide du script *ad_cfl.m* et de *memo.mat*, ayant trouvé un pas de temps de 34.038 secondes. En continuant à suivre des instructions qui apparaissent en exécutant l'*ad_cfl.m* ont été trouvé les paramètres d'intégration suivantes: *NTIMES=1440*, *dt[sec]=1800* et *NTDFAST=60*, correspondant à la durée de simulation, pas de temps interne (barocline) et le nombre des fois que le mode barotrope va parcourir le mode barocline.

✓ **Configuration des fichiers *param.h* et *cppdefs.h***

Dans les fichiers *param.h* et *cppdefs.h*, a été définit un nouveau domaine de calcul, altérant:

Dans le fichier *param.h*

```
# ifdefined BENGUELA
parameter (LLm0=23,MMm0=31,N=32)
#else
parameter (LLm0=??,MMm0=??,N=??)
#endif
```

```
# ifdefined BENGUELA
parameter (LLm0=23,MMm0=31,N=32)
#endif
if defined CANAL MOZAMBIQUE
parameter (LLm0=69,MMm=71,N=32)
endif
```

Dans le fichier *ccpdefs.h*

<code># define BENGUELA</code>		<code># undef BENGUELA</code> <code># define CANAL MOZAMBIQUE</code>
<code># define OBC-WEST</code>		<code># undef OBC-West</code>

✓ Lancement du modèle

Après les étapes au dessus, a été compilé le modèle utilisant le *./jobcomp*. En suite, dans le *roms.in*, ont été introduits les paramètres d'intégration trouvés dans la détermination de CFL. La fréquence de sauvegarde des sorties de données établies est de 1440 par les sorties instantanée (*NWRT*) et 144 par les sorties moyennées (*NAVG*) et ensuite a été lancé le modèle par un an utilisant la commande *./roms roms.in*. Pour une simulation pluriannuelle, ont été modifiés les fichiers *roms_inter.in* et *run_roms.csh* en introduisant les paramètres d'intégration, *NTIMES*, *dt[sec]* et *NDTFAST* (égaux à ces introduites dans le *roms.in*) dans le *roms_inter.in* et en définissant le nombre des années à modéliser dans le *roms.csh*. Après a été lancé le modèle utilisant la commande *nohup ./run_roms.csh > expl.out&*.

✓ Visualisation des résultats

Les scripts *roms_diags.m* et *plots_diags.m* ont été utilisé pour avoir les variables de diagnostiques annuelles moyennées du modèle et la visualisation des résultats a été faite avec le script *roms_gui.m*. Dans le diagnostiques (fig. 3), est notable une variation non uniforme des variables

dans les premières années, ce qui change à partir de la cinquième année.

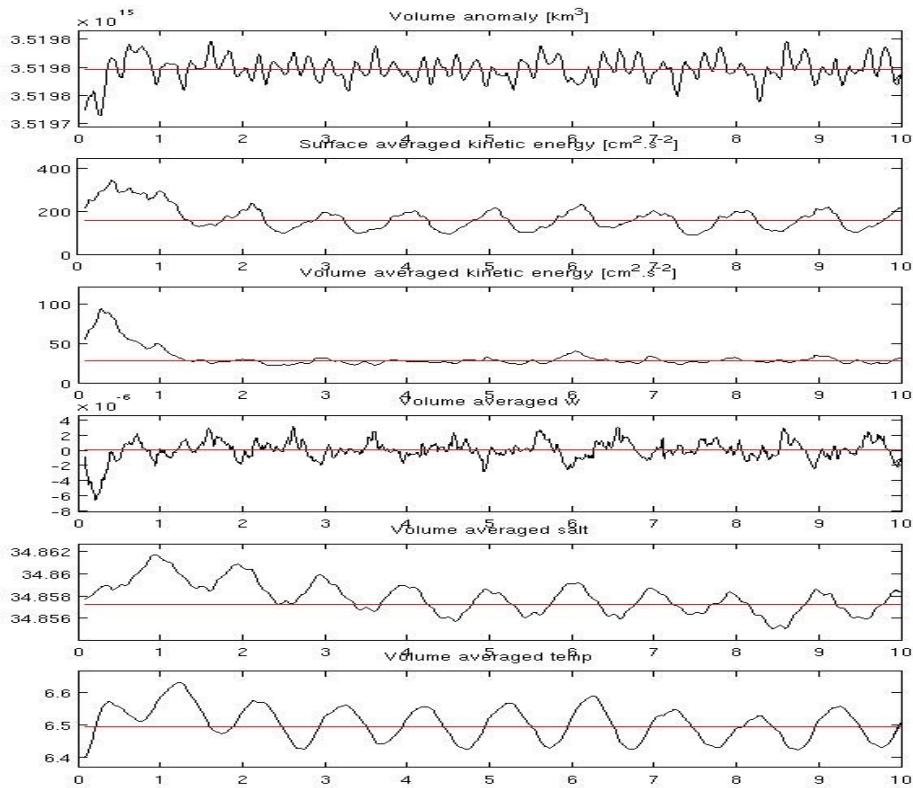


Fig. 3. Diagnostiques du modèle

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Variation saisonnière des aspects hydrodynamiques du canal de Mozambique

i. Variation de la salinité et de la température

La fig. 4. présente un cycle saisonnier de la distribution spatiale de la salinité des eaux de surface. Il apparaît que les eaux moins salées sont trouvés dans l'extrême nord sur les deux rives du canal, étant la plus basse valeur (d'environ 34.9) trouvé dans les mois d'Avril et Juillet, s'observant après une augmentation du teneur du sel lorsqu'on se déplace vers le sud, arrivant à 35.5. La augmentation de la salinité dans le rive nord Africaine, dû probablement à la réduction des apports des eaux douces du Zambèze, vérifié dans le mois d'Avril, fait qu'on trouve les eaux plus salées au

dessus de 21°S. La même tendance arrive dans le rive nord du Madagascar, lorsque se vérifie la diminution de l'extension des eaux moins salées, dans les mois de Juillet et Octobre, ce qui favorise l'augmentation de la salinité de surface. Cette tendance suggère que la salinité de surface dans l'extrême nord est influencée par les apports d'eau douce.

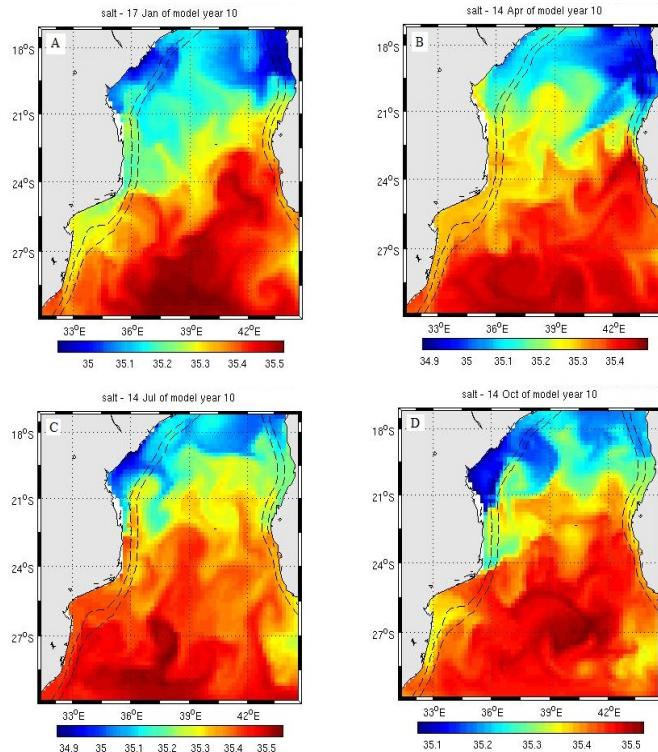


Fig. 4. Variation de la salinité des eaux de surface, (A) Janvier, (B) Avril, (C) Juillet et (D) Octobre.

Observant le couple sud-nord de la salinité (fig. 5), il apparaît que la tendance (croissante vers le sud) observé pour les eaux de surface, dans la fig. 4, se vérifie jusqu'à la profondeur d'environ 500 m et que dans l'extrême nord existe une couche de surface de salinité comprise entre 35-35.1 qui se forme en Janvier, descend jusqu'à environ 100 m de profondeur en Juillet et commence à disparaître en Octobre. Entre 700 à 1700 m de profondeur, s'observe une tendance contraire à ceux des eaux de surface, ayant la région sud les eaux moins salées (au dessous de 34.6) qui se propagent vers le nord, arrivant à la position de 1000 km (que correspond à environ 22°S). De 1500 m au fond, la salinité montre une tendance croissante arrivant à 34.8.

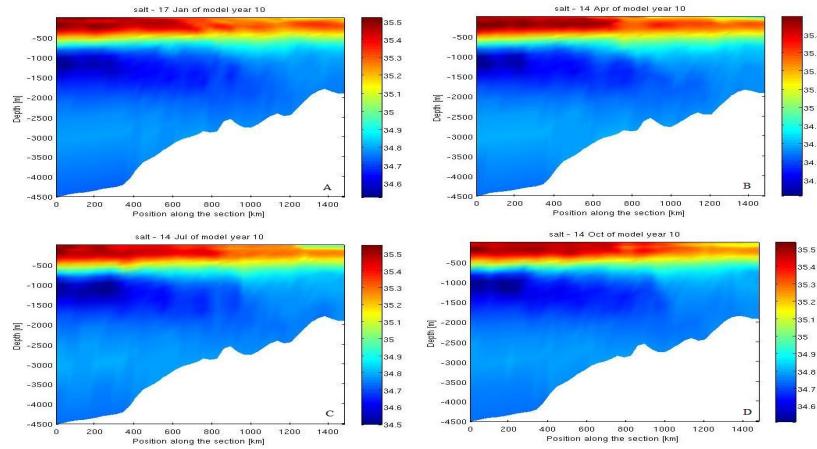


Fig. 5. Variation méridionale de la salinité (Sud à gauche et Nord à droite), (A) Janvier, (B) Avril, (C) Juillet et (D) Octobre.

La fig. 6, correspondent au couple vertical dans un transect Afrique-Madagascar, montre que les eaux dans la couche comprise entre la surface et 500 m ne sont pas homogènes et que les eaux froides trouvées entre environ 600 à 1500 m occupent toute la largeur du canal et est moins importante dans le mois d'Avril.

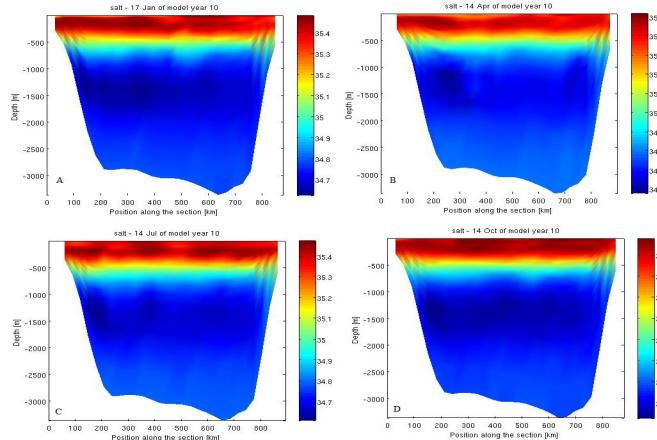


Fig. 6. Variation de la salinité en fonction de la profondeur (Ouest à gauche et Est à droit), à environ 24°S, (A) Janvier, (B) Avril, (C) Juillet et (D) Octobre.

La fig. 7, qui correspond à la variation de la température de surface, montre que les eaux sont plus chaudes dans le mois de Janvier, arrivant à un maximum au dessus de 30°C, et plus froides dans le mois de Juillet, avec un maximal au dessous de 26°C. Les plus basses valeurs (au dessous de 24°C) sont trouvées dans les mois de Juillet et Octobre. Au contraire de la salinité, il apparaît que les eaux sont plus chaudes dans la région nord que dans la région sud du canal, étant les valeurs les plus

élevés trouvés dans le bord du Madagascar et les plus basses au dessous de 27°S sur la côte Africaine. Cette figure suggère que dans le mois de Janvier arrive un transport d'eau froide vers le nord par la côte Africaine, arrivant à environ 21°S.

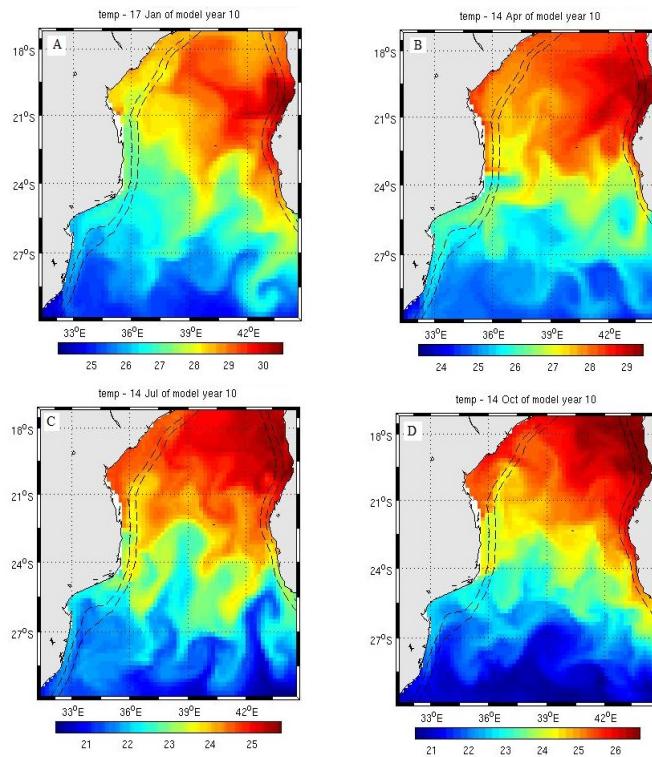


Fig. 7. Variation de la température des eaux de surface, (A) Janvier, (B) Avril, (C) Juillet et (D) Octobre.

La fig. 8. met en évidence une couche de surface de température élevée, importante dans l'extrême nord, arrivant plus au sud dans le mois d'Avril et qui arrive à la profondeur d'environ 100 m dans le mois de Juillet. Cette figure montre que la température décroît avec la profondeur arrivant au dessous de 5°C en environ 1600 m de profondeur.

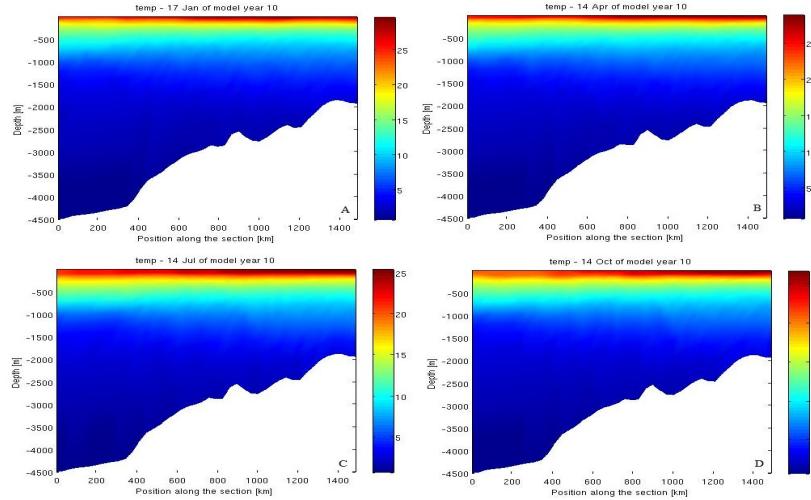


Fig. 8. Variation méridionale de la salinité (Sud à gauche et Nord à droite), (A) Janvier, (B) Avril, (C) Juillet et (D) Octobre.

Dans le couple vertical dans le transect Afrique-Madagascar (fig. 9), on observe une variation saisonnière de la température et de l'extension de la couche de surface ce qui influence les couches au dessous, étant qu'elle est plus froide et profonde (arrivant à environs 100 m) dans le mois d'Avril et plus chaude et mois profond dans le mois de Janvier. Il s'observe encore que d'environ 600 m au fond du canal, les couches d'égales température se comportent comme celles trouvées dans la fig. 8.

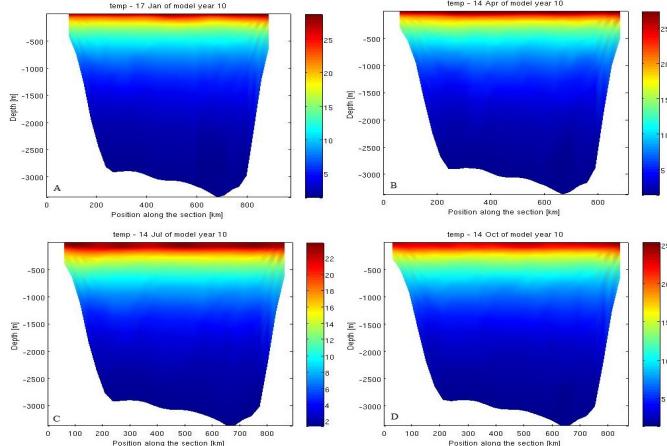


Fig. 9. Variation de la salinité en fonction de la profondeur (Ouest à gauche et Est à droit), (A) Janvier, (B) Avril, (C) Juillet et (D) Octobre.

Analysant les caractéristiques des eaux de surface, on observe une variation saisonnière de la salinité et température dans le canal. Pour le mois de Janvier qui correspond à l'été austral, l'extrémité nord du canal présente des valeurs de la salinité et de la température qui varient

respectivement entre 34.9-35.0 et 28.0-29.0°C et que pour l'extrémité sud ils varient respectivement entre 34.0-35.0 et 24.9-26°C. Pour le mois de juillet qui correspond à l'hiver, on trouve des valeurs qui varient entre 35.0-35.2 et 24.0-26.0°C pour la salinité et température dans l'extrémité nord et que pour l'extrémité sud ces valeurs varient entre 35.4-35.6 et 20.9-22.0°C. Ces dispositions des valeurs ressemblent à ceux trouvée par Wyrtki (1971) mentionné par DiMarco, S.F. *et al.* (2002), étant les différences maximales de 0.4 et 0.9°C pour la salinité et température.

Le minimal de la salinité trouvé entre 700 à 1700 m de profondeur, suggère avoir un écoulement des eaux moins salées vers le nord du canal. L'effet d'observé une augmentation de la salinité et les basses températures registrés après cette couche, suggéré que ces masses d'eaux sont d'origine différente de ces en dessus. Cette tendance ressemble à ceux trouvé par Clowes et Deacon (1935), illustrée dans la fig.10.

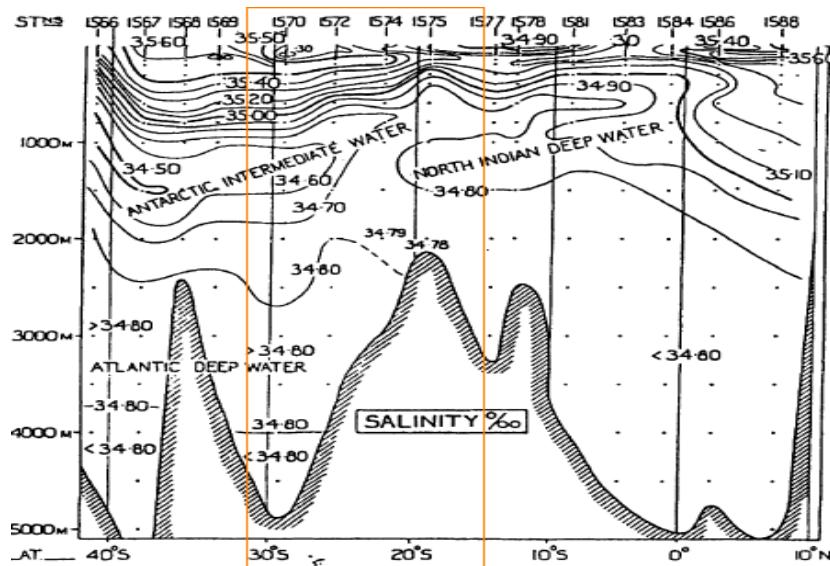


Fig. 10. Variation méridionale de la salinité (sud à gauche et nord à droit).

iii. Circulation dans le canal

La Fig. 11 présente la circulation méridionale et le champ de courant dans le canal de Mozambique. Il apparaît que l'écoulement vers le nord est faible dans le mois d'Avril, en dessous de 0.1 m/s, par

rapport aux restants mois où se registre un maximum au dessus de 0.2 m/s, mais la vitesse d'écoulement vers le sud est d'égale intensité dans les quatre mois étudiés.

Analysant l'écoulement dans le canal, il apparaît qu'elle est caractérisée par les mouvements linéaires et giratoires, cycloniques et anticycloniques, avec une forte variation saisonnière. Cependant, il se note que l'écoulement linéaire est plus significatif dans le mois de Janvier, suivi par le mois d'Avril et moins significatif dans le mois d'octobre dominé par le mouvement giratoire. Il s'observe encore que dans le bord sud du Madagascar les eaux provenant du nord sont déviés vers l'ouest par les eaux qui rentrent dans le canal, étant plus notable dans les mois d'Avril et Juillet. Analysant la circulation dans le mois de janvier, on peut suggérer que les eaux froides trouvées à environs 21°S (fig. 7) proviennent de l'extrémité sud du canal.

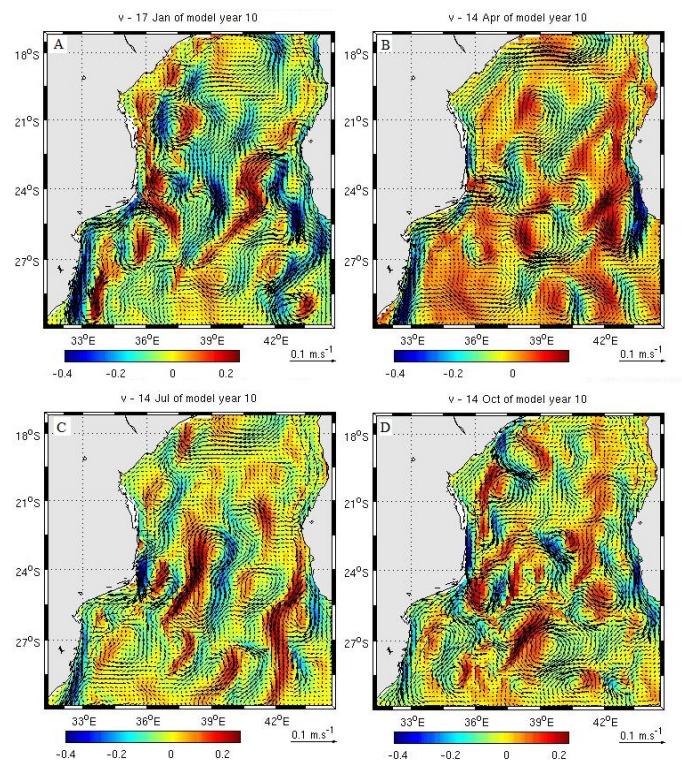


Fig. 11. Variation de la composante méridionale de la vitesse (v), (A) Janvier, (B) Avril, (C) Juillet et (D) Octobre.

Analysant les structures giratoires on observe qu'il existe des structures qui sont présentes dans la plupart des mois étudiés, mais variant de position, extension et intensité. On observe aussi que ces

structures sont plus fréquentes dans la côte ouest du canal.

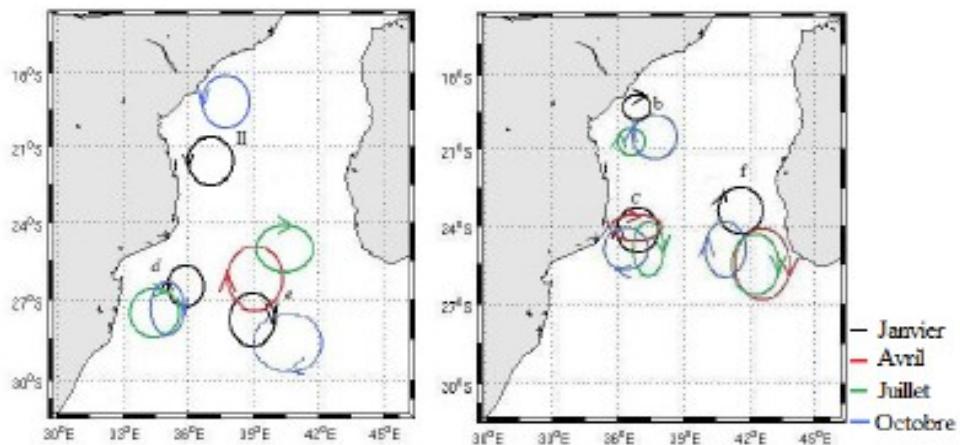


Fig. 12. Schéma illustrative des structures giratoires plus fréquentes dans le canal

Analysant la fig. 12 on peut suggérer que les gyres nommés ***II, b, c, d*** et ***e*** sont situés proche aux gyres ***II, b, c, d*** et ***e***, suggéré dans la fig. 1 (Tentative de modèle de circulation superficielle dans le canal de Mozambique). La disparition du gyre ***b*** dans le mois d'Avril, coïncide avec la faible présence d'eau douce sur la rives nord Africaine, ce qui supporte la suggestion de R. Saetre et A. Jorge Da Silva (1984), que le gyre centré à environ 18°S résulte probablement des apports du fleuve du Zambèze, ce pendant que le gyre ***f*** n'est pas présent dans la tentative de modèle de circulation superficielle dans le canal de Mozambique, que suggère avoir un écoulement linéaire, vers le nord et le sud. Cependant, la position, extension et intensité des gyres semble être liée à la rentrée d'eau dans le canal, provenant de l'extrême sud du Madagascar comme aussi au transport vers le sud.

3.2. Comparaison et validation des résultats du modèle avec ces mesurés

Dans la fig. 13 (à gauche), qui correspond au couple vertical dans le transect Afrique-Madagascar faite à partir du résultat du modèle, on observe une variation de la salinité en surface entre 35.3-35.5, étant la plus basse salinité trouvé entre 100-300 km du transect (correspondent à 36-38°E) et autre très fine couche trouvé entre 400 km (39°E) à la côte du Madagascar. Après s'observe une décroissance de ces valeurs de surface avec la profondeur arrivant à être au dessous de 34.7 entre

les profondeurs comprises entre 1000 et 1800 m. Ensuite s'observe une augmentation de la salinité jusqu'à environ 34.8 à la profondeur de 3000 m.

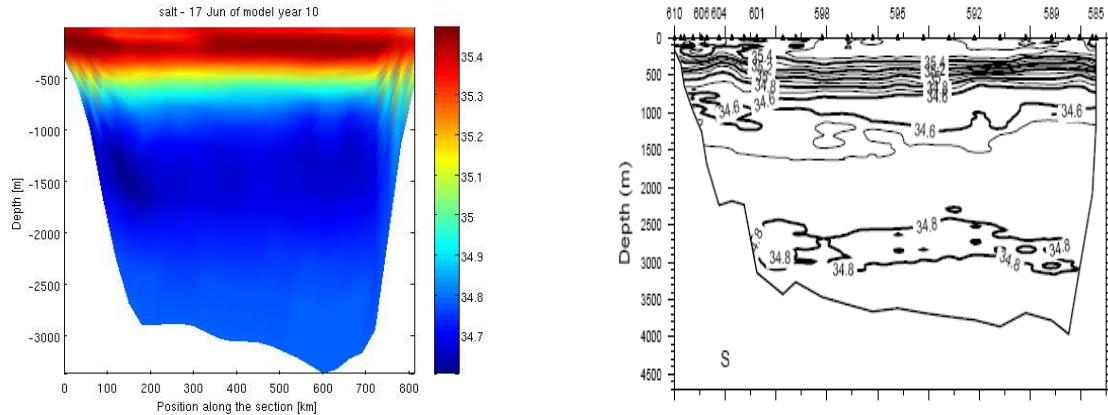


Fig. 13. Variation de la salinité en fonction de la profondeur dans le transect Afrique-Madagascar en environ 24°S (résultats de modèle à gauche et *in situ* à droit), avec ouest à gauche et est à droit

Pour la température (fig. 14, gauche), il apparaît maximale en surface, avec une valeur d'environ 25°C, et décroît, arrivant à un minimal de 2°C en hautes profondeur. Au contraire de la salinité, les couches trouvées entre 100-300 km et 400 km à la côte du Madagascar est caractérisé pour hautes températures en comparaison avec les eaux voisines.

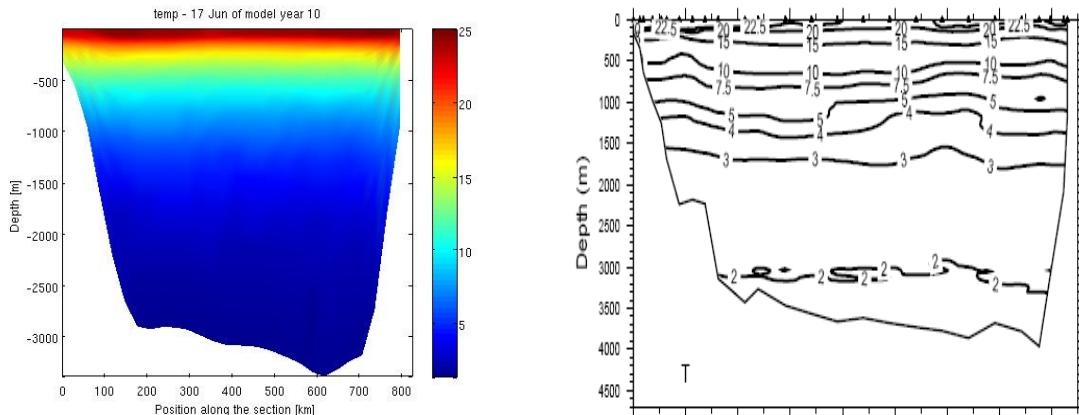


Figure xx. Variation de la température en fonction de la profondeur dans le transect Afrique-Madagascar en environ 24°S (résultats de modèle à gauche et *in situ* à droit), avec ouest à gauche et est à droit

Observant les résultats obtenus par DiaMarco, S.F *et al* (2002) durant une croisière de l'extrême sud du Madagascar à l'Afrique (figs. 13 et 14, droit), on constate que les résultats trouvés par le modèle sont de même ordre de grandeurs de ces *in situ*, mais que pour la température se registre un écart

d'environ 2°C, étant les eaux de surface du modèle plus chaud que la réalité.

Analysant la variation de la composante méridionale de la vitesse (fig. 15, gauche), il s'observe qu'elle est plus intense dans la région proche à la côte Africaine, entre 0 à 400 km de large (de la côte à environ 39°E). Il apparaît aussi que la surface est dominée par l'écoulement vers le sud. Rajoutant la variation de la salinité et de la température, on peut suggérer qu'entre 100-300 km et 400 km à la côte du Madagascar on a un écoulement vers le sud des eaux moins salées et chaudes provenant du nord donc suggérer l'existence de deux structures cyclonique, une entre les positions 0-250 km et l'autre entre 300-700 km (environ respectivement 35-37°E et 38-42°E).

DiaMarco, S.F *et al.* (2002) ont aussi suggéré l'existence de deux structures cycloniques dans le transect Afrique-Madagascar à environ 36.4°E et 41.7°E, de forte intensité en surface et que la structure centrée en 36.4°E disparaît au dessus de 1000 m (fig. 15, droit). Cependant l'écoulement vers le nord trouvé par le modèle, entre 300-400 km a été visualisé plus à est, entre 500-600 km. L'écart maximale trouvé entre les données du modèle et ces mesurés est inférieur à 0.1 m/s.

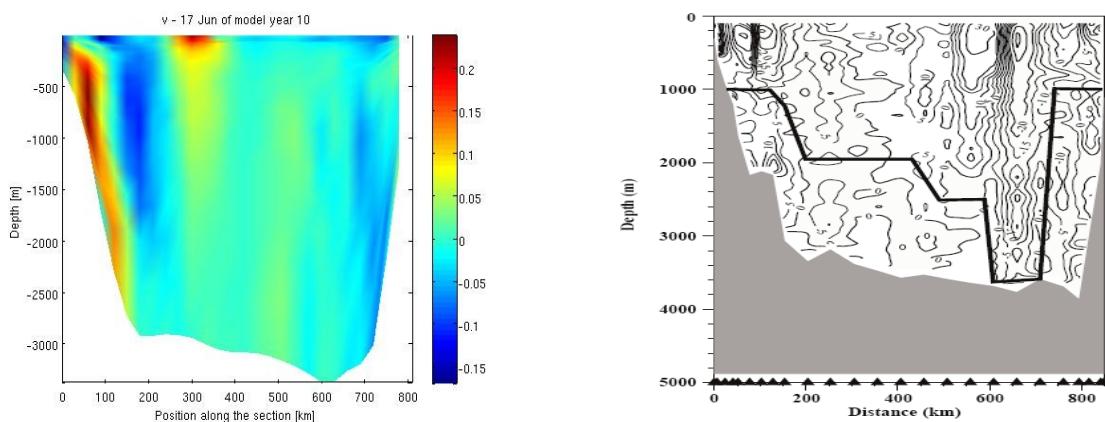


Fig. 15. Variation de la vitesse v en fonction de la profondeur (résultat du modèle à gauche et in situ à droite), avec ouest à gauche et est à droit.

4. CONCLUSION

La variation saisonnière de la salinité et de la température est dans l'intervalle prévu dans la littérature, ayant une différence inférieure respectivement à 1 et 2°C. La variation de ces paramètres

avec la profondeur confirme l'existence des eaux Antarctiques intermédiaires et des eaux Atlantiques du fond.

Les résultats du modèle montrent l'existence des structures cycloniques et anticycloniques et leur variation saisonnière. Cependant, il montre qu'il existe une structure cyclonique f , non prévue dans R. Saetre et A. Jorge da Silva (1984), dans la partie sud de la rive du Madagascar.

La comparaison faite avec les résultats de DiMarco, S.F. *et al.* (2002), montre une forte cohérence entre les résultats mesurés et du modèle, ayant une légère différence liée au positionnement d'écoulement vers le nord, dans la partie est du transept Afrique-Madagascar.

On peut dire que la description des aspects hydrodynamiques du canal du Mozambique faite par le modèle est fiable. Donc on peut conclure que le modèle ROMS-Romstools est un moyen efficace pour étudier les océans.

5. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUE

Pierrick Penven et Thi-Anh Tan (2007), *Romstools User's Guide*.

Roald Saetre et Antonio Jorge da Silva (1984). *The circulation of the Mozambique channel*. Deep-Sea Research, Vol. 31.

Steven F. DiMarco, Piers Chapman, Worth D. Nowlin Jr., Peter Hacker, Kathleen Donohue, Mark Luther, Gregory C. Johnson, John Toole (2002). *Volume transport and property distributions of the Mozambique Channel*. Deep-Sea Research II.

<http://www.myroms.org/documentation>

6. ANNEXE

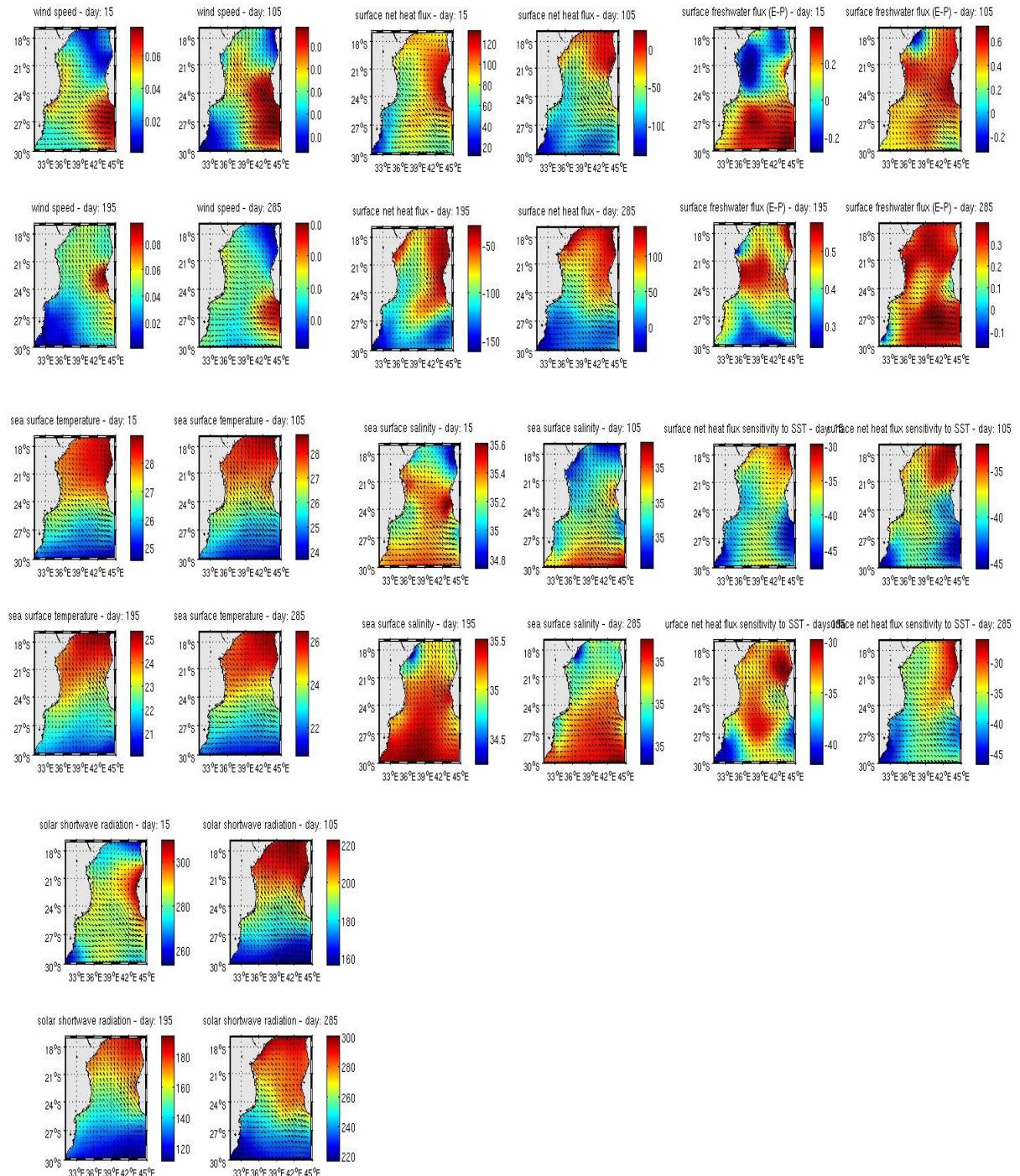


Fig. 16. Conditions aux limites

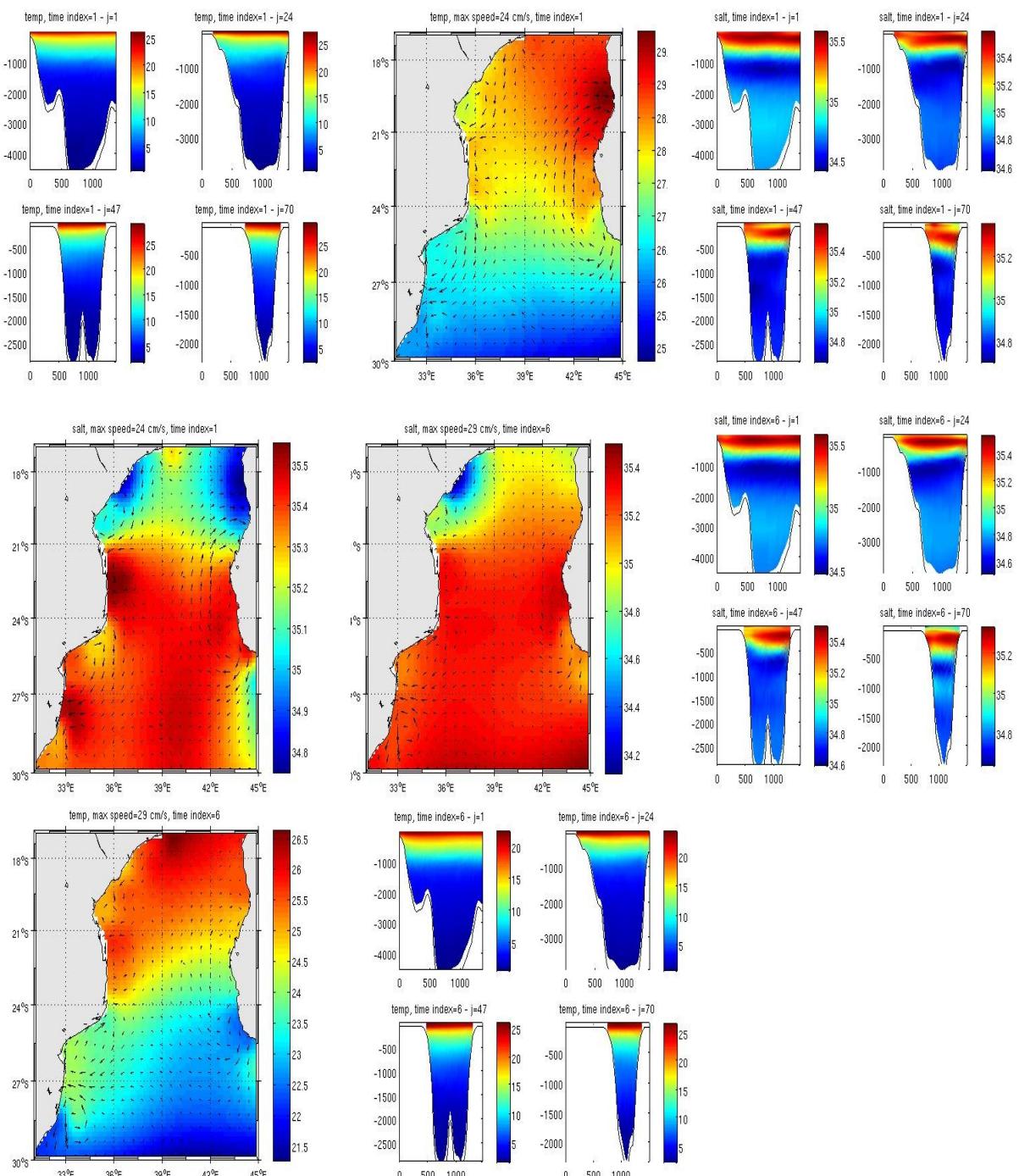


Fig. 17. Conditions initiales