

Modélisation numérique en océanographie : utilisation d'un modèle numérique de circulation océanique 3D nommé ROMS dans le courant du Benguela

Josselin Fatah-Roux

Université de Toulon
Master 2 Physique Science de l'Ingénieur
Spécialité Physique Surveillance de l'Environnement
vufic@outlook.com

16 novembre 2017

Résumé

De nos jours l'importance des modèles océaniques n'est plus à prouver. Savoir les utiliser est donc primordiale. Bien qu'ils diffèrent au niveau du code, la philosophie reste la même. La compréhension de l'un d'entre eux facilite donc celle des autres.

Ce travail consiste à manipuler ROMS, le configurer et l'appliquer dans la région qui comprend la Namibie et l'Afrique du Sud pour en tirer des hypothèses/conclusions sur la dynamique océanique qui s'y produit dans cette zone. Les résultats entrepris ici montrent principalement la présence d'un upwelling.

Mots-clés

Océanographie ; ROMS ; Configuration ; Résolution ; Circulation océanique ; Forçages ; CLF ; Courant du Benguela ; Upwelling

1 Introduction

La modélisation est la représentation d'un système complexe par un autre beaucoup plus simple à comprendre. Elle est très utile dans le domaine de l'océanographie pour prédire la circulation océanique mais également pour obtenir les principales

variables physiques de cette circulation (température, salinité, vitesse du courant ...) permettant alors de comprendre les mécanismes qui régissent l'océan (physique et biologique).

Un modèle océanique est dit modèle numérique car basé sur un ensemble de fonctions mathématiques (pas forcément linéaire) dont la résolution se fait sur ordinateur, par conséquent sur un nombre fini de valeurs discrètes, grâce à une méthode numérique. Il existe différentes méthodes numériques dont la plus utilisée est celle des différences finies de part son coût, son efficacité, sa simplicité et sa facilité. Ainsi les modèles d'océan qui l'utilise se distinguent d'abord par leur système d'équation, puis leur discrétisation. Toutefois tous comportent les équations primitives qui sont à la base de la mécanique des fluides : conservation de la masse, advection et Navier-Stokes avec approximation hydrostatique et de Boussinesq.

L'intérêt de tels modèles est qu'ils répondent à de nombreuses questions liées à l'environnement et la sécurité. En effet, pouvoir prédire permet à l'homme de mieux se préparer à des situations futures. De ce fait connaître par avance l'état de mer reviendrait à prévoir les tsunamis, les tempêtes, les inondations, les marées noires et bien d'autres phénomènes. Dès lors il est possible de mieux gérer la surveillance et la sécurité maritimes.

2 Matériels et Méthodes

2.1 Zone d'étude : le courant du Benguela

La zone étudiée est celle où se trouve le courant du Benguela, c'est à dire dans la région comprenant la Namibie et l'Afrique du Sud dont on se limitera à une étendue rectangulaire avec une longitude comprise entre 8°E et 22°E et une latitude comprise entre -38°N et -26°N :



FIGURE 1 – Domaine ([source : marine.copernicus.eu](http://marine.copernicus.eu))

Après de multiples recherches documentaires il s'avère qu'il y est présence de remontées d'eaux profondes froides appelées upwelling. Ce phénomène s'explique par l'intensité, la direction et le sens du vent sur les côtes. D'après la théorie d'Ekman comme le vent (relativement fort) va vers le nord, son action sur la couche de surface via les forces de frictions et la force de Coriolis due à la rotation de la Terre dévient le courant de surface à 45° à gauche de la direction du vent (90° pour le transport moyen d'Ekman) :

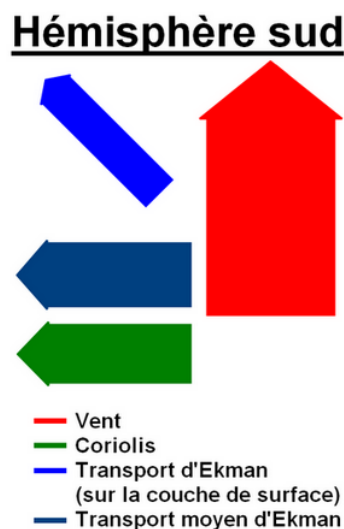


FIGURE 2 – Théorie d'Ekman

Ainsi les eaux de surfaces sont renvoyées vers le large provoquant une dépression le long de la ligne de côte et permettant aux eaux profondes froides de compenser le vide :

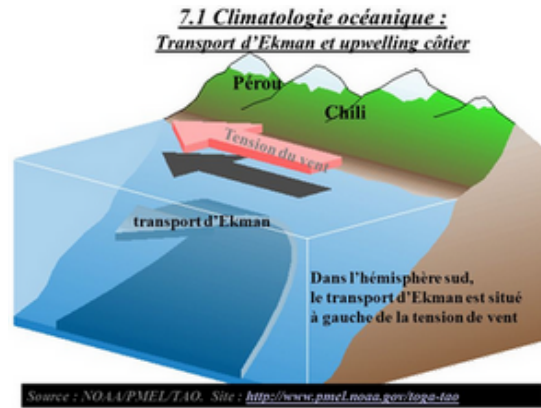


FIGURE 3 – Upwelling (source : pmel.noaa.gov/toga-tao)

Ces eaux froides sont riches en nutriments. En présence de lumière solaire, le phytoplancton utilise ces nutriments pour produire la chlorophylle. Une forte concentration en nutriments amène à une floraison très rapide de chlorophylle qui est alors visible par la couleur de plus en plus verte que prend l'eau.

2.2 ROMS et Ferret

★ ROMS :

ROMS est un modèle de circulation océanique 3D de dernière génération. Il modélise la quasi-totalité des aspects physiques et biochimiques de l'océan. Cet outil est composé de scripts à exécuter sous Matlab. Sa base de données assez conséquente donne la possibilité de le faire fonctionner sur l'ensemble du globe terrestre (hormis aux pôles, à cause de la sphéricité de la planète).

★ Ferret :

Les données sont contenues dans des fichiers au format NetCDF. Ils sont difficilement exploitables en l'état. Pour cela il faut passer par Ferret qui est un logiciel de visualisation et d'analyse largement utilisé dans la communauté des océanographes pour visualiser principalement des sorties de modèles numériques. Il fonctionne sous Mac/Linux et permet une lecture simplifiée des fichiers NetCDF en local.

NB :

- Les ordinateurs mis à disposition sont sous le système d'exploitation Linux, par conséquent Ferret se lance et s'utilise via le terminal de l'ordinateur.
- Dans ce compte-rendu il n'y aura que les commandes principales afin de ne pas l'alourdir. Cependant sur un autre fichier (qui sera envoyé en même que celui-ci) comportera toutes les commandes effectuées (dans l'ordre) lors du TP.

3 Implémentation du modèle

3.1 Initialisation

Dans un premier temps il faut créer un dossier "ROMS_WORK" (qu'on placera dans "Documents") et dont il faudra importer les fichiers de base pour le démarrage et la configuration de ROMS. La création de ce dossier et l'importation des fichiers s'effectuent grâce aux lignes de commande suivantes sur le terminal :

```

jfatah878@u1-112-8:/home/etudiants/jfatah878$ cd
jfatah878@u1-112-8:~$ cd Documents
jfatah878@u1-112-8:~/Documents$ mkdir ROMS_WORK
jfatah878@u1-112-8:~/Documents$ cd ROMS_WORK
jfatah878@u1-112-8:~/Documents/ROMS_WORK$ cp /home/partage/ROMS/
↳ Roms_tools/Run/jobcomp_openmp .
jfatah878@u1-112-8:~/Documents/ROMS_WORK$ cp /home/partage/ROMS/
↳ Roms_tools/Run/jobcomp .
jfatah878@u1-112-8:~/Documents/ROMS_WORK$ cp /home/partage/ROMS/
↳ Roms_tools/Run/param.h .
jfatah878@u1-112-8:~/Documents/ROMS_WORK$ cp /home/partage/ROMS/
↳ Roms_tools/Run/cppdefs.h .
jfatah878@u1-112-8:~/Documents/ROMS_WORK$ cp /home/partage/ROMS/
↳ Roms_tools/Run/start.m .
jfatah878@u1-112-8:~/Documents/ROMS_WORK$ cp /home/partage/ROMS/
↳ Roms_tools/Run/romstools_param.m .
jfatah878@u1-112-8:~/Documents/ROMS_WORK$ cp /home/partage/ROMS/
↳ Roms_tools/Run/roms.in .
jfatah878@u1-112-8:~/Documents/ROMS_WORK$ ls

```

Les opérations effectuées sont respectivement :

- Retour à la racine du pc
- Aller dans le dossier Documents
- Créer le dossier ROMS_WORK dans Documents
- Aller dans le dossier ROMS_WORK créé précédemment.
- Les autres lignes hormis la dernière utilisent la commande qui importe le fichier désigné :

Soit $cp \underbrace{\hspace{1cm}}_{\text{espace } 1} \underbrace{\text{Chemindufichierdistant}}_1 \underbrace{\hspace{1cm}}_{\text{espace } 2} \underbrace{\hspace{0.5cm}}_2$

- 1 : adresse totale du fichier distant à entrer.
- 2 : l'amène dans le répertoire en cours.

-ls montre tous les fichiers/sous-dossiers contenus dans ROMS_WORK.

Dans un deuxième temps un autre dossier nommé "ROMS_FILES" qui sera un sous-dossier de ROMS_WORK doit être également créer pour la simulation :

```

jfatah878@u1-112-8:~/Documents/ROMS_WORK$ mkdir ROMS_FILES

```

3.2 Délimitation, résolution, titre, nombre de couche verticale et frontières : romstools_param.m

La retranscription sur le modèle des coordonnées de délimitation du domaine d'étude écrit dans la partie 2.1 se fait dans le fichier "romstools_param.m" de la ligne 89 à 92 :

```

86 %
87 % Grid dimensions:
88 %
89 lonmin = 8; % Minimum longitude [degree east]
90 lonmax = 22; % Maximum longitude [degree east]
91 latmin = -38; % Minimum latitude [degree north]
92 latmax = -26; % Maximum latitude [degree north]
93 %

```

FIGURE 4 – Délimitation

Dans le même fichier d'autres paramètres sont à préciser comme :

-le choix de la résolution (1/3) à la ligne 96 :

```
93 %  
94 % Grid resolution [degree]  
95 %  
96 dl = 1/3;  
97 %
```

FIGURE 5 – Résolution

-le titre à la ligne 45 :

```
45 ROMS_title = 'Benguela Test Model';
```

FIGURE 6 – Titre

-le nombre de couche verticale à la ligne 100 :

```
97 %  
98 % Number of vertical Levels (! should be the same in param.h !)  
99 %  
100 N = 20;  
101 %
```

FIGURE 7 – Nombre de couche verticale (romstools_param.m)

Attention la valeur du nombre de couche verticale doit être la même que celle indiquée dans le fichier param.h à la ligne 76 :

```
75 # elif defined BENGUELA  
76 | parameter (LLm0=41, MMm0=42, N=20) ! <-- CORAL sea
```

FIGURE 8 – Nombre de couche verticale (param.h)

-les frontières ouvertes (valeur 1) et les frontières fermées (valeur 0) à la ligne 188 :

```
185 %  
186 % Open boundaries switches (! should be consistent with cppdefs.h !)  
187 %  
188 obc = [1 1 1 1]; % open boundaries (1=open , [S E N W])  
189 %
```

FIGURE 9 – Frontières (romstools_param.m)

Les données relatives aux frontières doivent être compatibles avec celles du fichier cppdefs.h de la ligne 45 à 48 :

```
35 /* Configuration Namea */  
36 # define BENGUELA  
37 /* Parallelization */  
38 # define OPENMP  
39 # undef MPI  
40 /* Nesting */  
41 # undef AGRIF  
42 # undef AGRIF_2WAY  
43 /* Open Boundary Conditions */  
44 # undef TIDES  
45 # define OBC_EAST  
46 # define OBC_WEST  
47 # define OBC_NORTH  
48 # define OBC_SOUTH
```

FIGURE 10 – Frontières (cppdefs.h)

3.3 Création de la grille : make_grid

Avant de créer la grille il est primordial d'ouvrir MATLAB dans le dossier ROMS_WORK est d'exécuter le programme start.m :

```
»start
```

start.m permet d'indiquer à MATLAB le chemin où se trouve les outils de ROMS dont il va avoir besoin par la suite.

L'obtention des informations pour la création de la grille est possible via le script make_grid.m :

```
»make_grid
Making the grid: ./ROMS_FILES/roms_grd.nc

Title: Benguela Test Model %Titre

Resolution: 1/3 deg %Resolution

Create the grid file...
LLm = 41 %Nombre de mailles dans la direction x
MMm = 42 %Nombre de mailles dans la direction y

Fill the grid file...

Compute the metrics...

Min dx=29.1913 km - Max dx=33.3244 km
Min dy=29.2434 km - Max dy=33.1967 km

Fill the grid file...

Add topography...
ROMS resolution : 31.3 km %Resolution en km
Topography data resolution : 3.42 km
Topography resolution halved 4 times
New topography resolution : 54.6 km
Processing coastline_f.mat...

%Pour changer le trait de cote, n pour non :
Do you want to use editmask ? y,[n]

Apply a filter on the Deep Ocean to remove the isolated
↳ seamounts :
4 pass of a selective filter.
Apply a selective filter on log(h) to reduce grad(h)/h :
9 iterations - rmax = 0.29333
Smooth the topography a last time to prevent 2DX noise:
2 pass of a hanning smoother.

Write it down...

Do a plot...
```

LLm et MMm sont immédiatement reportés dans le fichier param.h à la ligne 76 :

```
75 # elif defined BENGUELA
76 | parameter (LLm0=41, MMm0=42, N=20) ! <-- CORAL sea
```

FIGURE 11 – LLm et MMm

NB : pour obtenir une bonne résolution spatiale, le modèle ROMS, utilise une grille de type Arakawa C décentré sur l'horizontale :



FIGURE 12 – Arakawa C décentré (source : <http://www.mio.univ-amu.fr>)

3.4 Forçages

Toujours sur MATLAB en lançant les fichiers make_forcing.m et make_clim.m on calcule les forçages du modèle, les conditions initiales, ainsi que les conditions aux frontières :

```
»make_forcing
»make_clim
```

3.5 Pas de temps et CLF

ROMS emploie la technique du time-splitting (séparation du pas de temps). Comme le choix est de simuler sur une année il faut dans roms.in à la ligne 4 mettre NTIMES=24h*365j soit 8760h et dt=1h soit 3600s : 8760*3600s=1an.

```
3 time_stepping: NTIMES dt[sec] NDTFAST NINFO
4 | | | 8760 3600 60 1
```

FIGURE 13 – NTIMES et dt

On veut aussi que cette simulation soit moyennée pour chaque jours. Pour cela NAVG à la ligne 27 doit valoir 24 : 24*3600s=1jour.

```
26 averages: NTSavg, NAVG, NRPFavg / filename
27 | | | 1 24 0
```

FIGURE 14 – NAVG

Attention la résolution temporelle et spatiale sont liées par le critère de stabilité CFL (Courant Friedrichs Levy), par conséquent dt est obligé de respecter l'équation ci-dessous :

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

Δt est le pas de temps externe, c la célérité des ondes externes et Δx et Δy les pas d'espace de la grille.

3.6 Compilation

La compilation du modèle est réalisé avec l'instruction `./jobcomp_openmp` sur le terminale de linux :

```
jfatah878@u1-112-8:/home/etudiants/jfatah878/Documents/ROMS_WORKS$  
↪ ./jobcomp_openmp
```

Le fichier de cette compilation a pour nom : `room` (à ne pas confondre avec `roms.in`)

3.7 Simulation

Une fois la compilation effectuée le modèle peut être lancer avec l'instruction `./roms roms.in` pour une simulation sur une année (décidé à la partie 3.5) :

```
jfatah878@u1-112-8:/home/etudiants/jfatah878/Documents/ROMS_WORKS$  
↪ ./roms roms.in
```

Les NetCDF créés sont : `roms_avg.nc`, `roms_clm.nc`, `roms_frc.nc`, `roms_grd.nc`, `roms_his.nc`, `roms_ini.nc`, `roms_oa.nc` et `roms_rst.nc`.

4 Résultats

À notre disposition deux simulations faites lors du TP :

- une pour une résolution 1/3 sur une année.
- l'autre pour une résolution 1/6 sur quatre mois et demi.

La seconde étant plus courte par manque de temps.

4.1 Vent

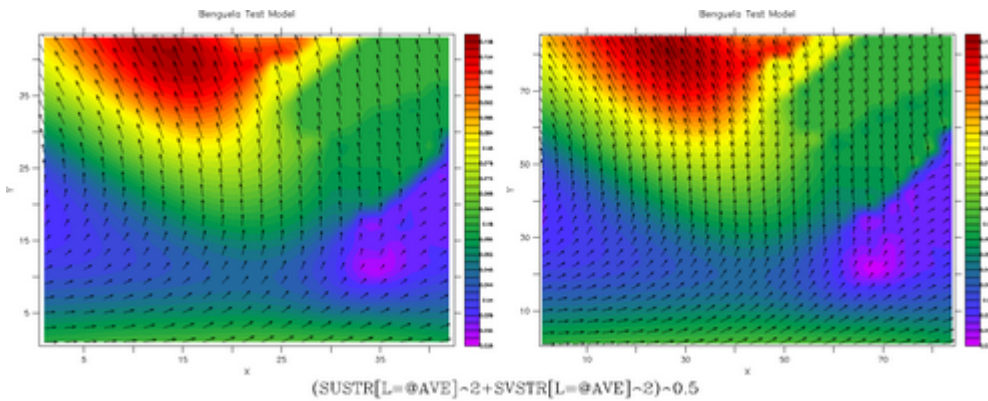


FIGURE 15 – Vent moyenné sur la simulation (résolution 1/3 et 1/6)

On constate que le vent moyen est un vent de sud.

```
fill/d=2/k=20/i=1 :42/j=1 :43 (SUSTR[l=@AVE]^2+SVSTR[l=@AVE]^2)^0.5  
vec/ov/d=/k=20/i=1 :42/j=1 :43 SUSTR[l=@AVE],SVSTR[l=@AVE]  
frame/file=img10.gif
```

```
fill/d=2/k=20/i=1 :84/j=1 :85 (SUSTR[l=@AVE]^2+SVSTR[l=@AVE]^2)^0.5  
vec/ov/d=2/k=20/i=1 :84/j=1 :85 SUSTR[l=@AVE],SVSTR[l=@AVE]  
frame/file=img9.gif
```


4.2 Transport d'Ekman sur la couche de surface

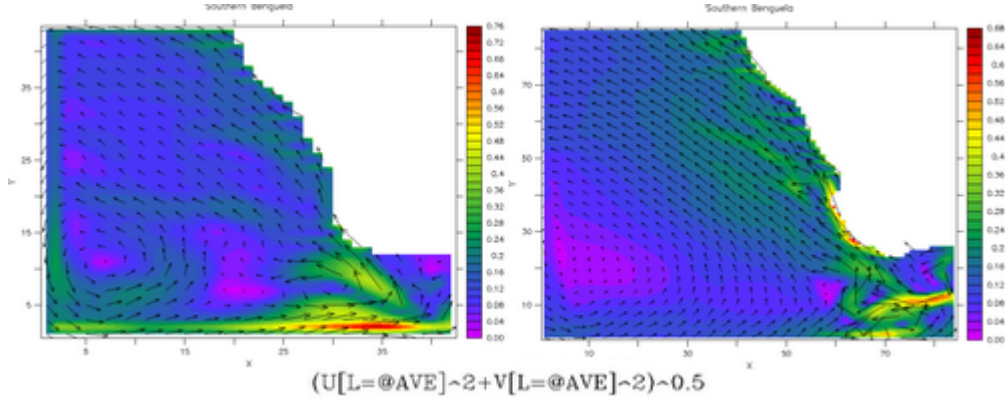


FIGURE 16 – Courant moyenné en surface sur la simulation (résolution 1/3 et 1/6)

Le courant moyenné en surface montre une déviation à 45° vers la gauche.

```
set var/bad=0 U[d=1]
set var/bad=0 V[d=1]
fill/d=1/k=20/i=1 :42/j=1 :43 (U[l=@AVE]^2+V[l=@AVE]^2)^0.5
vec/ov/d=1/k=20/i=1 :42/j=1 :43 U[l=@AVE],V[l=@AVE]
frame/file=img1.gif

set var/bad=0 U[d=1]
set var/bad=0 V[d=1]
fill/d=1/k=20/i=1 :84/j=1 :85 (U[l=@AVE]^2+V[l=@AVE]^2)^0.5
vec/ov//d=1/k=20/i=1 :84/j=1 :85 U[l=@AVE],V[l=@AVE]
frame/file=img5.gif
```

4.3 Température sur les côtes

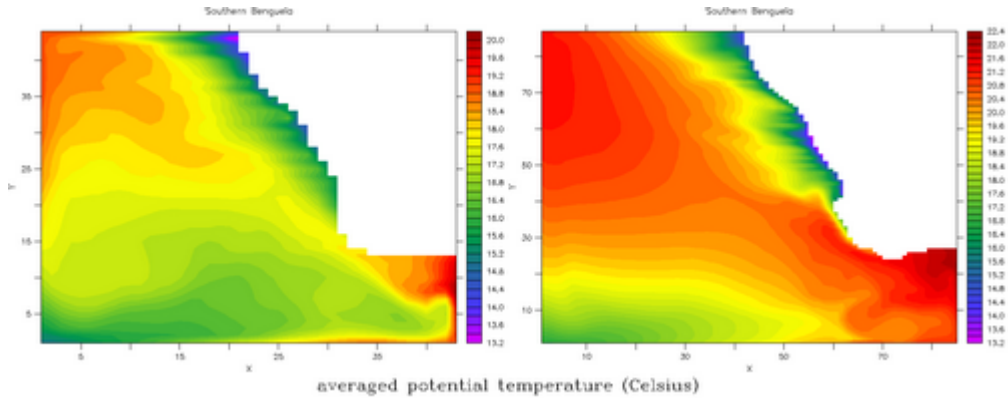


FIGURE 17 – Température moyenne sur la simulation (résolution 1/3 et 1/6)

La température moyenne indique que les côtes sont sujettes à des températures plus froide.

```
set var/bad=0 TEMP
fill/k=20/d=1 TEMP[l=@AVE]
frame/file=img2et6.gif
```

4.4 Température en profondeur

Une coupure longitudinale est faite afin de voir la température en profondeur :

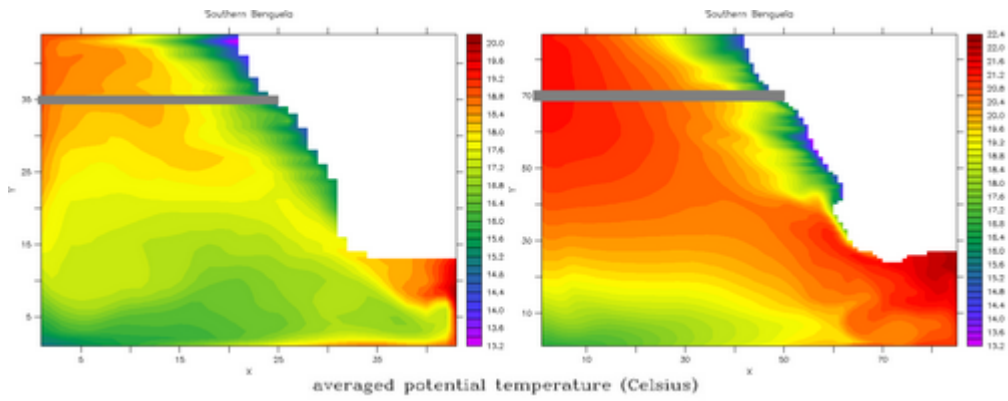


FIGURE 18 – Coupure longitudinale (résolution 1/3 et 1/6)

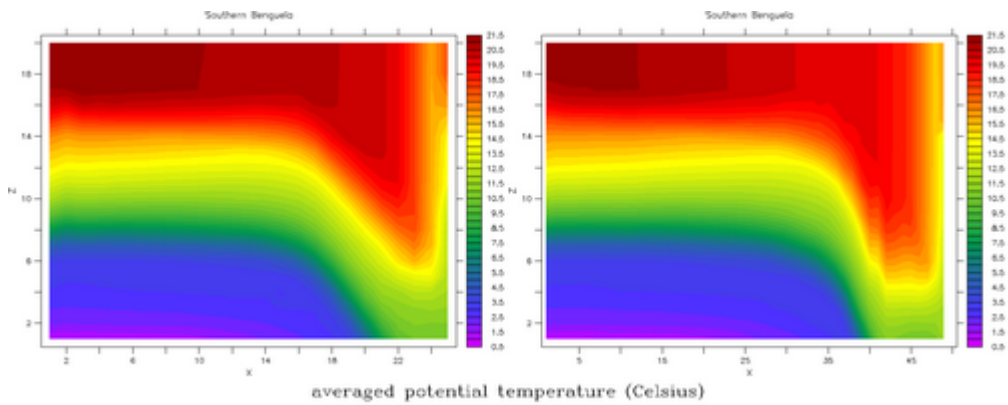


FIGURE 19 – Température en profondeur pour une journée (résolution 1/3 et 1/6)

On distingue au niveau des côtes une remontée de température froide.

```
fill/j=35/l=35/i=1 :25/k=1 :20 TEMP
frame/file=img4.gif
```

```
fill/j=70/l=35/i=1 :50/k=1 :20 TEMP
frame/file=img8.gif
```

5 Discussion

Comparaison entre une résolution 1/3 et 1/6 :

La simulation sur une résolution 1/6 est d'une qualité bien meilleur par rapport à la 1/3 avec des pixels beaucoup plus précis, un trait de côte plus affiné, des courants et forçages mieux calculés.

Apparition de frontières fermées :

Sur les résultats de la résolution 1/3 les frontières sont fermées alors qu'elles ne devraient pas l'être. La première hypothèse qui pourrait expliquer leur fermeture serait qu'il y est un problème avec le script `make_clim.m`. La seconde serait un problème de CFL. Dans tous les cas ce n'est pas normal au vu de la configuration effectuée.

Fiabilité du modèle :

Ce que le modèle renvoi ne correspond pas forcément à la réalité. Il doit être jugé sur sa fiabilité, par comparaison aux données terrain. Néanmoins n'ayant aucune donnée in situ on se réfère aux recherches documentaires faites sur internet. Les résultats obtenus tendent à confirmer ce qui a été dit dans la partie 2.1 (entre autre présence d'upwelling et de vents de sud).

6 Conclusion

En manipulant ROMS on a pu avoir une meilleure compréhension sur la manière d'utiliser un modèle numérique océanique (configuration et exploitation des données). Toutefois le faible nombre de séance de TP n'a pas permis de parfaire l'étude de ce modèle et du courant du Benguela. De plus un problème est apparu concernant les frontières fermées ce qui a quelque peu faussé les résultats. Avec plus de temps il aurait été possible de trouver l'origine de ce problème, de le régler et de réaliser des simulations sur plusieurs années afin d'obtenir une base de données plutôt conséquente pour une analyse plus poussée.

Références

- [1] AYACHE, MOHAMED. 2012. *Application du modèle ROMS dans le bassin ALGERIEN*.
- [2] GIANNESINI, LAËTITIA. 2010. *Etudes du courant Oyashio par le modèle ROMS*.
- [3] LUCET, MATHIEU. 2012. *Modélisation de la circulation océanique de l'Argentine*.
- [4] SIMON, MATHIAS. 2008. *Introduction au modèle ROMS : Application au golfe du Mexique et étude du «Loop Current»*.
- [5] STEELE, JOHN. 2001. *Encyclopedia of Ocean Sciences*.