

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر و تهيئة الساحل

Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
D'INGENIEUR EN SCIENCES DE LA MER

Spécialité : AMENAGEMENT DU LITTORAL

Sujet :

**Modélisation numérique de la circulation océanique à
l'aide du modèle RomsTools
(Application sur le golfe de Gabès)**

Présenté par:

- **Bouhaddad Mouloud**
- **Himeur Zouheyr**

Soutenu le 19 /07/2012 devant le jury suivant :

Driche M.	(ENSSMAL)	Président
Bouaicha F.	(ENSSMAL)	Promoteur
Ait Ameur N.	(ENSSMAL)	Examinatrice
Bellahrach A.	(ENSSMAL)	Examineur

Promotion : (2012)

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions Allah le tout puissant pour nous avoir donné la santé, le courage et la volonté, pour réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer toutes nos reconnaissances à ceux qui, à divers titres, ont collaboré à la réalisation de ce travail. Nous les devons à de nombreuses personnes que nous avons le plaisir et l'honneur de citer ci-après.

Mr Bouaicha Farid pour avoir dirigé ce travail et lui avoir accordé un intérêt tout au long de son élaboration.

Mr Driche Mohamed d'avoir accepté de présider le jury de cette soutenance.

M^{lle} Ait Ameer Nadira de nous avoir honoré de sa présence, d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Mr Belahrache Abderrahmene, on le remercie d'avoir accepté examiner notre travail.

Enfin nos vifs remerciements, à toutes les personnes qui nous ont aidé du près ou de loin à la réalisation de ce mémoire de fin d'étude.

Bouhaddad et Himeur

Dédicace Mouloud

Je dédie ce travail

*A mon père et ma chère mère pour tous ce qu'ils ont faits
pour moi*

A mes frères et sœurs

A ma princesse Nedjma

A mes oncles en particulier Abderazzeq et fares Kammouche

A mon médecin Azzedine Houar

A tous mes chers amis en particulier Younes, badro et sofiane

A toutes les personnes qui m'ont connu...

Dédicace Zouheyr

Je dédie ce travail

*A toute ma Famille en particulier les petits Oussama,
Nour el Houda, Chainaze, Abd el Hakim, Amine, Okba,
Safi, Hatem, Iyade, Alai Eddine*

A mes deux petites sœurs Amina et Iness

A tous mes amis

A toutes les personnes qui m'ont connu...

Liste des acronymes

- AGRIF: Adaptive Grid Refinement in Fortran.
- A_h et A_z : les coefficients de viscosité turbulente horizontaux (A_x et A_y) et vertical.
- CFL : condition de stabilité de Courant Friedrichs-Levy.
- DTE : le pas de temps externe.
- DTI : le pas de temps internes.
- D_x , D_y : les pas de grilles.
- $D_{x\min}$, $D_{y\min}$, $D_{x\max}$, $D_{y\max}$: la largeur de maille minimale et maximale selon l'axe x et y .
- F_g : Force gravitationnelle appliquée sur un l'objet.
- F_C : facteur de Coriolis.
- F_f : force de frottement.
- g : Accélération gravitationnelle que subit l'objet sous.
- H_{\max} : profondeur maximale.
- Hycom: Hybrid Coordinate Ocean Model.
- ICOADS: The International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set Project.
- K : un vecteur unitaire.
- KPP : Schéma K-Profil Paramétrisation –KPP.
- l'influence de l'astre en chute libre (m/s^2).
- Leapfrog : saute-mouton.
- LL_m , MM_m : nombres de mailles sur l'horizontal et sur la verticale.
- m : Masse de l'objet qui subit la force (kg).
- Matlab: Matrice Laboratoire.
- Mothy : Modèle océanique de transport d'hydrocarbure.
- N : nombre constant de couches verticales entre le fond et la surface libre.
- NetCDF: Network Common Data Form.
- P : force de pression.
- P : la pression atmosphérique.
- POM: The Princeton Ocean Model.
- PP : Schéma Pacanowski&Philander –PP.
- Roms: Regional Ocean Modeling System.
- ROMSGUI : Graphical User Interface.
- S : la surface.
- S : la salinité.
- SCRUM: S-Coordinate Rutgers University Model.
- SPEM: Semi Spectral Primitive Equation Model.
- T : la température.

- Θ_s ; θ_b : Paramètres de contrôle de la surface libre et du fond.
- WOA : World Ocean Atlas.
- ρ : la masse volumique.
- ρ_0 : la masse volumique de référence.
- μ', v', w' : les composantes turbulentes de la vitesse.
- μ, v, w : composantes horizontales et verticale non turbulentes de la vitesse.

Liste des figures

Figure I. 1: principe de la spirale d'Ekman	2
Figure I.2: Principaux courants océaniques de surface	3
Figure I.3 : Force de Coriolis dans le repère terrestre.	5
Figure I.4 : Schéma explicatif de la force de frottement	6
Figure I.5 : Echanges atmosphère océan	6
Figure I.6 : formation des eaux profondes	7
Figure I.7: Principe du downwelling.	8
Figure I.8 : Principe de l'upwelling.	9
Figure II.1: différent type de modèles océaniques	14
Figure II.2: grille en coordonnées z	16
Figure II.3 : grille suivant la topographie	17
Figure II.4 : hybridation entre coordonnées sigma généralisées et z dans le modèle symphonie	17
Figure III.1 : grille Arakawa C	24
Figure III.2 : Schéma d'une grille Arakawa C sur l'horizontal	26
Figure III.3 : Schéma d'une grille en coordonnées σ	26
Figure IV.1 : localisation du golfe de Gabès (google earth, 2012).	39
Figure IV.2 : Diagnostique de la simulation.	41
Figure IV.3: Variabilité saisonnière des courants et des hauteurs d'eau	44
Figure.IV.4: Variation de la température (A: Janvier; B: Avril; C: Aout).	45
Figure IV.5: Variation de la salinité (A: Avril; B : Aout).	46
Figure IV.6 : profil de température (A : Janvier, B : Avril,C :Aout).	47
Figure IV.7 : profil de salinité (A : Janvier, B : Aout).	48

Liste des tableaux

Tableau.I.1 : Les principaux courants chauds, froids et polaires.....	3
Tableau II.1 : Tableau comparatif de différentes approches pour calculer les coefficients horizontaux de viscosité turbulente utilisés par exemple par les modèles océanographiques.....	20
Tableau II.2 : Tableau comparatif des différentes approches pour calculer le coefficient vertical de viscosité turbulente utilisé par exemple par les modèles océanographiques: POM, ROMS ou SYMPHONIE.....	21
Tableau III.1: Variables de sortie après simulation avec le modèle Roms.....	30
Tableau IV.1: Paramètres insérés dans romstools_param.m du petit modèle.....	42
Tableau IV.2 : La taille de la grille et les critères de stabilité CFL du petit modèle..	42
Tableau IV.3: Paramètres insérés dans romstools_param.m du grand modèle	42
Tableau IV.4: La taille de la grille et les critères de stabilité CFL du grand.....	43

Sommaire

Remerciement

Dédicace

Liste des acronymes

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction Générale

Chapitre I : Généralités

I.1. Introduction	1
I.2. La circulation superficielle.....	1
I.2.1. Action du vent sur l'océan	2
I.2.2 Les gyres océaniques	2
I.2.3 Les principaux courants.....	3
I.2.4 Les forces agissant sur la circulation superficielle	4
I.2.4.1 La force gravitationnelle.....	4
2.4.2. La force de pression	4
2.4.3 La force de Coriolis.....	4
2.4.4. Le frottement	5
I.3. La circulation profonde	6
I.4. Les phénomènes d'upwelling et de downwelling.....	7
Conclusion.....	9

Chapitre II: Equation de base et modélisation

Introduction	10
II.1. Rappel historique	10
II.2. Difficulté du problème.....	10
II.2.1. Les équations qui régissent l'océan	11
II.2.2. Modèles aux équations primitives.....	11
II.2.2.1 L'approximation hydrostatique.....	12
II.2.2.2. L'approximation de Boussinesq	12
II.2.2.3. L'hypothèse de l'incompressibilité	12
II.2.2.4. Le système d'équations primitives	12
II.2.2.5. Approche de Reynolds	13
II.3. Classes de modèles	13

II.3.1. Les coordonnées z	15
II.3.2. Les coordonnées sigma	15
II.3.3. Les coordonnées isopycnales	15
II.3.4. Les coordonnées hybrides	15
II.4. Coordonnées et grilles verticales	16
II.4.1. Grille cartésienne en coordonnée z :	16
II.4.2. Coordonnées suivant la topographie (<i>terrain following</i>)	16
II.5. Les modèles océaniques.....	18
II.5.1. Le modèle POM (The Princeton Ocean Model),	18
II.5.2. Le modèle Symphonie.....	18
II.5.3. Le modèle HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model).....	18
II.5.4. Le modèle Mothy (Modèle océanique de transport d'hydrocarbure)	19
II.5.5. Le modèle MOG3D.....	19
II.5.6. Le modèle ROMS (Regional Ocean Modeling System).....	19
II.6. Quelques différences entre les modèles.....	20
II.7. De la modélisation à la simulation numérique.....	21
Conclusion.....	22

Chapitre III: Modèle Roms et résolution numérique

Introduction	23
III.1. Présentation	23
III.2. Description du RomsTools	24
III.2.1. Grille de calcul.....	24
III.2.2. Système d'équation.....	25
III.2.2.1. Le mode barotrope	25
III.2.2.2. Le mode barocline.....	25
III.3. Discrétisation	25
III.3.1. Discrétisation spatiale	25
III.3.2. Discrétisation temporelle : Séparation des pas de temps (<i>Mode splitting</i>).....	26
III.4. Les données	27
III.5. Fermeture de la turbulence	27
III.5.1. Schéma Pacanowski&Philander –PP.....	27
III.5.2. Schéma K-Profil Paramétrisation –KPP	27
III.6. Condition de stabilité.....	27
III.6.1. Le critère CFL (Courant Friedrichs-Levy)	28
III.6.2. Les conditions aux limites	28

III.7. Utilisation de Roms	29
III.7.1. Pré-processing et Compilation	29
III.7.2. Exécution	29
III.7.3. Post-processing	30
III.7.3.1. Diagnostics.....	30
III.7.3.2. Roms GUI	30
III.7.4. Fonctionnement du modèle Roms	30
III.8. Protocole d'implémentation du modèle Roms	31
III.8.1. Fichiers paramètres	33
III.9. La création des fichiers de données pour une simulation.....	34
III.9.1. Les fichiers de données	34
III.9.2. La compilation des codes source de ROMS_AGRIF	34
III.9.3. Lancement d'une simulation	35
III.9.4. Les résultats	35
Conclusion.....	37

Chapitre IV: Résultats et interprétations

Introduction	39
IV.1. Le golfe de Gabès.....	39
IV.1.1. Caractéristiques générales	40
IV.1.2. La marée	40
IV.1.3. Les courants.....	40
IV.2. les Résultats.....	40
IV.2.1. Diagnostic du modèle	41
IV.2.2. Petit Modèle ($dl = \frac{1}{6}$)	42
IV.2.3. Grand Modèle ($dl = \frac{1}{10}$).....	42
IV.2.4. Variabilité saisonnières.....	43
IV.4.5. Température.....	45
IV.4.6. Salinité	46
IV.4.5.1. Profils de température.....	47
IV.4.6.1. Profil de salinité.....	48
Conclusion.....	49

Conclusion Générale

Bibliographie

Annexe

Introduction générale

La cartographie et la compréhension des océans ont été importantes dès le début de la navigation. Ainsi, dès la fin du 18^{ème} siècle, B. Franklin a fait des cartes du Gulf Stream (Kortum *et al.* 1996). La science évolue en fonction du temps, et dans tous les domaines, l'océanographie est apparue comme une science pluridisciplinaire, qui passe de la biologie, géologie, géographie... jusqu'à la physique, encore plus loin l'apparition des ordinateurs a permis le passage à des études numériques (informatisées), ou la modélisation un pas en avant au sens large. Cette dernière permet de faciliter la compréhension des phénomènes biologiques et physiques, prévoir l'évolution de ces phénomènes est accessible avec la modélisation. Ces dernières années plusieurs modèles numériques destinés à recréer la circulation et les conditions thermodynamiques de différents bassins océaniques ont vu le jour. La résolution des équations primitives permet de déterminer les vitesses et d'autres paramètres en chaque point du domaine modélisé. Dans notre projet pour modéliser le golfe de Gabès nous utilisons ROMS. ROMS est un modèle qui dispose de nombreuses données sur les forçages atmosphériques: le vent, la température et bien d'autres sur une période de plusieurs années. Il dispose également de la bathymétrie de tous les océans avec une résolution de 3 à 10 km, les données globales de la hauteur de la marée et des données sur les paramètres internes à la masse d'eau tels que la température de l'eau, sa salinité, l'oxygène dissous et d'autres paramètres utiles pour la biologie. Pour ses calculs le modèle utilise une grille décentrée de type Arakawa C avec, pour la profondeur, des coordonnées sigma, il utilise le time splitting qui sépare la résolution 2D et 3D car les ondes externes se propagent plus rapidement que les ondes internes, elles ont besoin de calcul plus précis dans le temps. Pour ne pas alourdir les calculs des ondes internes qui n'ont pas besoin d'une telle précision le modèle sépare les pas de temps. Les conditions initiales sont les courants géostrophiques, calculés par la méthode dynamique, à partir des données de salinité et température, ces conditions diminuent le spinup du modèle. Les conditions en surface sont les vitesses du vent, la pluviométrie et l'évaporation et le flux de chaleur net. Il utilise les conditions de Sommerfeld pour les frontières ouvertes. ROMS est un modèle régional, il peut être utilisé pour modéliser n'importe quelle zone voulue dans une limite de taille. La limite supérieure serait une zone de la taille de l'océan Atlantique Nord et la limite inférieure, une zone de 1 degré carré.

L'objectif de notre travail est d'avoir un protocole d'implémentation du code Roms et faire une application sur une zone de la côte tunisienne, c'est la zone comprise entre 9 et 15°E de latitude et 32 et 37°N de longitude du golfe de Gabès. Pour cela on a divisé notre travail en 4 chapitres :

Chapitres I : il contient des généralités sur la circulation océanique générale.

Chapitre II : nous avons vu un aperçu sur l'équation de base et modélisation.

Chapitre III : description détaillée du modèle Roms et résolution numérique.

Chapitre IV : visualisation des résultats de notre simulation.

I.1. Introduction

Plusieurs types de force sont mis en œuvre lorsqu'il s'agit de déplacer les eaux des océans. Leurs sources sont aussi diverses que la température, la densité, la salinité, les astres, l'attraction universelle, les radiations solaires ou la rotation de la Terre. Il y a des courants littoraux que l'on ressent près des côtes et des grands courants océaniques qui déplacent des masses d'eaux considérables à l'échelle de la terre. Cette circulation océanique peut être subdivisée en deux composantes: la circulation de surface et la circulation profonde. Des courants semblables se développent dans les océans; ces courants, influencés par la circulation atmosphérique, les densités différentes de l'eau (chaude et froide) et par la configuration des continents, contribuent au transfert horizontal d'énergie. Certains courants, chauds, partent des régions équatoriales et se dirigent vers les pôles; d'autres, froids, se déplacent en sens inverse.

I.2. La circulation superficielle

Les courants de surface sont le résultat d'une interaction entre l'océan et l'atmosphère. L'atmosphère exerce, par l'intermédiaire des vents, une force d'entraînement mécanique (force de frottement) sur les eaux de surface. Celles-ci sont donc poussées par les vents, mais selon une trajectoire déviée sur sa droite dans l'hémisphère Nord (ou sur sa gauche dans l'hémisphère Sud), en raison de la force de Coriolis. En effet, si cette force de frottement est équilibrée par la force de Coriolis, un courant de surface se crée à 45° à droite de la direction du vent dans l'hémisphère Nord (à gauche dans l'hémisphère Sud) (Coriolice G). Ce courant de surface entraîne à son tour la couche d'eau sous-jacente par frottement liquide, et ainsi de suite. Au cours de ce processus, le courant tourne en profondeur en s'écartant de la direction du vent. Une perte d'énergie se produit d'où la diminution de la vitesse du courant avec la profondeur. Ce mouvement d'ensemble de l'eau ou spirale d'Ekman est globalement dirigé à 90° à droite de la direction du vent dans l'hémisphère Nord, à gauche dans l'hémisphère Sud. La profondeur de la couche ainsi entraînée par le vent ou couche d'Ekman peut atteindre plusieurs dizaines de mètres.

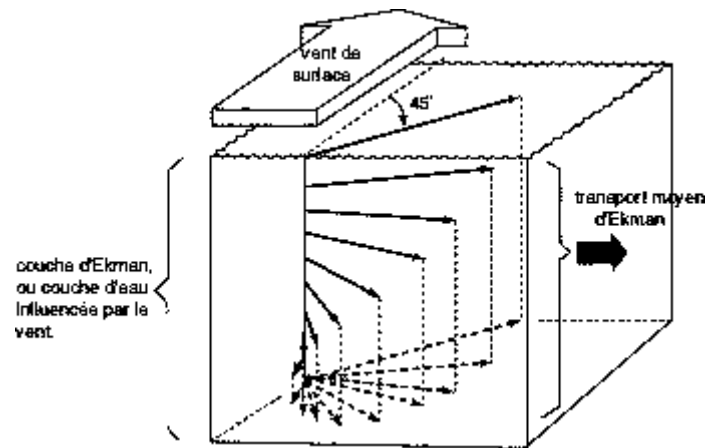


Figure I. 1: principe de la spirale d'Ekman. [1]

I.2.1. Action du vent sur l'océan

Ainsi, dans l'hémisphère nord, les courants poussés par les alizés (vents d'est de la zone intertropicale) sont déviés vers le nord, alors que les eaux des zones tempérées subissent l'influence des vents d'ouest et sont déviées vers le sud. Ainsi, dans l'hémisphère nord, la répartition globale des courants en surface des océans est la suivante :

- Dans les régions équatoriales et tropicales, les courants sont parallèles à l'équateur et aux tropiques ; ils sont dits zonaux ou latitudinaux
- Dans les régions tempérées, les courants décrivent de grands mouvements tournants appelés " gyres " ; ces gyres sont dits anticycloniques quand ils tournent dans le sens des aiguilles d'une montre (cas du Gulf Stream et de ses prolongements, la dérive nord-atlantique et le courant des Canaries)
- Aux latitudes élevées, les courants sont organisés en gyres cycloniques, qui tournent dans le sens inverse des aiguilles d'une montre (cas du courant du Labrador).

Les mouvements des gyres sont inverses dans l'hémisphère sud. La vitesse des courants de surface varie de quelques centimètres par seconde à plus de 2 m par seconde pour le Gulf Stream le long des côtes de la Floride.

I.2.2 Les gyres océaniques

Soumises à la force de Coriolis et limitées dans leur déplacement par les continents, les eaux de surface des océans subissent la poussée des vents. Le nombre des paramètres est petits, pourtant leurs effets sont multiples, et conduisent à une circulation superficielle constituée de cellules en rotation, de plusieurs milliers de km de diamètre, asymétriques en raison de l'action de la force de Coriolis.

I.2.3 Les principaux courants

Il y a différents types de courants, certains sont chauds et d'autres sont froids, certains sont équatoriaux et d'autres sont polaires. Dans le tableau et la figure ci-dessous, on cite les principaux courants qui existent sur notre planète :

Tableau.I.1 : Les principaux courants chauds, froids et polaires. [2]

courants chauds	courants froids	courants polaires
le Gulf Stream	le courant des Canaries	le courant du Labrador
le courant du Brésil	le courant de Benguela	le courant du Groenland
le Kouro-shivo	le courant de Californie	Le courant d'Oya-shivo (courant de Kamtchaka)
Le Courant d'Australie orientale	le courant d'Australie occidentale	le courant antarctique
le courant des Aiguilles	le courant du Pérou (Humboldt)	

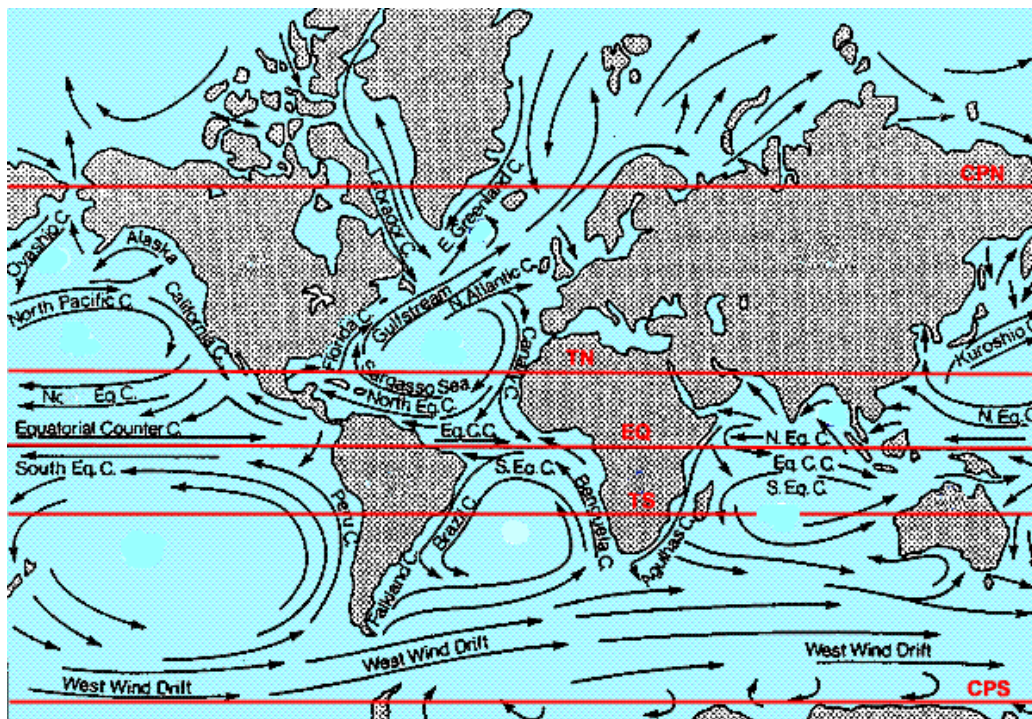


Figure I.2: Principaux courants océaniques de surface (d'après DUXBURY in DEGENS). [2]

I.2.4 Les forces agissant sur la circulation superficielle

On peut classer les forces qui agissent sur la circulation en deux classes, les forces primaires, qui provoquent le mouvement, et les forces secondaires, qui résultent du mouvement:

- Les forces primaires (ou actives): gravitation (force de volume), tension du vent et pression atmosphérique (forces de frontière).
- Les forces secondaires (ou passives): la force de Coriolis (due au mouvement du repère terrestre), les forces de frottement (qui tendent à s'opposer au mouvement).

I.2.4.1 La force gravitationnelle

La force gravitationnelle est une interaction physique qui cause une attraction entre des objets ayant une masse. Tout objet ayant une masse est attiré grâce à la force gravitationnelle vers les autres masses. Cette force d'attraction s'effectue à distance.

$$\vec{F}_g = m\vec{g}$$

Où

\vec{F}_g : Force gravitationnelle appliquée sur un l'objet

m : Masse de l'objet qui subit la force (kg)

\vec{g} : Accélération gravitationnelle que subit l'objet sous l'influence de l'astre en chute libre (m/s²).

2.4.2. La force de pression

La pression est une force par unité de surface. La pression hydrostatique réglant à la profondeur Z est due au poids de la colonne d'eau. \vec{S} i la masse volumique des eaux était la même à toute profondeur, on peut écrire :

$$\vec{P} = \frac{\text{force}}{\text{surface}} = \frac{\vec{F}}{S} \quad (\text{N/m}^2)$$

(Montégut .2008)

2.4.3 La force de Coriolis

A cause de la rotation de la terre, tout mouvement dans l'hémisphère Nord semblera se dévier vers la droite, si nous l'observons depuis la terre (dans l'hémisphère Sud

les mouvements sont déviés vers la gauche). On appelle cette force de déviation la force de Coriolis (Coriolis, 1792 - 1843). (Arnaud. D)

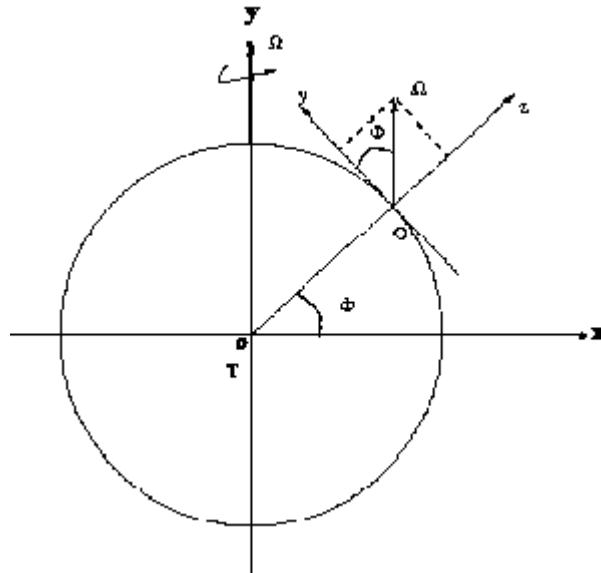


Figure I.3 : Force de Coriolis dans le repère terrestre. (Arnaud. D).

Le vecteur $2\vec{\Omega} \wedge \vec{V}$ projeté sur le repère terrestre a pour composantes :

selon Ox : $2\Omega \sin \phi v - 2\Omega \cos \phi w$

selon Oy : $-2\Omega \sin \phi u$

selon Oz : $2\Omega \cos \phi u$

On pose $f_c = -2\Omega \sin \phi$ et $f_c' = 2\Omega \cos \phi$

f_c est appelé facteur de Coriolis (deux fois la vitesse de rotation du plan tangent).
(Nathalie. D)

2.4.4. Le frottement

En écoulement laminaire, des couches de fluide de surface S glissent les unes sur les autres et produisent la force de frottement entre les couches qu'est due à la viscosité de fluide.

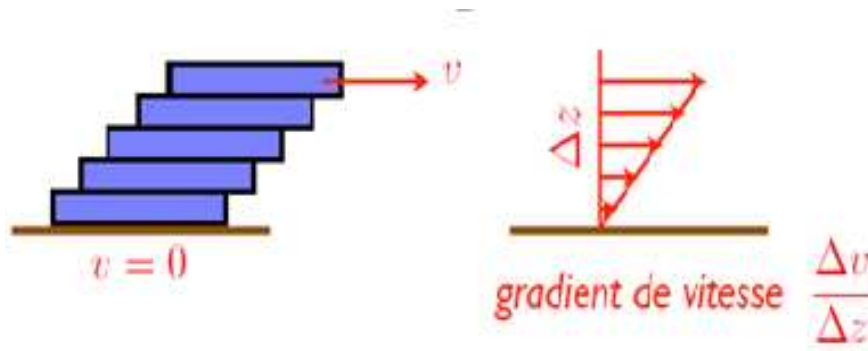


Figure I.4 : Schéma explicatif de la force de frottement [3]

La force de frottement s'exprime par l'expression suivante :

$$\vec{F}_f = \mu S \frac{\Delta v}{\Delta z} \quad (\text{N})$$

S : la surface (m^2)

μ : la viscosité

I.3. La circulation profonde

Le vent n'est pas le seul moteur de la circulation océanique. Les échanges de chaleur et d'eau à la surface des océans, qui vont agir sur la température et la salinité de l'eau, sont aussi moteurs de la circulation océanique.

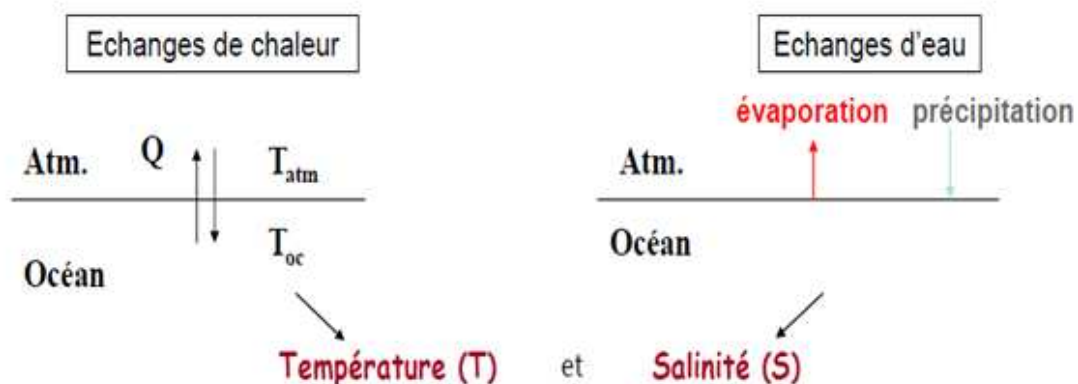


Figure I.5 : Echanges atmosphère océan (Katy 2010)

- L'eau froide et salée coule en profondeur dans les régions polaires.

- Les eaux froides se propagent le long des fonds océaniques dans tout l’océan global.
- L’eau de surface tropicale réchauffée en surface est séparée de l’eau profonde par la thermocline.
- L’eau froide remonte graduellement vers la surface en se réchauffant et se mélange avec l’eau de surface.

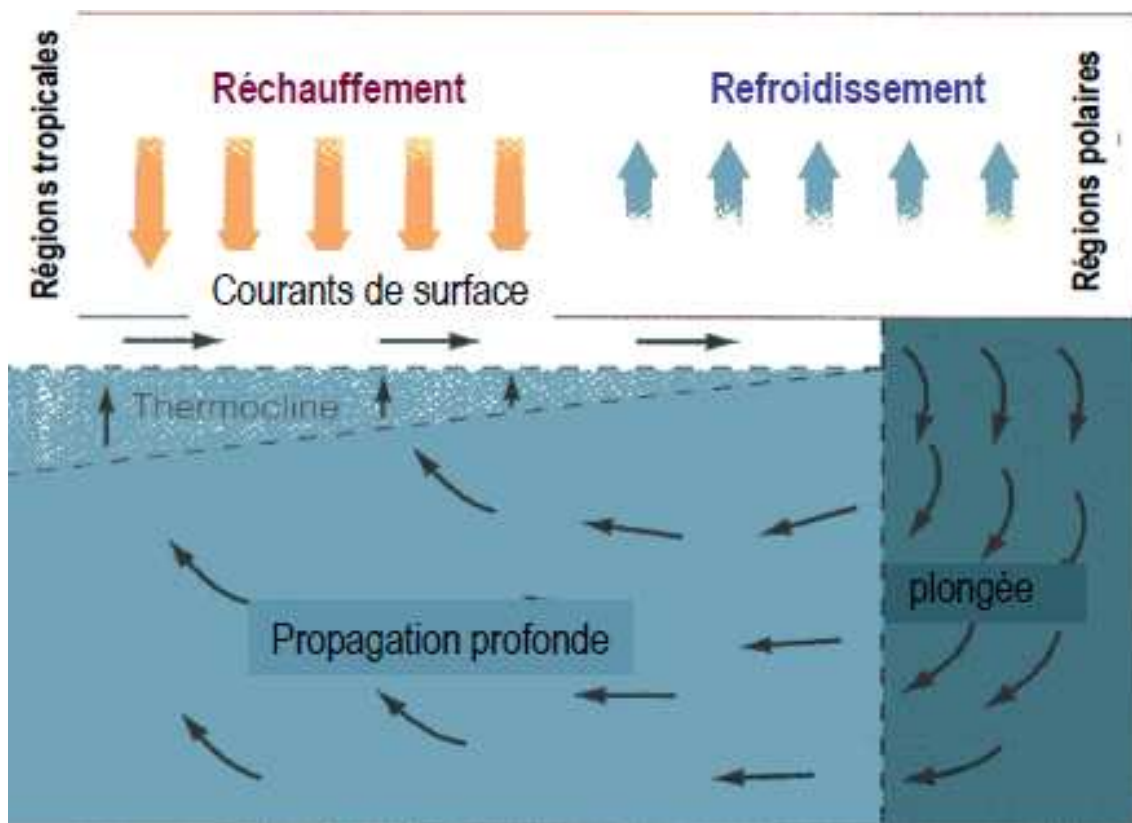


Figure I.6 : formation des eaux profondes (Katy, 2010) .

I.4. Les phénomènes d'upwelling et de downwelling

Les courants de surface rassemblent les eaux en des points de convergence où elles se mélangent et s'enfoncent en fonction de leur densité et forment les courants de downwelling.

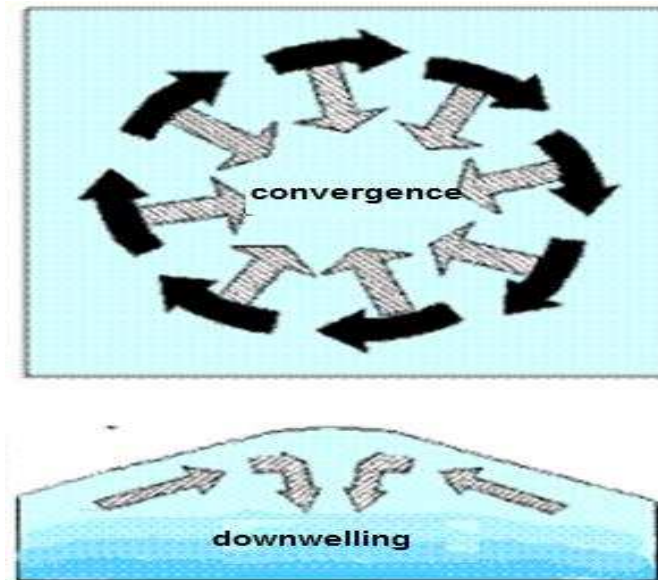


Figure I.7: Principe du downwelling. (Katy. 2010).

Les courants d'upwelling remontent en surface des eaux froides riches en éléments minéraux nutritifs et favorisent la prolifération du plancton et donc des poissons. C'est le cas des zones de pêche au large de l'Afrique nord-occidentale (Sénégal, Mauritanie). Ces eaux profondes sont enrichies en phosphore qui est un facteur limitant pour le développement des organismes. D'ailleurs, de grands gisements de phosphates sédimentaires sont mis en relation avec d'anciennes zones côtières approvisionnées par des courants d'upwelling (phosphates marocains).

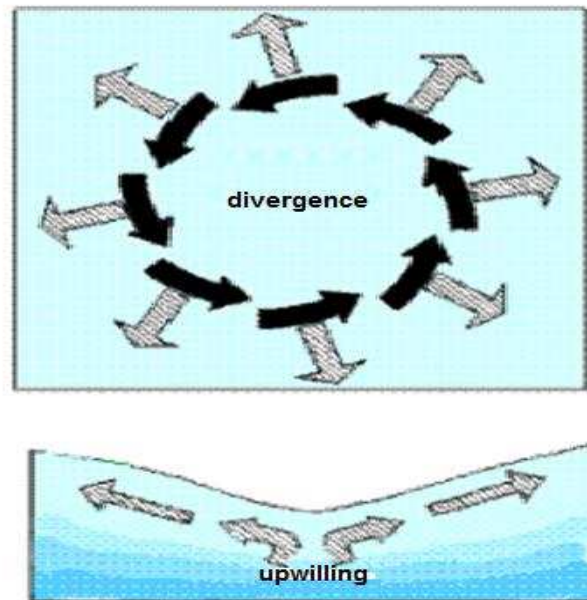


Figure I.8 : Principe de l'upwelling. (Katy ,2010)

Conclusion

La circulation océanique superficielle est différente de la circulation océanique profonde par le fait que la première est due essentiellement à l'interaction entre l'océan et l'atmosphère à l'intermédiaire du vent et elle se déplace horizontalement le long de la surface d'océan mondial, et la deuxième est créée par les variations de température et de salinité et se déplace le long des fonds océaniques. Ces différences ne disent pas qu'elles sont indépendantes l'une de l'autre car la circulation profonde est le résultat de la circulation superficielle.

Introduction

La modélisation de la circulation des masses d'eau est une science récente. Avec l'avènement de l'informatique, les calculs de Richardson (algorithme nécessitant un grand nombre de personnes pour prévoir la météo) ont pu être automatisés. Les modèles de prévision du temps sont alors effectifs. Les modèles océanographiques ont pu également voir le jour. Des problèmes techniques sont alors apparus et notamment la grande difficulté de la fermeture de la turbulence. En effet, pour obtenir des résultats numériques réalistes, la conception et la modélisation des échanges turbulents dans la colonne d'eau est primordiale. Au cours des années, différentes approches et différents schémas ont été édités et comparés à des mesures in situ. Les différents schémas sont validés selon les contextes physiques des zones modélisées.

Qu'est-ce qu'un modèle ?

Le principe d'un modèle est de remplacer un système complexe en un objet ou opérateur simple reproduisant les aspects ou comportements principaux de l'original (ex: modèle réduit, maquette, modèle mathématique ou numérique, modèle de pensée ou raisonnement).

Pourquoi faut-il modéliser ?

Dans la nature, les systèmes et phénomènes physiques les plus intéressants sont aussi les plus complexes à étudier par ce que la solution analytique est très difficile (presque impossible), nécessite du personnels et couteuse, ils sont souvent régis par un grand nombre de paramètres non-linéaires interagissant entre eux (la météorologie, la turbulence des fluides...). (Goncalves, 2005).

II.1. Rappel historique

La modélisation numérique tout comme pour beaucoup d'aspects de la physique, les développements en météorologie ont précédé ceux en océanographie. On attribue au météorologue V. Bjerkens l'idée de la prévision météo (dès 1940) : connaissant l'état du fluide (masse et vitesses) à l'instant t , on peut déterminer les états suivants en résolvant les équations hydrodynamiques. L'histoire de la modélisation en météorologie commence avec L.F.Richardson qui tenta le premier de prévoir un état ultérieur de l'atmosphère à partir d'observation de l'état actuel et des équations de la dynamique des fluides.

Le premier modèle océanique de circulation générale, utilisant les équations primitives, a été écrit en 1960 par K.Bryan(Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, à l'université de Princeton). Du fait des possibilités limitées des ordinateurs, les premières simulations ont porté sur des portions de bassins océaniques uniquement.

II.2. Difficulté du problème

Le recours à la modélisation numérique est nécessaire en mécanique des fluides en général, car les équations sont non linéaire et les interactions entre échelles sont importantes. Avant tout

l’océan est un système forcé par l’atmosphère, cela ne simplifie pas le calcul des solutions car les forçages (vent, flux de chaleur, glace, évaporation-précipitation) sont très variables dans le temps et dans l’espace, en plus la géométrie des côtes et de la topographie (bathymétrie) du fond de l’océan sont très complexes. Principalement deux éléments rendent la modélisation de l’océan beaucoup plus complexe et coûteuse que celle de l’atmosphère. Premièrement, le caractère fermé des bassins océaniques rend possible l’existence de courants de bord. Deuxièmement, l’océan est très grand par rapport à l’échelle spatiale fondamentale qu’est le rayon de déformation (1000 km dans l’atmosphère, et 3000 km environ dans l’océan). Or les mouvements à l’échelle du rayon de déformation sont ceux qui contiennent le plus d’énergie, et leur effet sur l’écoulement grande échelle est difficilement paramétrisable. Donc les progrès les plus importants des modèles d’océan ces 30 dernières années sont dus à l’augmentation de la puissance des calculateurs qui a rendu possible des modèles de grande emprise (globaux ou de bassin) à une résolution de plus élevée. (Tréguier, 2002).

II.2.1. Les équations qui régissent l’océan

La forme générale des équations de Navier-Stokes s’écrit :

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \vec{V} - \vec{g} - 2\Omega \wedge \vec{V} \dots \dots \dots (II.1)$$

$\frac{d\vec{V}}{dt}$: Accélération de la particule d’eau.

$\nu \nabla^2 \vec{V}$: Force de Friction.

$-\frac{1}{\rho} \nabla P$: Force de pression.

\vec{g} : Force de pesanteur.

$2\Omega \wedge \vec{V}$ Force de coriolis.

II.2.2. Modèles aux équations primitives

Il existe des nombreux modèles tridimensionnels basés sur les équations primitives comme par exemple SYMPHONIE, POM (The Princeton Ocean Model), et ROMS. Ces modèles résolvent les équations primitives de Navier-Stokes couplées avec des équations de conservation pour la température et la salinité, et l’équation d’état non-linéaire de l’UNESCO. Ces équations sont basées sur plusieurs hypothèses. (Kersale, 2010).

Les équations primitives sont utilisées pour la prévision météorologique numérique ainsi que la simulation numérique du climat. Elles sont utilisées également (avec les changements requis pour les différentes constantes) pour la simulation de la circulation des atmosphères des planètes et satellites planétaires telluriques (Mars, Vénus, Titan, Triton). Elles sont enfin utilisées, avec une équation d’état appropriée, pour la simulation numérique de la circulation océanique, le composant secondaire principal étant alors la salinité. Les équations dites

primitives, utilisées dans les modèles numériques de circulation atmosphérique et océanique, sont fondées sur les hypothèses suivantes :

- Le fluide est en équilibre hydrostatique.
 - Le fluide est contenu dans une surface sphérique de rayon a et d'épaisseur nulle.
- Cela n'empêche pas qu'il existe à l'intérieur du fluide une coordonnée verticale qui, du fait de l'hypothèse hydrostatique, peut être choisie comme étant la pression p .
- La composante horizontale de la force de Coriolis résultant du mouvement vertical est négligée (cette hypothèse est dite approximation traditionnelle).
 - La force des marées est négligeable. (Talagrand, 2012).

II.2.2.1 L'approximation hydrostatique

Vient directement de l'idée que les dimensions horizontales de l'océan sont beaucoup plus importantes que les dimensions verticales. On peut donc se représenter l'océan aux moyennes et grandes échelles comme une couche d'eau peu profonde. Ainsi l'équation de Navier-Stokes sur la verticale se simplifie; on ne conserve que les termes de l'équilibre hydrostatique. La vitesse verticale se déduira simplement de l'équation de continuité.

II.2.2.2. L'approximation de Boussinesq

Suppose que la densité de l'eau de mer varie peu dans l'espace et dans le temps autour d'une valeur moyenne. Cette hypothèse permet de négliger les variations de densité dans les équations de Navier-Stokes à l'exception du terme de gravité. L'équation de la densité selon Boussinesq s'écrit :

$$\rho \equiv \rho_0 + \rho'(x, y, z, t) \text{ avec } \rho' \ll \rho_0 \text{ (} 10^{-3} \text{)} \dots\dots\dots (II.2)$$

II.2.2.3. L'hypothèse de l'incompressibilité

Suppose que la masse volumique d'une parcelle de fluide ne varie pas avec la pression. La relation de continuité devient donc une condition de non divergence du champ de vitesse (Desbiolles, 2010).

II.2.2.4. Le système d'équations primitives

On peut maintenant exprimer dans un système d'équations qui découle de toutes les hypothèses citées précédemment (Mouvement, continuité, énergie, concentration d'énergie et équation d'état de l'eau de mer).

$$\frac{\partial u}{\partial t} + V \cdot \nabla u - f v = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + A_h \nabla_h^2 u + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \dots\dots\dots (II.3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + V \cdot \nabla v - f u = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + A_h \nabla_h^2 v + A_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \dots\dots\dots (II.4)$$

$$0 = \frac{\partial P}{\partial z} + \rho g \dots \dots \dots (II.5)$$

$$0 = \frac{\partial \mu}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \dots \dots \dots (II.6)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + V \cdot \nabla T = K_h \nabla_h^2 T + K_v \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \dots \dots \dots (II.7)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + V \cdot \nabla S = K_h \nabla_h^2 S + K_v \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \dots \dots \dots (II.8)$$

$$\rho = \rho(T, S, z) \dots \dots \dots (II.9)$$

II.2.2.5. Approche de Reynolds

Les écoulements dans l'océan sont généralement turbulents, surtout dans les couches de surface et de fond. Si la notion de couche limite a résolu la continuité des variables sur toute la colonne d'eau, il reste toujours la difficulté d'exprimer ces termes dans les équations. En prenant en compte la condition d'ergodicité, il est possible d'utiliser l'approche de Reynolds. Cette méthode consiste à penser que les équations du mouvement et de continuité non plus comme un écoulement instantané mais comme un écoulement moyen bien défini. Chaque variable sera alors définie comme la somme de sa valeur moyenne et de sa fluctuation (Desbiolles, 2010).

II.3. Classes de modèles

Les modèles se distinguent d'abord par leur système d'équation, puis leurs discrétisations. Les équations quasi-géostrophiques sont permises les premières études de la turbulence océanique d'échelle moyenne dans les années 1970. Ces équations sont toujours la base de la modélisation de la turbulence géostrophique, quoique des systèmes d'équations plus précis (modèles intermédiaires) soient développés.

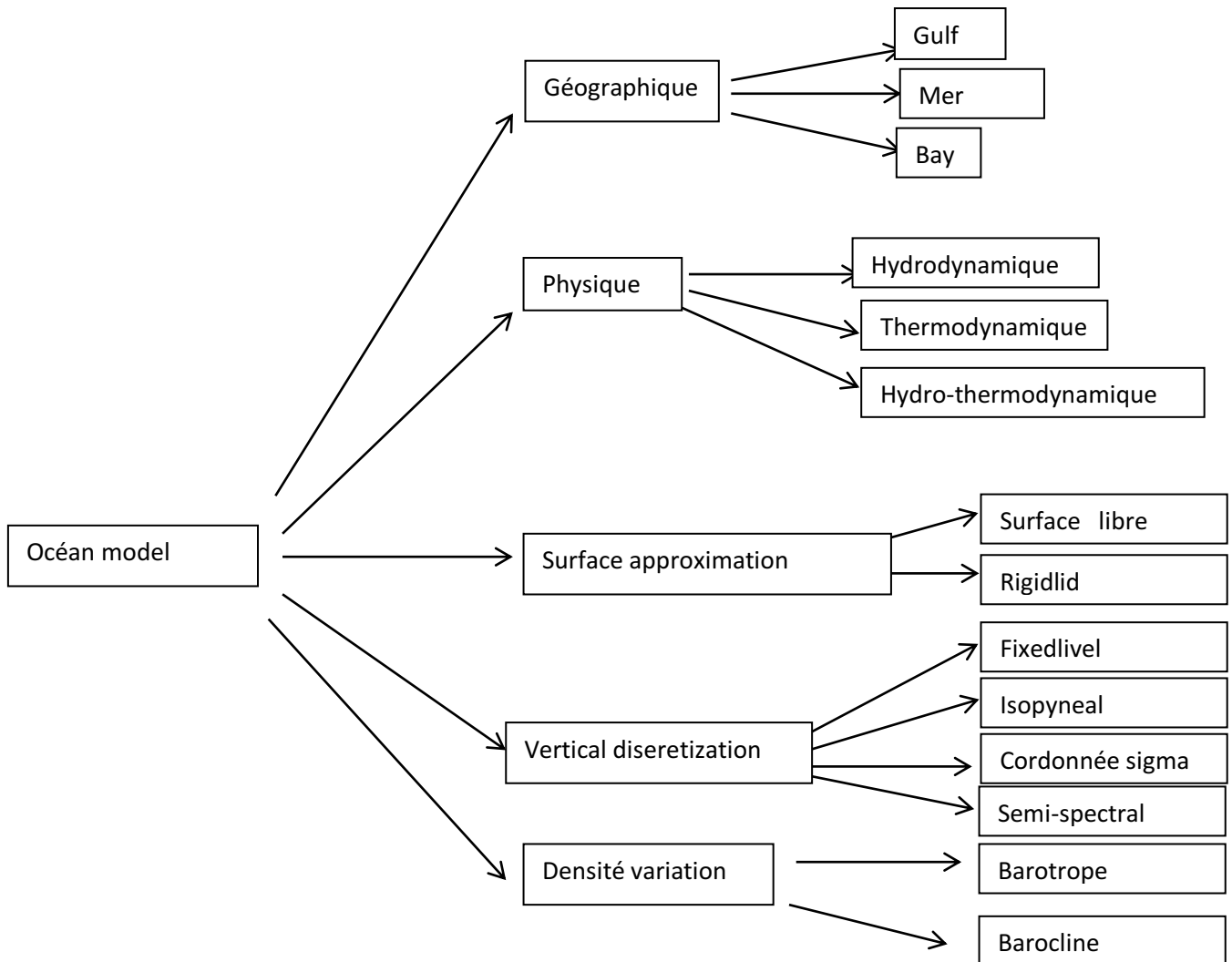


Figure II.1: différent type de modèles océaniques [4].

La plupart des modèles d'océan utilisent les équations primitives (équations de Navier-Stokes en fluide stratifié, avec l'approximation hydrostatique et de Boussinesq). Les variantes les plus importantes (en terme d'utilisation) concernent le système de coordonnées verticales. On peut classer les modèles en trois familles :

A. Modèle en coordonnée verticale « Z ».

B. Modèles en coordonnée « sigma » telle que la topographie du fond constitue une ligne de coordonnées, cette deuxième famille est la plus répandue dans les modèles côtiers.

C. Modèles en coordonnée isopycnes et plus récemment hybrides entre coordonnée isopycnes et « Z » (Tréguier, 2002).

II.3.1. Les coordonnées z

La coordonnée la plus simple est z , la distance à la surface de l'océan. Cette coordonnée est particulièrement adaptée à la paramétrisation de la couche de mélange, mais ne représente pas correctement l'advection de traceurs et la diffusion le long d'une surface de densité constante dans l'océan profond d'une part et les effets de la topographie du fond d'autre part.

II.3.2. Les coordonnées σ

Elle est définie comme : $\sigma = \frac{z - \eta}{H + \eta}$ ou $\eta(x, y, t)$ est le déplacement de la surface de l'océan par rapport à sa position de repos $z = 0$, et $z = -H(x, y)$ est le fond de l'océan. Il est à noter que $\sigma = 0$ à la surface et $\sigma = 1$ au fond. La topographie du fond est bien représentée grâce à ces coordonnées, mais, par contre, elle a le même défaut dans la représentation des processus de diffusion et d'advection dans l'océan profond que les coordonnées z . Par ailleurs, cette coordonnée présente un problème de précision pour le calcul des gradients de pression qui entraîne un lissage des forts gradients topographiques.

II.3.3. Les coordonnées isopycnales

Les coordonnées isopycnales ou ρ constituent le deuxième choix. L'écriture des équations revient alors à un système où la discrétisation verticale correspond à des couches de densité constante. Pour ce genre de coordonnées, les phénomènes de transport de traceurs dans l'océan profond sont particulièrement bien représentés, ainsi que la topographie du fond. Toutefois, les coordonnées isopycnales sont inadaptées à la représentation de la couche de mélange, celle-ci étant non stratifiée. Par ailleurs, le coût des schémas est légèrement plus élevé que dans un système de coordonnées z .

II.3.4. Les coordonnées hybrides

La plupart des modèles de circulation générale océanique utilisent une seule coordonnée verticale mais plusieurs travaux tels que DYNAMO (DYNAMO (1997)) et DAMEE (Chassignet et al. (2000)) ont montré qu'aucune des coordonnées verticales ne peut être optimale utilisée seule en chaque endroit de l'océan. Afin d'accumuler les avantages des types de coordonnées présentes précédemment, il est possible de définir un système hybride :

- Dans la couche de mélange, où une résolution importante est nécessaire afin de bien distribuer les flux de surface, les coordonnées z sont choisies ;
- Dans l'océan profond, afin de représenter correctement processus adiabatiques, les coordonnées isopycnales sont préférées ;
- Au fond et dans les zones peu profondes, la coordonnée σ est appliquée. (Renaudie, 2009).

II.4. Coordonnées et grilles verticales

II.4.1. Grille cartésienne en coordonnée z :

Il s'agit de la grille la plus simple.

Avantage

Comportement robuste et diffusion numérique (horizontale) qui tend vers une stratification sans vent thermique.

Désavantage

Mauvaise résolution de la topographie (par marches) surtout pour les pentes faibles en grande profondeur ou le Δz est largement supérieure aux variations de h entre deux points de grille. Beaucoup de points de la grille sont inutilisés.

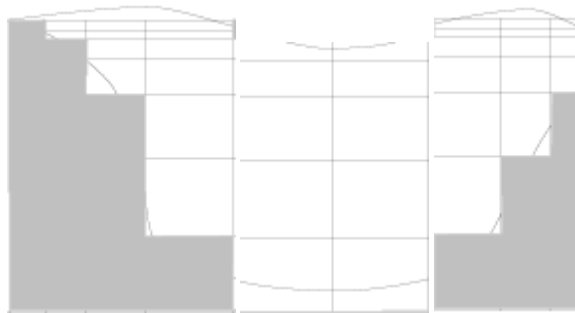


Figure II.2: grille en coordonnée Z (Doglioli, 2012).

II.4.2. Coordonnées suivant la topographie (*terrain following*)

Le désir d'améliorer la résolution de la topographie a mène à l'utilisation des grilles numériques qui s'intègrent harmonieusement a la forme irrégulière du domaine modèle. Cela a conduit à la fois dans la météorologie et dans l'océanographie, a des modèles avec coordonnées curvilignes en verticale. Comme vu pour l'horizontale, les transformations de coordonnées mène à un domaine de calcul rectangulaire. Cela assure une utilisation efficace des ressources de l'ordinateur, puisque tous les points de la grille se situent dans le fluide. Les coordonnées suivant la topographie (*terrain following*) ont d'abord été introduites dans la modélisation atmosphérique (Phillips, 1957), depuis sont devenu une alternative standard dans la modélisation de l'océan. Un modèle d'océan qui utilise un suivi de terrain coordonné verticale est SPEM (S-Coordinate Primitive Equation Model), initialement développe par Haidvogel et al. (1991) pour les études de processus à haute résolution.

Avantage

- Bonne représentation de la vraie topographie.
- Bonne résolution verticale et incorporation de surface libre.

Désavantage

Changements rapides de Δz et lignes de la grille très raides menant a des intersections avec les gradients de densité (diffusion de la thermocline par effets numériques et apparition d'une erreur sur la gradient de pression (qui est horizontal) (Doglioli, 2012).

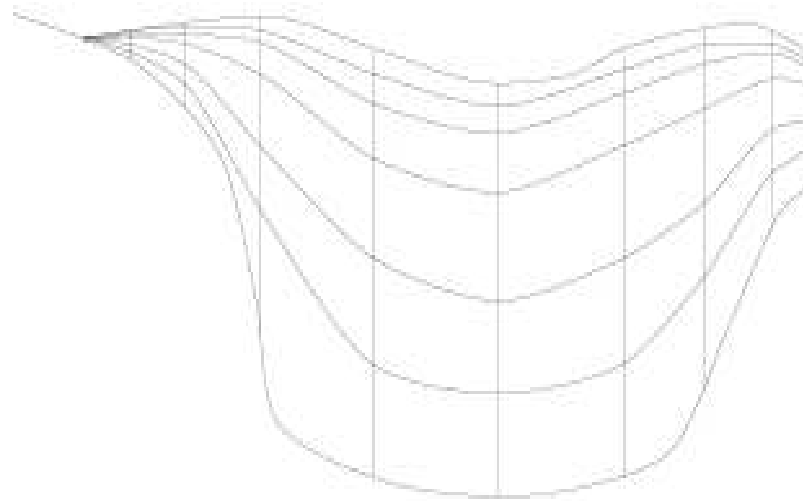


Figure II.3 : grille suivant la topographie (Doglioli, 2012).

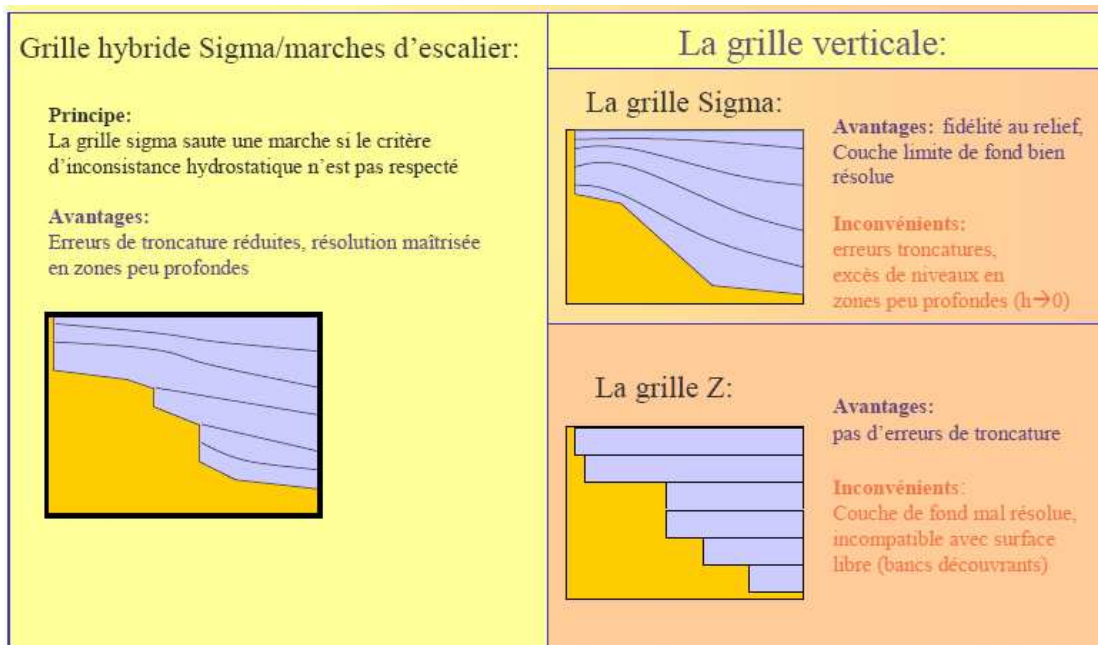


Figure II.4 : hybridation entre coordonnées sigma généralisées et z dans le modèle symphonie [5].

II.5. Les modèles océaniques

Plusieurs modèles numériques régionaux sont utilisés en océanographie comme par exemple POM (The Princeton Ocean Model), ROMS (Regional Oceanic Modeling System) et SYMPHONIE. Les conditions, posées par le modélisateur, telles que le maillage (la résolution), les conditions aux limites et les conditions initiales, appliquées aux équations de Navier-Stokes (équations de la conservation de la quantité de mouvement) permettent d'obtenir des résultats de température, de salinité, de vitesses et de direction des différentes composantes des écoulements distribués, selon la résolution et la maille choisie, sur le domaine de calculs.

II.5.1. Le modèle POM (The Princeton Ocean Model),

Le modèle océanique de Princeton (connu sous l'acronyme POM), et tire son nom du groupe qui l'a développé. Il est entièrement tridimensionnelle (3D), résolvant l'ensemble des équations pour un fluide. De plus, il a une surface libre et prend en considération l'évolution des paramètres physiques fondamentaux (la température et salinité). C'est un modèle en coordonnée sigma, c'est-à-dire que la coordonnée verticale du modèle POM suit la bathymétrie fondamentale, le rendant idéal pour l'étude des régions qui ont des domaines multiples connexes et des changements rapides de profondeur. Vu que c'est un modèle à surface libre, il peut également manipuler correctement le débit provenant des fleuves et la circulation estuarienne. Ce modèle prend aussi en compte le débit induit par la marée. [6]

II.5.2. Le modèle Symphonie

C'est un modèle aux équations primitives à surface libre, développé au Laboratoire d'Aérodynamique de Toulouse par P. Marsaleix et C. Estournel (Estournel et al. 1997; Marsaleix et al. 2006). La discrétisation verticale consiste en un système de coordonnées sigma. La résolution est de 43 niveaux verticaux et de 3 km en longitude et latitude. Le domaine d'intégration s'étend de 43N à 50N et de 10.5W à 0.5W. Les champs utilisés pour forcer le modèle aux frontières sont issus de la simulation 'PSY2v1' de MERCATOR (modèle d'océan au 1/15° dans l'Atlantique Nord avec assimilation de données altimétriques). Les sorties du modèle sont au format NetCDF. Elles contiennent les champs de salinité, de températures, les vitesses horizontales Est-Ouest (u) et Nord-Sud(v), ainsi que la surélévation de la surface libre; Pour la modélisation, il utilise sur l'horizontale les équations de Navier-Stokes, en tenant compte des hypothèses de Boussinesq (variation de la masse volumique négligeable) et d'incompressibilité, et se place dans le cas d'un écoulement moyenné (décomposition de Reynolds). Sur la verticale, il se base sur les équations de l'équilibre hydrostatique. (Herbert, 2007/2008).

II.5.3. Le modèle HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model)

C'est un modèle en « Coordonnée verticale hybride », ce qui signifie que la grille de calcul peut être adaptée à chaque instant à la configuration de la zone et aux phénomènes physiques qu'on veut représenter. En particulier, cette grille évolutive peut s'adapter aux régions de fortes

variations de densité. Cette propriété est particulièrement utile pour la modélisation d'un certain nombre de processus océaniques de fort intérêt, comme par exemple :

- la dynamique des fronts thermohalins (panaches de fleuves, fronts de marée, upwellings et autres courants de bord) ;

- la représentation des tourbillons océaniques ;
- le passage des talus et la transition hauturier/côtier ;
- la représentation des thermoclines très marquées (Morel et al, 2004).

II.5.4. Le modèle Mothy (Modèle océanique de transport d'hydrocarbure)

C'est un modèle double, constitué d'un modèle d'océan, développé pour représenter le mieux possible le courant de surface, et d'un modèle de nappe. Le modèle Mothy considère une nappe d'hydrocarbures comme étant composée d'un ensemble de particules indépendantes, des « gouttelettes » de diamètre différent. La version actuelle du modèle prend en compte 480 gouttes dont les diamètres varient de 0,3 à 1,3 mm, selon une distribution adaptée au type de polluant. Chaque particule a un mouvement horizontal sous l'effet du courant et de la diffusion turbulente, et un mouvement vertical sous l'effet de la flottabilité et de la diffusion turbulente (Hontarrède, 2000).

II.5.5. Le modèle MOG3D

Un modèle tridimensionnel aux volumes finis. Les grilles sont irrégulières dans l'horizontale et utilisent des éléments triangulaires, ce qui permet une résolution spatiale entièrement variable dans le plan horizontal suivant les besoins de l'application. Ainsi, la résolution peut être augmentée à l'aplomb des obstacles topographiques d'intérêt majeur, des zones de fronts océaniques ou dans les zones côtières. Dans la dimension verticale, le modèle utilise une grille structurée suivant une coordonnée sigma. Un apport significatif apporte au code pour les besoins du LEGOS et de l'institut océanographique de Bedford du Canada (BIO) a été de transformer cette coordonnée sigma en coordonnée sigma généralisée, ce qui permet de faire varier horizontalement l'épaisseur sigma de couches en fonction des besoins (garder l'épaisseur des couches de fond ou de surface constante ou maintenir le plus horizontale possible les premières couches de subsurface). Un autre apport important a été d'introduire les marées, les potentiels astronomiques et les potentiels de charge selon la méthodologie employée dans MOG2D (Carrere and Lyard [2003]). Ce modèle est choisi pour simuler les marées et les ondes internes dans la Méditerranée (Couvelard, 2004).

II.5.6. Le modèle ROMS (Regional Ocean Modeling System)

Le modèle ROMS est un modèle 3D qui utilise un schéma aux différences finies. Il est fondé sur la résolution des équations primitives de Navier Stokes qui permettent le calcul des courants, de la température, de la salinité et de l'élévation de la surface libre en utilisant les approximations hydrostatiques, de Boussinesq et d'incompressibilité. Les équations primitives sont appliquées sur un maillage tridimensionnel orthogonal et curviligne sur la sphère. La discrétisation sur la verticale utilise les coordonnées sigma, indépendantes de la profondeur (entre 0 et 1), qui suivent la topographie du fond. L'épaisseur entre chaque niveau est donc

variable. La résolution se fait par séparation de mode. Un modèle 2D de surface est couplé au modèle 3D selon un système prédiction-correction afin de considérer séparément les ondes de gravité de surface et les ondes internes. Les ondes externes sont plus rapides, la résolution des équations intégrées sur la verticale nécessite donc un plus petit pas de temps pour respecter le critère de stabilité. La température, la salinité et la concentration d'un traceur quelconque sont calculées en résolvant l'équation de conservation de la masse, de la chaleur ou de la salinité (Douillet et al, 2004).

Il existe d'autres modèles de référence utilisations et dans différents domaines comme par exemple : ORCA2, NPZD, NEMO,...etc.

II.6. Quelques différences entre les modèles

Les modèles régionaux les plus utilisés en océanographie (POM, ROMS et SYMPHONIE) sont différenciés par les différentes approches de "fermeture" de la turbulence, c'est-à-dire l'ajout d'équations de fermeture aux termes turbulents. POM, ROMS et SYMPHONIE utilisent ainsi trois hypothèses différentes à la fois pour la résolution des coefficients de viscosité turbulente horizontaux (A_h , A_x et A_y) (Tableau. II. 1) et verticaux (A_z) (Tableau. II. 2).

Tableau II.1 : Tableau comparatif de différentes approches pour calculer les coefficients horizontaux de viscosité turbulente utilisés par exemple par les modèles océanographiques (Rimaud, 2010).

Modèles	Hypothèses
POM	Formule basée sur les gradients de vitesse (Smagorinski, 1963): $A = c\Delta x\Delta y \frac{1}{2} \nabla\vec{u} + (\nabla\vec{u})^t \quad \text{avec } \nabla\vec{u} + (\nabla\vec{u})^t = \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \frac{1}{2} \left(\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right) \right)^2 \right]^{1/2}$
ROMS	Hypothèse de turbulence horizontale isotrope: $A_h = A_x = A_y$
SYMPHONIE	Le coefficient de viscosité horizontale turbulente dépend de la taille de la maille de la grille et généralement fixé à 5 m ² .s ⁻¹ pour une maille de 1 km x 1 km.

Tableau II.2 : Tableau comparatif des différentes approches pour calculer le coefficient vertical de viscosité turbulente utilisé par exemple par les modèles océanographiques: POM, ROMS ou SYMPHONIE (Rimaud, 2010).

<p>Modèles POM</p>	<p>Hypothèses Approche par l'énergie cinétique (Q) (équation pronostique) et par la longueur de mélange (L) (Mellor et Yamada, 1974):</p> $A_z = Q L S_M$ $A_z^{tr} = Q L S_H$ $A_z^Q = Q L (0.41 S_H)$
<p>ROMS</p>	<p>Approche par l'énergie cinétique (Mellor et Yamada, 1974) Ou Approche K-Profil: (Pacanowski et Philander, 1981) basé sur le cisaillement des courants:</p> $A_z = \frac{\nu_o}{(1 + \alpha Ri)^n} + \nu_b Ri = \frac{\beta g T(z)}{u^2(z) + v^2(z)}$ <p>(Large et al. 1994) basé sur le KPP, <i>K-profil parameterization</i></p>
<p>SYMPHONIE</p>	<p>Approche sur l'énergie cinétique (Q) (Gaspart et al. 1990):</p> $A_z = C_Q L Q^{1/2} \quad Q = \frac{1}{2} (u'^2 + v'^2 + w'^2)$ $\frac{\partial Q}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} Q = A_z \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{g}{\rho_0} A_z \frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_z \frac{\partial Q}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_h \frac{\partial Q}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_h \frac{\partial Q}{\partial y} \right) - \epsilon$

II.7. De la modélisation à la simulation numérique

Les différentes étapes pour modéliser un système complexe :

- Recherche d'un modèle mathématique représentant la physique : Mise en équation.
- Elaboration d'un maillage : Discrétisation des équations de la physique.
- Résolution des équations discrètes (souvent systèmes linéaires à résoudre).
- Transcription informatique et programmation des relations discrètes.
- Simulation numérique et exploitation des résultats (Goncalves, 2005).

Conclusion

Les modèles de circulation régionale océanique sont des outils intéressants à de nombreux égards : courantologie, études d'impacts anthropiques (transports sédimentaires, pollutions...), biogéochimie et écosystèmes marins, variabilité climatique... Le développement de tels outils requiert l'association de compétences géophysiques, mathématiques et numériques. Un certain nombre de difficultés actuelles sont notamment liées à la problématique du couplage : conditions de frontière ouverte, interactions dans des modèles multi-résolutions et multi-physiques, couplage océan-atmosphère, assimilation de données dans les systèmes couplés...

Introduction

Le modèle numérique Roms est un modèle 3D qui permet le calcul des variables physiques de l'océan (Température, salinité, vitesse des courants, transport, élévation du niveau de la mer. Ce modèle fait partie des modèles numériques « nouvelle génération » utilisant des schémas numériques ainsi que des paramétrisations de qualité. Ce modèle résout les équations primitives de Navier-Stokes couplées avec des équations de conservation pour la température et la salinité, et l'équation d'état de l'eau de mer. Cette résolution permet de connaître l'évolution temporelle (prédiction) de ces variables physiques. Des hypothèses de simplification sont indispensables pour résoudre un tel système d'équation, la résolution de ce système nécessite une base de données, une discrétisation temporelle et spatiale de calcul, une connaissance des conditions initiales et des conditions aux limites de ces champs physiques en tout point du domaine modélisé. Tous ces points intéressants seront détaillés dans les paragraphes suivants.

III.1. Présentation

Roms « Regional Oceanic Modeling System » est un code numérique résolvant les équations de la mécanique des Fluides Géophysiques suivant les approximations de Boussinesq, hydrostatique et d'incompressibilité. Roms est un modèle tridimensionnel qui permet le calcul des variables physiques de l'océan dont la température, la salinité, les vitesses de déplacement, l'élévation de la surface libre mais aussi des variables dérivées comme l'énergie cinétique, la densité, la vorticité, la fonction courant... Ce modèle fait partie des modèles numériques « nouvelle génération » utilisant des schémas numériques ainsi que des paramétrisations de qualité. L'ancêtre de Roms est un code appelé SPEM (Semi Spectral Primitive Equation Model). Il a été développé à l'université de Rutgers par Haidvogel (1991), et se caractérise par l'hypothèse du toit rigide et des coordonnées sigma classiques. Song and Haidvogel (1994) ont ensuite développé une version plus élaborée appelée SCRUM (S-Coordinate Rutgers University Model) qui intègre une surface libre et des coordonnées verticales sigma généralisées permettant d'augmenter la résolution verticale en surface et au fond. Ce qui permet à la fois de mieux représenter les couches de mélanges de surface et du fond mais également de rendre plus horizontaux les niveaux supérieurs, amenant à une résolution homogène dans la couche de surface. Depuis une dizaine d'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 (celle-ci allant de la circulation côtière, pour laquelle il a été initialement conçu, jusqu'à la circulation en Bassin), que dans les moyens mis en œuvre (outils de pré et post processing ; Roms Tools). Il offre la possibilité de déployer des traceurs passifs, des flotteurs lagrangiens et des mouillages numériques. A ceci s'ajoute la possibilité d'intégrer des modules de disciplines dépendantes de l'hydrodynamique telle que la biologie, la sédimentologie ou la biogéochimie. (Couvelard, 2007). On peut résumer les principaux caractéristiques du Roms dans les points suivants :

- Modèle hydrostatique aux équations primitives.
- Coordonnées verticales de type sigma généralisées.

- Coordonnées horizontales curvilignes.
- Conditions de frontières ouvertes.
- Assimilation de données et système de prévision.
- Assimilation de données et système de prévision.
- Portabilité su système (de PC à Earth Simulator).
- Schémas numériques d'ordre élevés avec faible dispersion numérique.
- Partitionnement du calcul en sous-domaine.
- Optimisation pour le calcul vectoriel.
- Parallélisassions OMP et MPI.

III.2. Description du RomsTools

Roms_Tools est un programme qui permet de modéliser n'importe quel endroit des océans de la planète. Pour cela différentes techniques de modélisation sont utilisées et différents paramètres doivent être rentrés dans le programme. (Morisset, 2007). Le Romstools est formés de plusieurs scripts qui sont des sous-programmes intermédiaire pour le calcul, tel que : romstools_param.m, param.h, make_grid, roms.in....etc.

III.2.1. Grille de calcul

Le modèle Roms utilise la méthode du time splitting pour faire tourner le modèle. Cette méthode consiste à séparer le calcul en deux parties : mode interne et externe. Roms utilise un pré-compilateur en langage C pour activer les diverses options physiques et numériques. De plus, le modèle contient des logiciels pour permettre l'analyse, le tracer et la visualisation des données obtenues lors de la simulation. Le logiciel NetCDF (Network Common Data Form) permet la mise en relation des différentes données. La discrétisation horizontale se fait grâce à la grille C d'Arakawa qui se comporte mieux aux résolutions spatiales et optimise mieux la conservation de la masse (Supplien, 2010/2011).

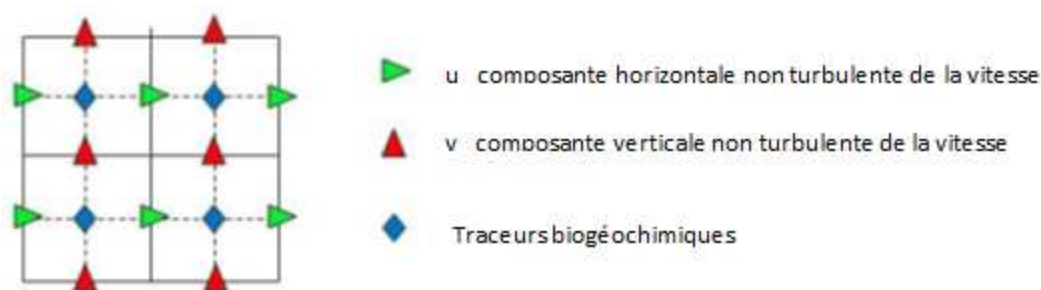


Figure III.1 : grille Arakawa C (Mathias, 2006).

La dimension de la grille représente la zone de modélisation. Pour la définir il faut modifier le script `romstools_param.m` ainsi que le script `param.h` dans le dossier `Run`. La longitude max et min et la latitude max et min doivent alors être modifiés en degré. La résolution horizontale doit être également modifiée dans le même script (elle s'exprime également en degré). Cette résolution ne sera pas constante, en effet, Roms le fait varier plus ou moins selon la bathymétrie. Ensuite il faut définir le nombre de niveau horizontal de la grille pour les calculs baroclines car le modèle fonctionne avec la technique appelée 'S-Coordinate model'. Après avoir choisi cela il faut exécuter `make_grid`. La grille peut être alors visualisée par l'utilisateur qui doit ensuite choisir les zones de la grille devant être non immergées (Morisset, 2007).

III.2.2. Système d'équation

Roms résout dans les trois dimensions les équations primitives basées sur l'approximation de Boussinesq et sur l'équilibre hydrostatique.

Cependant, les équations ne sont pas résolues dans les trois dimensions à chaque pas de temps. En effet, il existe deux modes :

III.2.2.1. Le mode barotrope

Qui résout les équations seulement sur l'horizontal (intégration sur la verticale) ce qui permet une forte résolution temporelle et un gain de temps sur la durée de simulation (pas de temps barotrope = Δt_c).

III.2.2.2. Le mode barocline

Qui résout les équations dans les 3 dimensions. Ce mode est moins utilisé que le mode barotrope. Ces deux pas de temps ainsi que le nombre d'itération doivent être définis dans `roms.in`. Ensuite, pour définir les conditions aux frontières, il faut définir si les frontières du modèle sont ouvertes ou fermées. Ceci se fait dans le script `romstools_param.m`. Une fois cela enregistré, Roms choisit ensuite automatiquement, pendant la simulation, entre différentes équations de frontière qui lui semble le mieux adapté (Morisset, 2007).

III.3. Discrétisation

La discrétisation consiste à représenter un champ continu par ses valeurs en des points choisis dans l'espace et le temps. Les schémas numériques de discrétisations les plus utilisés en mécanique des fluides sont les différences finies, les éléments finis et les volumes finis. Il en existe d'autres méthodes spectrales. (Vivien, 2008).

III.3.1. Discrétisation spatiale

Sur l'horizontale, le modèle est écrit en coordonnées curvilignes, ce qui permet de définir précisément les frontières, et donne la possibilité de choisir une résolution spatiale précise aux endroits voulus. L'horizontale et la verticale utilisent des schémas aux différences finies sur des grilles décalées. Sur l'horizontale, la grille C d'Arakawa est adoptée (Kersale, 2010).

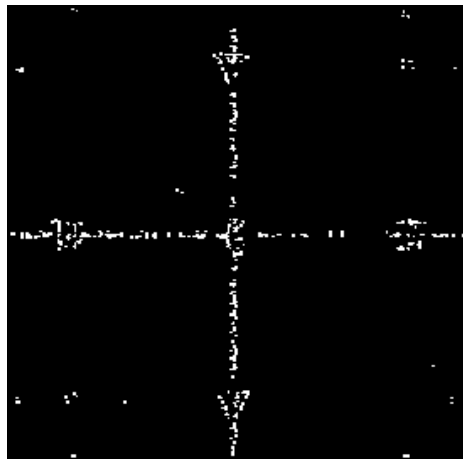


Figure III.2 : Schéma d'une grille Arakawa C sur l'horizontal (Kersale, 2010).

Sur la verticale, le modèle utilise des coordonnées sigma. Ce type de modèle présente des niveaux qui suivent la topographie. Pour ce type de grille σ , l'un des principaux avantages est d'avoir toujours le même nombre de niveaux verticaux quelle que soit la bathymétrie. En domaine peu profond, ces niveaux verticaux sont implicitement resserrés et conduisent donc à une bonne résolution verticale. De plus comme ces niveaux suivent le terrain, nous avons également une bonne résolution de la couche limite de fond (Kersale, 2010).

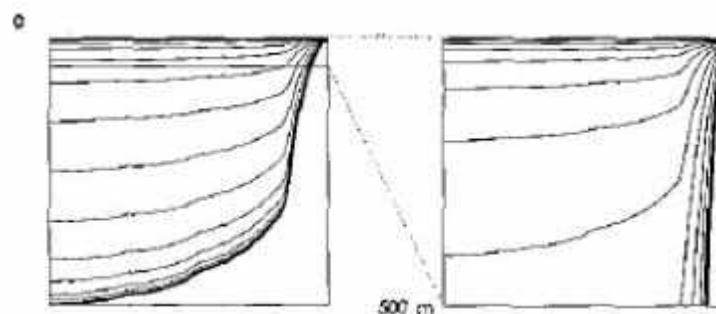


Figure III.3 : Schéma d'une grille en coordonnées σ (Kersale, 2010).

III.3.2. Discrétisation temporelle : Séparation des pas de temps (*Mode splitting*)

Afin de limiter les coûts de calcul, les modes barotrope (dynamique 2D rapide) et barocline (dynamique 3D lente) sont calculés séparément dans le code. Les équations primitives et l'équation de continuité sont intégrées verticalement pour fournir 3 équations régissant l'évolution des 3 variables du mode barotrope (u, v, ζ). L'itération temporelle du mode rapide est exécutée NTDFAST fois entre deux itérations du mode barocline, où NTDFAST est le rapport du pas de temps barocline sur le pas de temps barotrope. Les vitesses du modèle 2D sont moyennées temporellement entre chaque pas de temps barocline avant d'être réinjectées dans le modèle 3D. Cette opération s'effectue par l'intermédiaire d'un filtre. Toutes les équations (2D & 3D) sont discrétisées temporellement par un schéma explicite. Le pas de temps est généralement contraint par la propagation des ondes longues d'inertie-gravité

de surface qui fournit une condition pour le critère de stabilité de Courant-Friedrichs-Levy (CFL) (Desbiolles, 2010).

III.4. Les données

Pour exécuter une simulation régionale avec ROMS, le modélisateur a besoin de fournir de nombreuses données. En ce qui concerne les conditions initiales, le modèle va les récupérer dans diverses bases de données datant de l'année 2005 (on a utilisé les données du 2008) : The International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set Project (ICOADS) permet une récupération des données de forçage en surface. World Ocean Atlas (WOA) dispose des données de température et de salinité. Ces données vont ensuite être utilisées dans la méthode dynamique qui va permettre le calcul des vitesses géostrophiques par rapport à un niveau de référence. On impose comme condition initiale une vitesse du courant nulle en dessous de cette profondeur (Kersale, 2010).

III.5. Fermeture de la turbulence

La grande difficulté de la modélisation réside dans la détermination des coefficients de diffusion verticale. Plusieurs approches ont été développées pour modéliser au mieux ces processus de mélange sur toute la colonne d'eau. Deux approches majeures peuvent être distinguées : l'énergie cinétique turbulente (schéma de Gaspard et al., -1990- et de Mellor&Yamada, -1974-) et K-profil (schéma de Pacanowski&Philander -1981- et de Large et al. -1994-). Le modèle ROMS laisse la possibilité à l'utilisateur de choisir entre plusieurs schémas (Desbiolles, 2010).

III.5.1. Schéma Pacanowski&Philander –PP

Avec le schéma PP, le mélange turbulent dans la circulation générale de l'océan est traité par une approche de diffusion locale du premier ordre (Li et al, 2001). L'échelle de cette diffusion est donnée par les dimensions typiques K de la turbulence (échelle d'un tourbillon). C'est ce qu'on appelle la théorie K . Le terme turbulent pour une quantité x calculée par le modèle est alors : $wx = -K \partial_z x$ (Desbiolles, 2010).

III.5.2. Schéma K-Profil Paramétrisation –KPP

Le schéma KPP est issu du modèle de fermeture développé par Large et al. (1994). La grande différence avec PP est que ce schéma considère l'aspect non-linéaire de la turbulence océanique : $wx = -K(\partial_z x - \gamma x)$ Où γx représente le terme non-linéaire du transport turbulent (Desbiolles, 2010).

III.6. Condition de stabilité

La stabilité d'un schéma numérique est vérifiée lorsqu'une erreur introduite ne s'amplifie pas avec les calculs. Lors de la résolution des équations, la convergence permettra de se rapprocher de la valeur analytique, c'est également une propriété d'un schéma numérique.

Il existe des méthodes pour améliorer la stabilité du modèle comme par la méthode du Leapfrog (saute-mouton ou Dufort et Frankel) ou bien le filtrage numérique (filtre d'Asselin) utilisées par Roms. Les erreurs augmentent sur la verticale à cause de la répartition du gradient de pression sur sigma. Sur l'horizontale, les erreurs sont réduites grâce à l'utilisation de la grille C d'Arakawa (Supplien, 2010/2011).

III.6.1. Le critère CFL (Courant Friedrichs-Levy)

La résolution spatiale et la résolution temporelle sont liées par le critère de stabilité CFL (Courant-Friedrichs-Levy) de façon à ce qu'un processus (courant, onde...) ne se propage pas de plus d'une maille à chaque pas de temps. Pas de temps Δt et pas de grille Δx sont donc reliés par la vitesse de propagation de cet événement c selon une équation du type : $\Delta x > c \Delta t$ ou bien, puisque en générale, on décide d'abord la résolution spatiale et on suite on fixe le pas de temps

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

Ainsi, l'augmentation des résolutions spatiale et temporelle vont de pair, vers une augmentation du coût de calcul. En océanographie, les processus les plus rapides qu'on modélise sont les ondes de gravité longues, donc il faut calculer leur vitesse de propagation. (Doglioli, 2012).

III.6.2. Les conditions aux limites

Après avoir effectué la fermeture de la turbulence il faut donner les formulations des conditions aux limites (Mattieu, 1990).

- à la surface libre (en a $z = \xi$)

$$\left\{ \begin{array}{l} A_z \frac{\partial \mu}{\partial z} = \tau_{sx} \\ A_z \frac{\partial v}{\partial z} = \tau_{sy} \end{array} \right\} \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = w \quad \left\{ \begin{array}{l} A_z^T \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{Q}{\rho_0 c_p} \\ A_z^S \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{S(E-P)}{\rho_0} \end{array} \right\}$$

Tension de surface (vent)

Bilan de sel

- au fond (en a $z = -H$)

$$\left\{ \begin{array}{l} A_z \frac{\partial \mu}{\partial z} = \tau_{bx} \\ A_z \frac{\partial v}{\partial z} = \tau_{by} \end{array} \right\} \quad w = \mu \nabla H \quad \left\{ \begin{array}{l} A_z^T \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \\ A_z^S \frac{\partial S}{\partial z} = 0 \end{array} \right\}$$

Tension de cisaillement

Les vitesses à la surface et au fond sont respectivement proportionnelles aux tensions de cisaillements T_x , T_y qui sont des fonctions quadratiques de l'intensité du vent et du courant. En ce qui concerne les variables thermodynamiques, il s'agit de faire respectivement pour T et S, un bilan de chaleur et de sel (Desbiolles 2010).

III.7. Utilisation de Roms

III.7.1. Pré-processing et Compilation

Pour utiliser Roms, l'utilisateur doit fixer plusieurs paramètres. RomsTools fourni un cas test d'un modèle du Benguela pour pouvoir facilement créer quelques graphiques. RomsTools nous demande de choisir la position des mailles de la grille ainsi que leur taille. RomsTools fourni la topographie du fond, les conditions initiales, les conditions de frontière et les forçages de surface. On a modifié le fichier start pour inclure tous les chemins nécessaires pour Roms. Chaque fois que start est lancé, les chemins nécessaires sont reconnus par Matlab. Pour lancer ce processus par défaut à chaque démarrage de Matlab, il suffit de renommer ce fichier startup et de lancer Matlab à partir du fichier Run où se trouve le répertoire de travail. Après avoir testé la compilation du modèle, on a commencé à réellement utilisé les outils de preprocessing. D'abord il faut fixer des paramètres de base dans le fichier romstools_param.m. Avec l'aide du script ad_findgeocoords.m, on a mis les coordonnées de latitude et longitude, la résolution et les frontières ouvertes. Les quatre scripts Matlab suivants doivent être lancés en Matlab avant de commencer : make_grid, make_forcing, make_clim, make_tides. Dans le fichier param.h on met le nombre de mailles sur la longueur et la largeur. Dans le fichier cppdefs.h on définit le nom du modèle et on redéfinit les frontières ouvertes. Tout ce travail de pré-processing étant fait, on peut compiler le modèle avec ./jobcomp (campbell, 2007).

III.7.2. Exécution

Après avoir compilé le modèle, il faut fixer le nombre de pas barocliniques dans roms.in. Il faut également préciser le rapport de pas barotropiques par nombre de pas baroclinique. Aussi, on précise le nombre de pas de temps à effectuer (ce qui fixe la durée de la simulation). Ces calculs sont facilités par le script ad_cfl.m. Le modèle est ainsi prêt à être exécuté. On obtient alors un mois de simulation afin de visualiser le modèle et vérifier qu'il n'y a pas de problèmes évidents. Ce qui nous intéresse vraiment, c'est de faire une simulation à long terme pour pouvoir décrire les variations saisonnières. Pour modéliser sur plusieurs années, il suffit d'enchaîner plusieurs simulations plus courtes. Pour cela, on modifie le fichier roms_inter.in pour faire des simulations d'un mois qui s'enregistraient et dont le dernier jour du mois était l'état initial pour le mois suivant : (campbell, 2007).

III.7.3. Post-processing

III.7.3.1. Diagnostics

Après avoir exécuté le programme, on fait une série de tests avec le programme roms_diags.m. En regardant les graphiques créés, on peut déterminer à partir d'où notre modèle est fiable (campbell, 2007).

III.7.3.2. Roms GUI

Ce Graphical User Interface permet de prendre tous les données d'un fichier *.nc (sortie du modèle) et créer diverses graphiques comme des séries temporelles, des profils verticaux et des sections verticales. On peut faire des graphiques des paramètres directement calculés par le modèle comme la salinité et la température et des paramètres dérivés comme la norme de la vitesse (campbell, 2007).

Tableau III.1: Variables de sortie après simulation avec le modèle Roms (Rimaud, 2010).

Variables	Significations physiques
Zeta	Surélévation de la surface libre
Ubar	Composante horizontale de la vitesse barotrope selon l'axe est-ouest
Vbar	Composante horizontale barotrope selon l'axe nord-sud
U	Composante horizontale de la vitesse barocline (3D) selon l'axe est-ouest
V	Composante horizontale de la vitesse barocline (3D) selon l'axe nord-sud
Temp	Température
Salt	Salinité
Speed	Vitesse des courants

III.7.4. Fonctionnement du modèle Roms

Le modèle Roms est à surface libre, où les équations d'évolution donne l'état des masses d'eau à $(t+dt)$ en fonction d'un instant précédent (t) , soumis à certaines conditions aux limites permettant la résolution des équations primitives, lesquels:

- la tension du vent qui agit sur la surface de l'eau et détermine la quantité de mouvement.
- Le flux de chaleur échangé entre l'atmosphère et l'eau, fournissant ainsi les données de température dans le bassin et le rayonnement infrarouge émis du bassin vers l'atmosphère.
- La précipitation et l'évaporation fournissent des données du bilan de sel dans le bassin.

- Pas de condition de fermeture du modèle à la frontière, il doit calculer le flux nécessaire à l'équilibre, la perte ou le gain d'eau à la surface. (Zemenzer, 2004).
- Les conditions initiales du modèle sont les champs de température et de salinité de l'année 2008 en équilibre après quelques jours d'intégration.

III.8. Protocole d'implémentation du modèle Roms

La première étape consiste à s'inscrire comme utilisateur de ROMS sur le site <http://myroms.org>, ainsi que des Roms_Tools sur le site <http://roms.mpl.ird.fr>.

Le téléchargement du fichier Roms_Agrif_1.1 et de tous les autres est alors possible.

La deuxième étape consiste à rendre exécutable et à décompresser tous les fichiers téléchargés avec la commande suivant :

- Gunzip roms_tools.tar.gz
- Tarxvf roms_tools.tar

Un test de compilation peut être effectué après avoir exécuté et compilé le fichier jobcomp situé dans le répertoire Run. Nous allons donc avoir des bibliothèques et scripts suivant (Kersale, 2010) :

Romstools,COADS05,Run,nc_les,Compile,Ncitem,DATA,Diagnostic
tools,ncrecFORECAST,Documentation,Nctype,ROMS,FILES,User
guide,Topo,SCRATCH,Forecasttools,Ncvar,TEST CASES,Mask,netcdf,SeaWifs,mex60,netcdf
x86_64,SST_path_ndee,Mexnc,Oforc OGCM,Ides, tests,Opendap tools,Ncutility,m
map,FEDORA,Matlab,Private,FEDORA
X64,WOA2001,Nestingtools,Preprocessing,tools,TPX07,netcdf_g77,RomsAgrif,Visualization
tools,Netcdfifc,AGRIFZOOM,WOA2005,Netcdfmatlab,AGRIF
FILES,TPX06,Listpick,AGRIFINC,AforcNCEP,ncatt,AGRIF
OBJSLIB.clean,Ncbrowser,AGRIF YOURFILES,air sea,ncdim;AforcQuikSCAT

- Aforc_NCEP (Centre National de Prédiction Environnementale) : utilisé pour la prédiction du temps dans le monde (hydrologie, météorologie, alertes, tornades ouragans, ...). Nous utiliserons aussi Forecast_tools pour ce genre d'analyses.
- Aforc_QuikSCAT et QuikSCAT_clim: prennent leurs données du satellite quikSCAT. Ces derniers nous donnent les vecteurs de vent dans tous les océans et leurs climatologies.
- Air_sea: concerne ce qui se passe à l'interface océan-atmosphère (l'albédo et autres mesures physiques).
- COADS05: fournit également des données physiques, mais aussi la climatologie, ...
- Compile: sert pour la compilation de Roms.
-

- Diagnostic_tools: Ce sont des scripts matlab pour les animations et les analyses statistiques du modèle, pour vérifier sa validité.
- Mask: utilisé pour masquer certaines surfaces de la grille de notre modèle afin de faciliter la modélisation (lissage des côtes).
- M_map: nous donne la carte du monde.
- Netcdf_g77, netcdf_ifc: Ce sont des bibliothèques en fortran pour compiler Linux avec g77 et ifc.
- Netcdf_matlab, Mex 60, Mexnc, Netcdf_*86-84, Opendap-tools, sont des bibliothèques.
- Preprocessing_tools : Scripts de matlab qui vont nous permettre d'avoir quelques graphiques de simulation.
- Roms_Agrif : le code source en fortran.
- Run : c'est l'endroit où va se dérouler notre modélisation. Nous devons toujours nous trouver là pour n'importe quelle exécution.
- SeaWIFS: prend ses données du satellite du même nom. Il mesure la concentration de phytoplancton dans l'océan et la traduit par différentes couleurs.
- SST_pathfinder(SeveralSeaTemperature) : nous donne quelques températures de surface à très haute résolution.
- Tides : localise les différentes marées, tout comme TPXO6 et TPXO7.
- Topo : concerne la topographie globale (bathymétrie, altimétrie).
- Visualisation_tools: Ce sont des scripts matlab permettant de visualiser graphiquement le modèle une fois ce dernier terminé.
- WOA2001 et WOA2005 (World Ocean Atlas) : consiste à faire une climatologie du monde avec des propriétés in situ (Bachelier, 2006/2007).

III.8.1. Fichiers paramètres

Romstools_param.m : (Roms_tools/Run) est un fichier interprétable par le logiciel Matlab. Il contient les paramètres qui définissent la simulation. Pour le passage d'une simulation du $1/5^{\text{ième}}$ au $1/10^{\text{ième}}$. Il faut simplement remplacer la valeur de la variable « dl = 1/5; » par « dl = 1/10; ». Lorsque ce fichier a été modifié on lance le logiciel matlab et on soumet la commande Make_config en vérifiant au préalable le contenu du fichier make_config.m qui se trouve dans le répertoire Roms_tools/Run (Grima, 2008).

On doit y trouver les commandes suivantes :

- param.m: sert à fixer les coordonnées géographiques de la région choisie, le degré de résolution et l'intégration de l'état des frontières [S, E, N, W], où les frontières ouvertes représentent (1) et celles fermées correspondent à (0).
- make_forcing.m: fournit les données de condition aux limites.
- make_clim.m: fournit les données de condition initiales.
- make_grid: où la grille est préparée par calcul du pas d'espace (horizontal: LLM et vertical: MMm) ainsi que: dxmin, dymin, dxmax, dymax et Hmax. Après fixation de la résolution dans param.m, le critère CFL est calculé, à partir duquel les pas de temps

externes et internes (DTE, DTI) et le paramètre NTDFAST sont déterminés. L'exécution de `make_grid` fournit la bathymétrie du domaine (Zemenzer, 2004).

III.9. La création des fichiers de données pour une simulation

La soumission de la commande « `make_config` » va générer la création des fichiers de données nécessaires à la soumission d'une simulation ROMS. En premier lieu c'est la grille et ces paramètres qui vont être calculés et stockés dans un fichier (`Roms_tools/Run/ROMS_FILES/roms_grd.nc`). Lors de la création de la grille, on peut intervenir pour modifier le fichier masqué. Pour cela on répond « y » (pour yes) à la question posée par le programme (Grima, 2008).

III.9.1. Les fichiers de données

Les fichiers de données sont présents dans le répertoire `Roms_tools/Run/ROMS_FILES`

- `roms_grd.nc` : fichier grille
- `roms_frc.nc` : fichier de forçage (le vent, les flux de chaleur).
- `roms_clm.nc` : fichier contenant les climatologiques (frontières ouvertes)
- `roms_ini.nc` : fichier contenant l'état initial de la simulation (Grima, 2008).

III.9.2. La compilation des codes source de ROMS_AGRIF

- `Roms_Agrif` : est un répertoire. Il est présent dans le répertoire `Roms_tools`.
- `cppdefs.h` : c'est un fichier dans lequel les paramètres de la simulation sont codés sous la forme de clés CPP. Lors du passage du 1/5^{ième} au 1/10^{ième} il n'y a pas besoin de le modifier.
- `param.h` : c'est également un fichier contenant des caractéristiques techniques de la simulation.
- `Jobcomp` : le fichier `jobcomp` est un script shell avec lequel on va compiler les codes sources de `ROMS_AGRIF`. Il ne doit pas être modifié entre la version 1/5^{ième} et 1/10^{ième} (Grima, 2008).

III.9.3. Lancement d'une simulation

On lance une simulation `ROMS_AGRIF` en se plaçant dans le répertoire `Roms_tools/Run` et en soumettant la ligne de commande : `./run_roms.csh && run_roms_output_vx.txt`. Chaque fichier et répertoire nécessaire au lancement d'une simulation est détaillé ci-dessous

- `ROMS_FILES` : répertoire contenant les fichiers de forçages (`roms_frc.nc`), de climatologie (`roms_clm.nc`), des conditions initiales (`roms_ini.nc`) et de la grille (`roms_grd.nc`). Ces fichiers ont été générés à l'aide des `Roms_Tools` et de `Matlab`.

- SCRATCH : le répertoire où la simulation va avoir lieu et où les résultats seront stockés (ex: roms_avg_YxMx.nc). Il faut créer ce répertoire s'il n'existe pas au départ de la simulation. Attention si d'autres fichiers résultats sont présents dans ce répertoire, ils seront écrasés par la nouvelle simulation.
- roms : fichier exécutable qui est obtenu après compilation des codes sources du modèle ROMS_AGRIF. Il se trouve dans le répertoire Roms_tools/Run et doit avoir les droits UNIX nécessaires pour être exécuté.
- roms_inter.in : fichier dans lequel se trouvent les paramètres de la simulation Roms.
- run_roms.csh : fichier de soumission de la simulation.
- roms_inter.in : c'est un fichier transitoire qui permettra de générer le fichier roms.in qui sera utilisé par l'exécutable roms.

Dans ce fichier le script shell «run_roms.csh » remplacera la variable NUMTIMES par le nombre de pas de temps pour un mois en fonction de la valeur du « dt [sec] ». Attention ici à avoir une parfaite correspondance entre la valeur du « dt [sec] » du fichier « roms_inter.in » et la valeur de la variable « DT " du fichier script « run_roms.csh ».

- run_roms.csh : est un fichier dit « script shell ». (Grima, 2008).

III.9.4. Les résultats

Les scripts roms_diags.m et plots_diags.m ont été utilisés pour avoir les variables de diagnostics annuelles moyennées du modèle et la visualisation des résultats a été faite avec le script roms_gui.m. Les résultats d'une simulation se retrouvent dans le répertoire

Roms_tools/Run/SCRATCH (Grima, 2008).

On peut résumer tous ces étapes dans le diagramme suivant:

Téléchargement du modèle ROOMSTOOLS (ocaen modiling tools)
WWW.BREST.IRD6-FR/ROOMS_TOOLS/

PRETRAITEMENT DES
DONNEES

ROOMS-TOOLS/RUN

Fichier param
 Lonmin=9.0°
 Latmin=32.5°
 Lonmax=12.5°
 Latmax=36.0°

Fichier param.h
 LLm=104
 MMm=127
 DXmin=2.996 DYmin=2.997
 DXmax=3.124 DYmax=3.123

Fichier param.h
 Choix des condition au
 frontières (1 ; 1 ;
 0 ;1)S ,E,N ,W

Ad-cfp.m
 Introduire :
 Hmax=300
 Dt=1080

And.fin géocod.m
 Choix de la zone sur la carte

Compilation du modele avec :

jobcomp

Roms inter. In
 Introduire :dt ;Ntimes

Roms-vst nc
 introduire :Ntime ;NRS

Roms -csh
 Introduire :dt=1080 ;NY=

Tourner le modele

Fichier :roms in
 Introduire $\Delta t = 6s$; $\Delta t = 1080$; Ntimes2400

Visualusation du modele

Roms-gui dans matlab

Compilation du model
 UEXP :OUT

Conclusion

Les Roms_Tools sont des scripts Matlab qui aident le modélisateur à préparer et à interpréter le modèle. Roms résout les trois dimensions les équations primitives basées sur l'approximation de Boussinesq et sur l'équilibre hydrostatique. Roms discrétise ces équations en utilisant une grille de calcul de type arakawa-C. De plus les équations sont résolues de manière semi-implicite, avec un pas de temps lent pour les calculs en mode baroclinique et un pas de temps rapide pour les calculs en mode barotrope. Roms est un modèle de circulation des océans conçu pour s'appliquer préférentiellement à une échelle régionale. Le module AGRIF (Adaptive Grid Refinement In Fortran) permet la gestion de domaines à haute résolution spatiale emboîtés dans des domaines à plus basse résolution et rend possible l'application de ce modèle à des problématiques côtières comme l'étude des processus d'upwelling et l'interaction des grands courants avec les îles qui génère jets, tourbillons, méandres et fronts thermiques.

Introduction

La dynamique du golfe de Gabès est étroitement liée à la circulation générale de la Méditerranée d'une part, et d'autre part, aux propagations des ondes de marée à l'intérieur de ce golfe. Certes, les études de MOLINES (1991), ABDENNADHER & BOUKTHIR (2006) et SAMMARI *et al.* (2006), se sont bien focalisées sur la dynamique du golfe de Gabès, contrairement à d'autres, qui ont axé leurs études sur la Méditerranée Orientale (tels que TSIMPLIS *et al.*, 1995). Il est de plus en plus plausible, de confirmer ou d'infirmer leurs résultats par des mesures *in situ*, notamment dans la zone côtière. Le golfe de Gabès est le siège d'une marée semi-diurne à amplitude considérée parmi les plus importantes en Méditerranée, 2 m en vives eaux au fond du golfe. Dans ce secteur, le courant atlantique perd de son influence (Ben Othman, 1973). Le golfe de Gabès présente des caractéristiques hydro-dynamiques et physico-chimiques différentes de celles des zones Nord et Centre. La température et la salinité sont, par exemple, plus élevées (Ktari-Chakroun et Azouz, 1971 ; Bradai, 2000).

Nous présentons dans la première partie les côtes tunisiennes et particulièrement le golfe de Gabès ; dans la seconde partie nous exposerons les résultats et analyse de la simulation.

IV.1. Le golfe de Gabès

Les côtes tunisiennes s'étendent sur environ 1 250 km. Le golfe de Gabès occupe tout le sud du littoral tunisien, entre le cap Ras Kaboudia et la frontière libyenne.

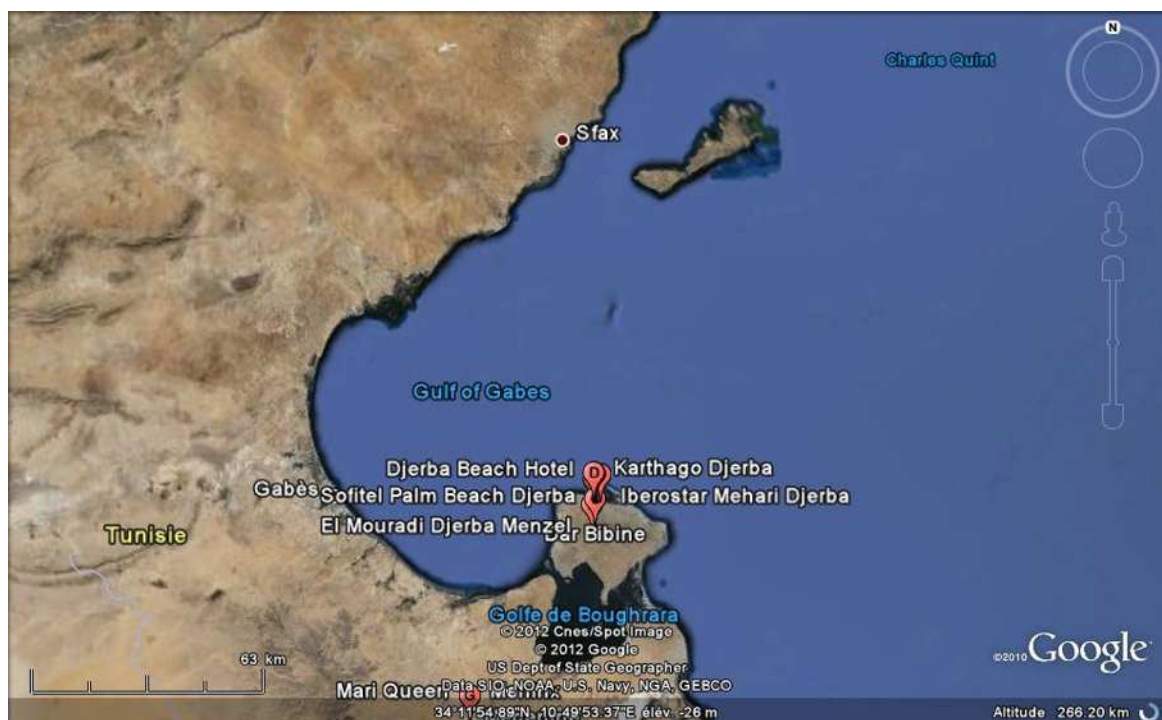


Figure IV.1 : localisation du golfe de Gabès (google earth, 2010).

IV.1.1. Caractéristiques générales

Les côtes tunisiennes présentent un contraste remarquable entre la partie Nord (de la frontière algérienne à Ras Kapudia) et la partie Sud (jusqu'à la frontière libyenne). Au Nord, la mer est en général profonde près du rivage, les terres sont plus ou moins haute et visibles d'assez grandes distances, "en un mot, le relief du sol et celui du fond sont accentués" (MANEN & HERAUD, 1890). Au Ras Kapudia, la configuration change totalement : la côte s'abaisse, il n'y a plus que des pentes douces, et les petits reliefs sont de plus en plus loin de la mer. Mais c'est surtout l'immense plateau continental qui fait la caractéristique principale de cette région. Les petits fonds entourent les îles Kerkennah (ou Cercina), encombrant une partie du golfe de Gabès, font le tour de l'île de Jerba, et vont se terminer sur la côte libyenne, à une quinzaine de milles à l'Est de Ras Ashdir, point frontière.

IV.1.2. La marée

C'est dans le golfe de Gabès que la marée est la plus forte en Méditerranée. En effet, dans l'Adriatique, les marées observées ne dépassent guère, même en y ajoutant l'effet de perturbation des vents, 1 mètre d'amplitude.

IV.1.3. Les courants

La connaissance sur les courants marins dans cette zone n'est pas bien définie, bien qu'elle soit meilleure comparativement aux paramètres de la vague. Les courants généraux des eaux de surface en Méditerranée sont générés par la provenance des eaux Atlantique, qui sont caractérisées par leur salinité plus faible, qui pénètrent par le détroit de Gibraltar. (HATTOUR M et al., 2010).

IV.2. les Résultats

Après avoir installé et compiler le modèle Roms, nous avons fait deux application sur une partie comprise entre 9 et 15°E de latitude, 32 et 37°N de longitude du Golfe de Gabès.

- La 1^{ère} simulation c'est le petit modèle avec une résolution $dl = \frac{1}{6}$.
- La 2^{ème} simulation c'est le grand modèle avec une résolution $dl = \frac{1}{10}$.

IV.2.1. Diagnostic du modèle

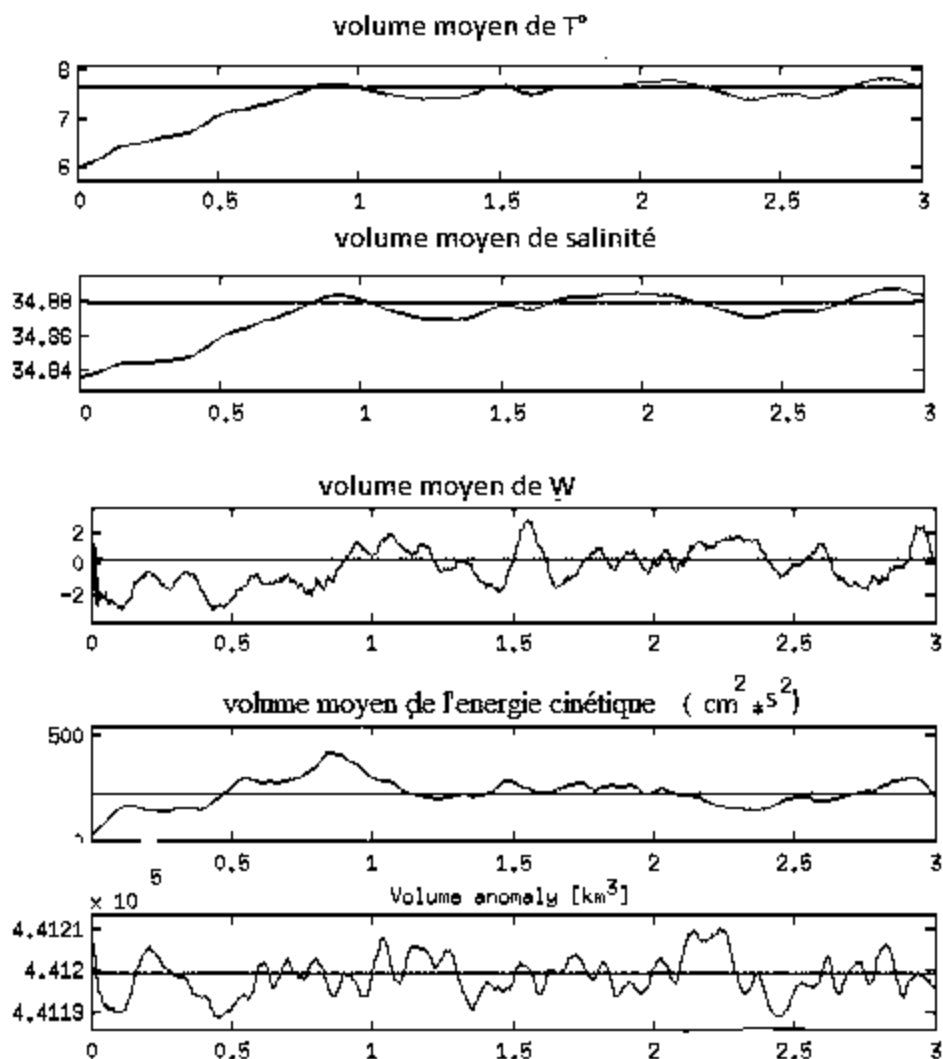


Figure IV.2 : Diagnostic de la simulation.

Le diagnostic effectué avec ROMSTOOLS permet d'analyser la stabilité de la simulation. Plus les courbes traduisant l'évolution des variables se rapprochent de la ligne rouge correspondant à la moyenne, plus le modèle sera stable. La salinité est souvent peu stable car elle est difficile à modéliser et l'équilibre est ainsi dur à atteindre. L'énergie cinétique moyennée sur la surface est liée aux forçages climatologiques et se stabilise rapidement, alors que l'énergie cinétique moyennée sur un volume est plus lente à se stabiliser. Avec la méthode dynamique, la vitesse horizontale (w) doit se stabiliser autour de 0. Les équations de courants géostrophiques déterminées grâce à la surélévation de la surface libre permettent de déterminer les composantes horizontales u et v (composantes horizontales et verticales non turbulentes de la vitesse). On remarque que pour tous les paramètres le modèle se stabilise à partir de la 1^{ère} année.

IV.2.2. Petit Modèle ($dl = \frac{1}{6}$)

Nous avons sélectionné notre zone géographique à l'aide du script Matlab `ad_findgeocoord.m`, les coordonnées de notre domaine sont définies dans le Tableau.1.

Tableau IV.1: Paramètres insérés dans `romstools_param.m` du petit modèle.

Longitude max	12.5°
Longitude min	9.0°
Latitude max	36.0°
Latitude min	32.5°
Résolution	1/6

Par ensuite le biais du script `make_grid.m`, la grille se crée et les critères de stabilité CFL (Courant-Friedrichs-Levy) peuvent alors être calculés Tab.2.

Tableau IV.2 : La taille de la grille et les critères de stabilité CFL du petit modèle.

LLm	104 Km
MMm	127 Km
Dxmin / Dxmax	2.996/3.124 Km
Dymin / Dymax	2.997/3.123 Km
Hmax	300 m
Dt	1080
NTIMES	2400

➤ le temps de calcul de 22h et 39min :

IV.2.3. Grand Modèle ($dl = \frac{1}{10}$)

Tableau IV.3: Paramètres insérés dans `romstools_param.m` du grand modèle.

Longitude max	15.0°
Longitude min	9.5°
Latitude max	37.3°
Latitude min	32.2°
Résolution	1/10

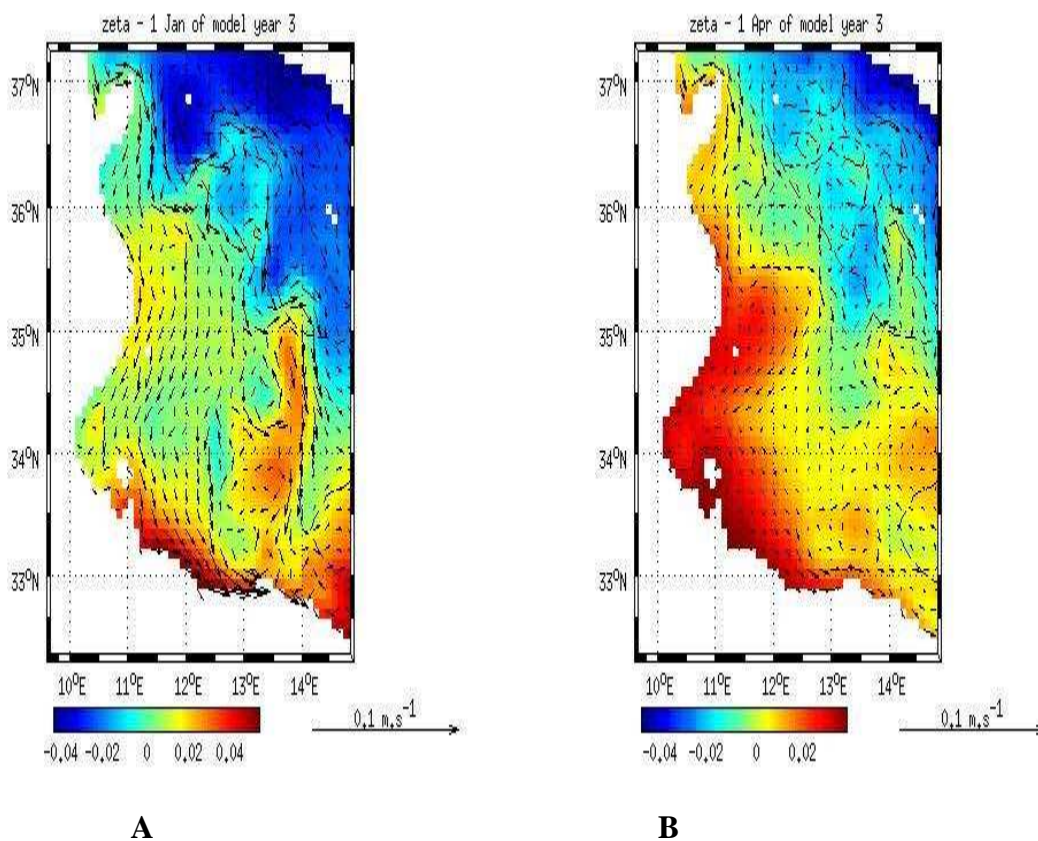
Tableau IV.4: La taille de la grille et les critères de stabilité CFL du grand modèle.

LLm	55 Km
MMm	62 Km
Dxmin / Dxmax	8.831/9.404 Km
Dymin / Dymax	8.845/9.399 Km
Hmax	1200 m
Dt	1620
NTIMES	1600

➤ Le temps de calcul est de 10h et 34min.

IV.2.4. Variabilité saisonnières

Dans cette partie nous nous intéresserons aux variabilités saisonnières de la 3ème année de la simulation de grand modèle. Nous observerons comment évolue la température, les champs de courant et la salinité afin de mettre en évidence un schéma global. Nous verrons que cette forte variabilité temporelle est liée à la présence de nombreux tourbillons.



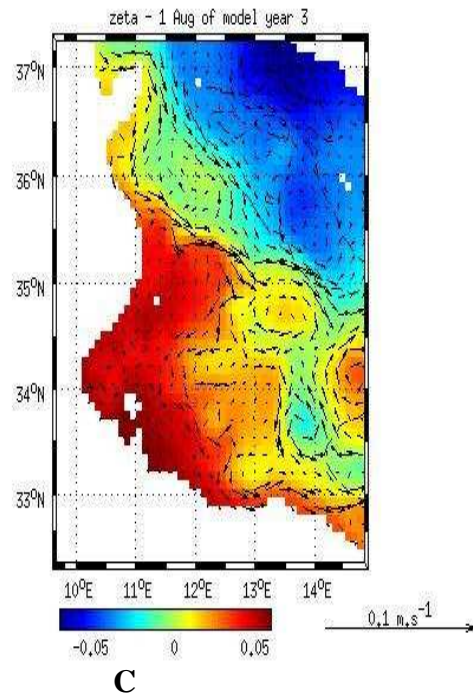


Figure IV.3: Variabilité saisonnière des courants et des hauteurs d'eau (A: Janvier; B: Avril, C : Aout).

On peut diviser notre zone en 2 régions :

La région 1 au-dessus de 35°N : elle est caractérisée par une baisse du niveau de la mer durant toute l'année avec la présence de faibles tourbillons anticycloniques.

La région 2 au-dessous de 35°N : elle est caractérisée par une élévation du niveau de la mer avec la présence de forts tourbillons anticycloniques.

On distingue aussi que l'élévation du niveau de la mer est plus remarquable pendant la saison estivale.

Par la suite, nous présenterons les variations de température et de salinité entre les différentes saisons.

IV.4.5. Température

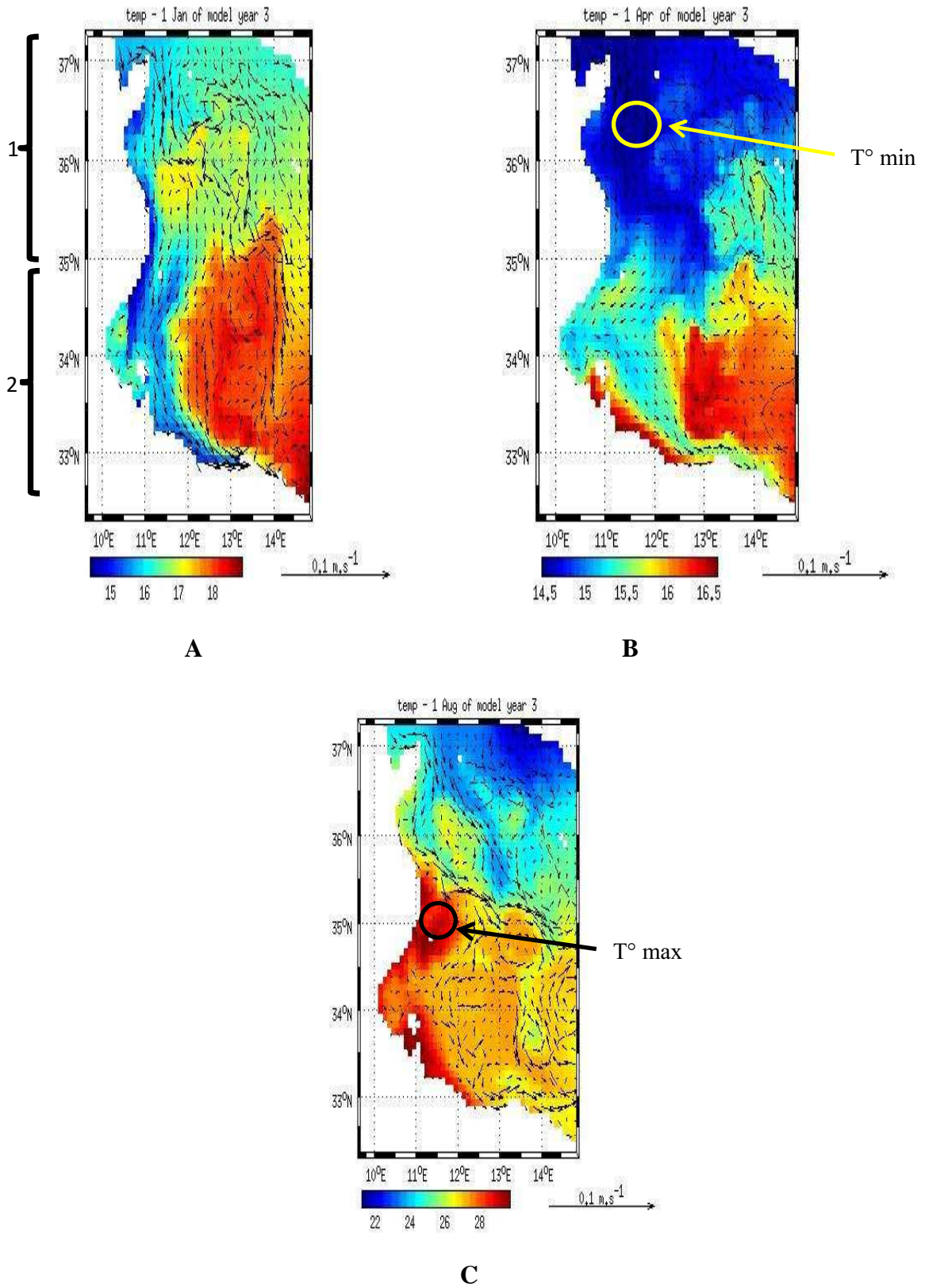


Figure.IV.4: Variation de la température (A: Janvier; B: Avril; C: Aout).

Ce que nous remarquons dans ces cartes de façon générale est :

1. En terme de T° , on peut diviser notre zone en deux parties : la 1^{ère} est située entre 35°N et 37°N , elle est relativement froide et la 2^{ème} est située entre 33°N et 35°N qui est plus chaude que la 1^{ère}.
2. On remarque un maximum de T° en mois d' Aout et un minimum en mois d' Avril dans les point indiqué sur les cartes.

IV.4.6. Salinité

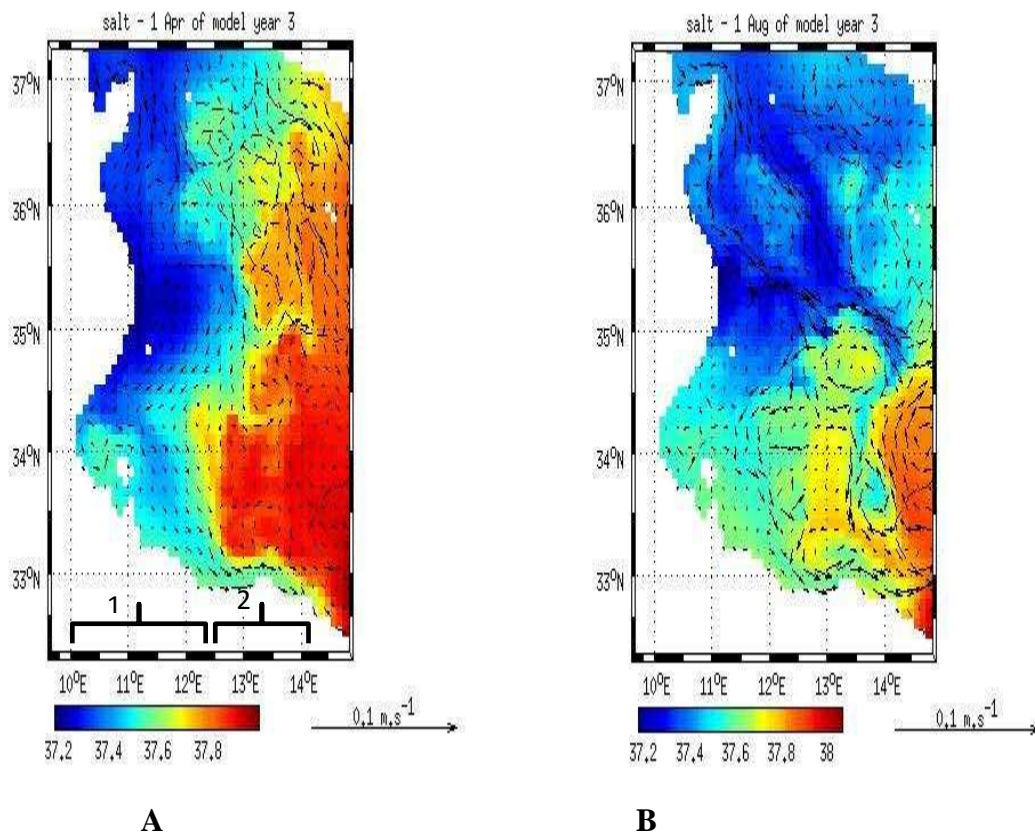


Figure IV. 5: Variation de la salinité (A: Avril; B : Aout).

Pour la carte (A) on peut diviser notre zone en deux parties :

- la 1^{ère} située entre 10°E et $12,5^\circ\text{E}$ qui a une salinité arrive jusqu'à 37,2 psu .
- la 2^{ème} situé entre $12,5$ et 14°E qui a une salinité arrive jusqu'à 38psu.

Pour la carte (B) on remarque une diminution de la salinité dans la partie Nord- Est, et une légère augmentation dans la partie Nord-Ouest par rapport au mois d' Avril.

IV.4.5.1. Profils de température

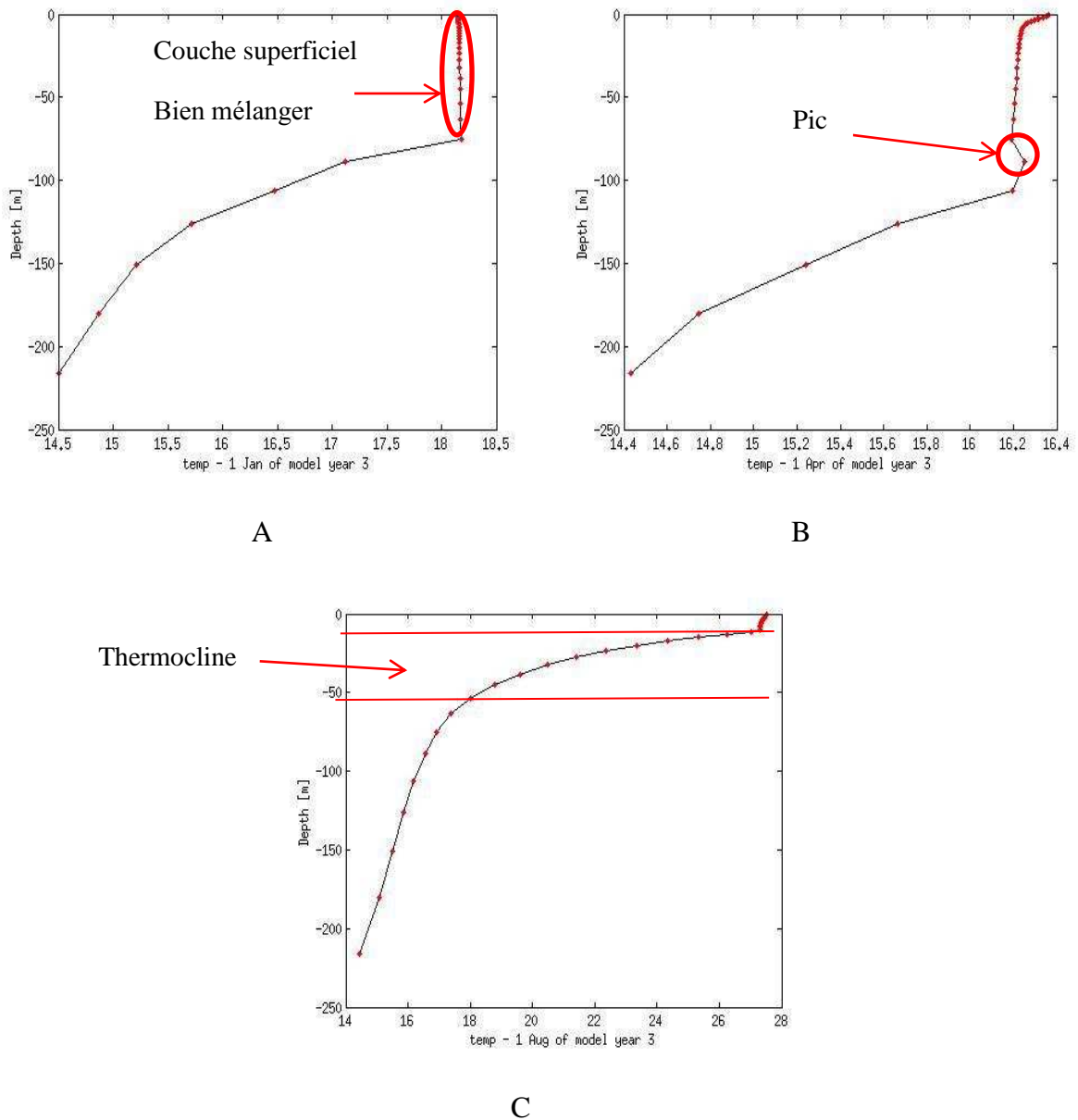


Figure IV.6 : profil de température (A : Janvier, B : Avril, C : Aout)

On peut tirer beaucoup d'information de ces profils :

1. Pour le profil (A) on voit que la variation de la T° avec la profondeur sur une couche de 80m à partir de la surface est nulle ; et ça peut être due à la turbidité important dans le mois de Janvier qui forme une couche superficiel bien mélangé.

2. Dans le profil (B) on remarque une légère variation de la T° avec la profondeur ainsi qu'un pic situé entre 70m et 80m où il y a une augmentation de la T° avec la profondeur et cela peut être expliqué par la présence d'un courant chaud qui passe à ce niveau.
3. Dans le profil (C) on voit l'apparition de thermocline où on remarque une diminution importante de la T° avec la profondeur.
4. Finalement pour les trois profils et au-delà de 80m on remarque une diminution proportionnellement de la T° avec la profondeur.
5. On peut aussi tirer des informations qui concerne le climat de cette région durant cette année : où on remarque que la T° de surface au mois de Janvier et plus élevée que celle d'Avril et pour cela nous pouvons dire que l'hiver de cette année est relativement chaud.

IV.4.6.1.Profil de salinité

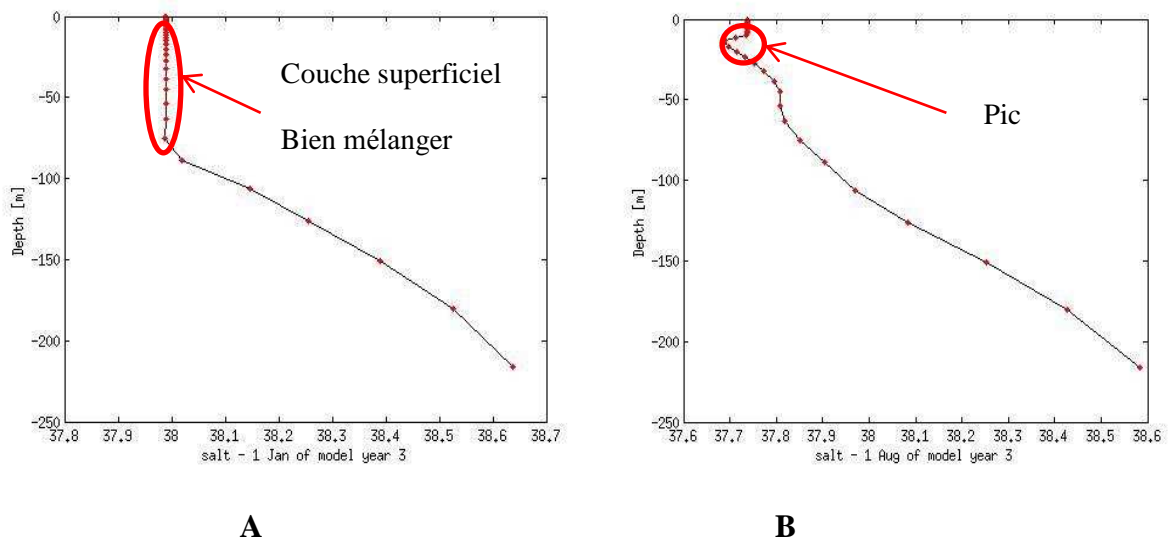


Figure IV.7 : profil de salinité (A : Janvier, B : Aout).

Dans le profil (A) on voit que la salinité est stable à une valeur de 38 *psu* jusqu'à 80 m de profondeur par ce que cette couche de 80 m est bien mélangé durant le mois de Janvier, après elle commence à augmenter respectivement avec la profondeur.

Dans le profil (B), la salinité est stable sur une couche de 10m puis on voit un pic situé entre 10 et 15m où la salinité diminue avec la profondeur (peut être dû à la présence d'un courant à faible salinité qui passe à ce niveau), au-delà de cette couche la salinité augmente proportionnellement avec la profondeur.

On voit aussi que la salinité de surface est plus importante dans le mois de Janvier que d'Aout.

Conclusion

Le modèle Roms utilisé permet d'étudier de nombreux paramètres sur la zone concernée et de montrer leur évolution en fonction de la saison. Les résultats de simulation obtenus sont de bonne qualité, malgré la faible résolution utilisée ici. L'utilisation de bases de données aussi importantes que WOA et quikSCAT permet à ce modèle de rester très précis en ce qui concerne les variations de température, de salinité, de forçage de vent et autres. Cependant, le gros point faible que nous avons rencontré c'est l'absence des mesures in situ ou des données de la littérature pour comparer les résultats et voir ses fiabilités, il y a aussi l'absence de la prise en compte du phénomène de marée, qui selon les régions peut avoir une grande influence sur la modélisation de la circulation océanique.

Pour améliorer ce travail, Il serait intéressant de prendre en compte ce phénomène de marée et de réduire la zone d'étude, tout en augmentant la résolution.

L'analyse des phénomènes de formation des tourbillons permettrait également de mieux comprendre l'évolution et le mélange des différentes masses d'eau au large du golfe de Gabès.

Perspective : il faut bien profiter de la propriété de zoom a des échelles incontournable de modèle ROMS, et de coupler aussi le coté biologique pour avoir une idée à chaque fois de chlorophylle par exemple, puisque cette propriété accessible par ce modèle.

Conclusion générale

Le modèle numérique ROMS est un modèle 3D qui permet le calcul des variables physiques de l'océan (Température, salinité, vitesse des courants, transport, élévation du niveau de la mer. Ce modèle fait partie des modèles numériques « nouvelle génération » utilisant des schémas numériques ainsi que de la paramétrisation de qualité. Ce modèle résout les équations primitives de Navier-Stokes couplées avec des équations de conservation pour la température et la salinité, et l'équation d'état de l'eau de mer. Cette résolution permet de connaître l'évolution temporelle (prédiction) de ces variables physiques. Des hypothèses de simplification sont indispensables pour résoudre un système d'équation ou le nombre de variable est supérieur aux nombres d'équations d'où l'intervention de l'approximation de Boussinesq, l'approximation hydrostatique et d'incompressibilité ainsi que l'approche de Reynolds. En plus de ces hypothèses, la résolution de ce système nécessite une base de données, une discrétisation temporelle et spatiale du calcul, une connaissance des conditions initiales et des conditions aux limites de ces champs physiques en tout point du domaine modélisé. La circulation de l'eau dans la région du détroit de Sicile et près des côtes tunisiennes est étroitement liée à la circulation générale de grande échelle en Méditerranée. Les modèles régionaux doivent donc tenir compte de cette circulation à l'échelle méditerranéenne.

Le résultat final répond à l'objectif qui consiste à implanter le modèle ROMS de manière meilleur à la circulation océanique dans la région choisie qui est la région du golfe de Gabès. Le second objectif est d'acquérir une formation de bas sur quelques techniques de résolution numérique des équations de la circulation océanique et analyser des simulations, en plus, l'apprentissage de travail scientifique en se basant sur des conditions de travail parfaites afin d'avoir des résultats fiables, puis revenant à des publications pour juger notre résultat et pour juger la fiabilité de modèle dans cette région, Et dans le but d'amélioration on cherche à améliorer les forçages et les flux de surface (flux de chaleurs, les frontières fermés et les échanges air-mer).

Bibliographie

- **Abdennadher J., Boukthir M**, 2006: Numerical simulation of the barotropic tides in the Tunisian Shelf and the Strait of Sicily.
- **Alioua M., Harzallah A**, 2008 : Imbrication d'un modèle de circulation des eaux près des côtes tunisiennes dans un modèle de circulation de la mer Méditerranée.
- **Andrea M. Doglioli**, 2012 : Notes de Cours et Travaux Dirigés de Modélisation de la Circulation Océanique, *p* 18,57.
- **Anne-Marie Tréguier**, 2002 : Modélisation numérique pour l'océanographie physique, *p*10.
- **Arnaud Daval**. Synthèse météorologie
- **Bachelier Céline**, 2007 : Projet de modélisation de l'unité d'enseignement, projet d'analyse et de modélisation, *p*3.
- **Ben Charrada R**, 1997 : Moussa M. Modélisation hydrodynamique et écologique des eaux côtières du golfe de Tunis.
- **Boukadi Khanès**. Conception d'un modèle de circulation générale à grille variable et à haute résolution pour les eaux côtières tunisiennes.
- **Cécile Renaudie**, 2009 : Etude et validation des couches limites atmosphériques et océaniques à l'échelle locale, *p*24.
- **Desbiolles Fabien**, 2010 : Comparaison entre deux schémas de fermeture de la turbulence avec Roms en Adriatique, *p*5, 8, 9,10.
- **Djath Bughsin**, 2009 : Etude théorique de la circulation océanique dans le golfe de Guinée, *p*13.
- **Djebali Jaouher**. Modélisation numérique de la réponse de la mer à haute fréquence.
- **Dorel Mattieu**, 1990 : Etude du bassin levantin par le modèle Roms, *p*8.
- **Eric Goncalvès**. Méthode, analyse et calculs numériques, *p*8, 2005.
- **Gaëlle Herbert**, 2007/2008 : Caractérisation de processus haute et basse fréquence à partir de données altimétriques et à l'aide du modèle symphonie, *p*13.
- **Gérarde Copin-Montégut** .physique et chimie marine ; courant géostrophique
- **Giannesini Laëtitia**, 2010 : Etude du courant Oyashio par le modèle Roms, *p*5.
- **Grima Nicolas**, 2008 : Mise en place d'une simulation en Méditerranée Occidentale (MedOcc) avec ROMS_AGRIF, *p*3.

- **HATTOUR M, SAMMARI C, BENASSRALLAH S**, 2010 : Hydrodynamique du golfe de Gabès déduite à partir des observations de courants et de niveaux, p4.
- **Julie Rimaud**, 2010 : Modélisation Régionale 3D : Application de ROMS à l'Atlantique Nord avec ROMSTOOLS, p6, 8.
- **Katy Pol**, 2010 : océanographie.
- **Magali Supplie**, 2010/2011 : Modélisation du courant de Californie, p5.
- **MANEN L., HERAUD G**, 1980: Reconnaissance hydrographique des Côtes de Tunisie.
- **Marion Kersale**, 2010 : Modélisation de circulation océanique autour des îles Hawaii, master océanographie, p4, 7.
- **Michel Hontarrède**, 2000 : Pollution en mer observer et prévoir leur dérive, p2.
- **Morisset Simon**, 2007: Modélisation du plateau de Kerguelen à l'aide du modèle Romstools, p6.
- **Nathalie DANIAULT**, 2005 : Université de Bretagne Occidentale.
- **Olivier Talagrand**, 2012: Cours modélisation numérique de l'écoulement atmosphérique et assimilation d'observations, p1.
- **Pascal Douillet et al**, 2004: Descriptif des besoins de calculs scientifiques sur architecture dédiée, p30.
- **PierrickPenven, GildasCambon, Thi-Anh Tan, Patrick Marchesiello**, 2010: ROMS AGRIF / ROMSTOOLS User's Guide, p4.
- **Rose campbell**, 2007 : Introduction à Roms : étude de la mer Ligure, p4.
- **Saliha Zemenzer**, 2004: Projet d'analyse de données et modélisation, Application du modèle ROMS dans la méditerranée occidentale « Circulation de LIW dans le bassin Algérien », p4.
- **SAMMARI C, KOUTITONSKY V.G, MOUSSA M**, 2006: Sea level variability and tidal resonance in the Gulf of Gabes.
- **Simon Mathias**, 2006: Introduction à Roms : Application de ce modèle au cas du golfe du Mexique et étude du « Loop Current », p6.
- **TSIMPLIS M., PROCTOR R., FLATHER R**, 1995: A two dimensional tidal model for the Mediterranean Sea.
- **Vivien Mallet**, 2008: Introduction aux modèles de chimie-transport pour la qualité de l'air, p14.
- **Xavier Couvelard**, 2004: Modélisation d'ondes internes application à la méditerranée, p18, 47, 58.

- **Yves Morel et al**, 2004: Modélisation de la circulation océanique en Manche, golfe de Gascogne, Ouest-Portugal et golfe de Cadix, *p3*.

Sites Web

- [1] http://www.géodynamique_externe.htm
- [2] <http://www.oceancirculation.htm>
- [3] [http://www.Mécanique des fluides. htm](http://www.Mécanique_des_fluides.htm)
- [4] http://www.phy.ornl.gov/csep/CSEP/PS_FILES/OM.PS.
- [5] http://www.mercatorocean.fr/documents/science/ao/ao_2003/gmmc/marsaleix_presentation.ppt.
- [6] http://www.pac.dfo-mpo.gc.ca/sci/juandefuca/default_f.htm.

- <http://www.ifremer.fr/delao/francais/hydrodynamique/mediterranee/details/baseco/index.htm>.
- <http://myroms.org>.
- <http://nco.sourceforge.net>.

- <http://roms.mpl.ird.fr>.
- <http://stockage.univ-brest.fr/~grima/RMI>.
- http://www.brest.ird.fr/Roms_tools/
- <http://marine.rutgers.edu/po/documentation/docs.php>
http://www.brest.ird.fr/personnel/ppenven/Roms_tools/index.html

Annexe

Fichier Romstools_param.m


```
%%%%%%%%%%
%
% Grid parameters
% used by make_grid.m (and others..)
%
%%%%%%%%%%
% Grid dimensions:
%
lonmin = 12.3; % Minimum longitude [degree east]
lonmax = 20.45; % Maximum longitude [degree east]
latmin = -35.5; % Minimum latitude [degree north]
latmax = -26.5; % Maximum latitude [degree north]
%
% Grid resolution [degree]
%
dl = 13;
%
% Number of vertical Levels (! should be the same in
param.h !)
%
N = 32;
%
% Vertical grid parameters (! should be the same in
roms.in !)
%
theta_s = 6.;
theta_b = 0.;
hc = 10.;

% Minimum depth at the shore [m] (depends on the resolution,
% rule of thumb: dl=1, hmin=300, dl=14, hmin=150, ...)
% This affect the filtering since it works on grad(h)h.
%
hmin = 75;
%
% Maximum depth at the shore [m] (to prevent the
generation
% of too big walls along the coast)
%
hmax_coast = 500;
%
% Topography netcdf file name (ETOPO 2 or any other
netcdf file
% in the same format)
%
topofile = [ROMSTOOLS_dir,'Topo/etopo2.nc'];
%
% Slope parameter (r=grad(h)/h) maximum value for
topography smoothing  $r = \frac{h_{i+1/2} - h_{i-1/2}}{2h} = \frac{h_{i+1/2} - h_{i-1/2}}{h_{i+1/2} + h_{i-1/2}}$ 
%
rtarget = 0.25;
%
% Number of pass of a selective filter to reduce the
isolated
% seamounts on the deep ocean.
%
n_filter_deep_topo=4;
%
% Number of pass of a single hanning filter at the end of
the
% smoothing procedure to ensure that there is no 2DX
noise in the
% topography.
%
```

Horizontal
grid
parameters

Vertical
grid
parameters

Preparation et compilation du modèle

cppdefs.h:  Basic options
More advanced options

- Define CPP keys used by the C-preprocessor when compiling the model.
- Reduce the code to its minimal size: fast compilation.
- Avoid FORTRAN logical statements: efficient coding.

Annexe

param.h defines the size of the arrays in ROMS:

```
...
#elif defined REGIONAL
# if defined BENGUELA
    parameter(LLm0=23, MMm0=31, N=32)
# else
    parameter(LLm0=??, MMm0=??, N=??)
# endif
...
```

Given by running make_grid

Southern Benguela test Model

Defined in romstools_param.m

Fichier cppdef.h

```
!-----
!          BASIC OPTIONS
!-----
*/
/*          Configuration Name */
# define BENGUELA
/*          Parallelization */
# undef OPENMP
# undef MPI
/*          Embedding */
# undef AGRIF
/*          Open Boundary Conditions */
# undef TIDES
# define OBC_EAST
# undef OBC_WEST
# define OBC_NORTH
# define OBC_SOUTH
*/
/*          Embedding conditions */
# ifdef AGRIF
# undef AGRIF_OBC_EAST
# define AGRIF_OBC_WEST
# define AGRIF_OBC_NORTH
# define AGRIF_OBC_SOUTH
# endif
/*          Applications */
# undef BIOLOGY
# undef FLOATS
# undef STATIONS
# undef PASSIVE_TRACER
# undef SEDIMENTS
# undef BBL

!-----
!          MORE ADVANCED OPTIONS
!-----
*/
/*          Model dynamics */
# define SOLVE3D
# define UV_COR
# define UV_ADV
# ifdef TIDES
# define SSH_TIDES
# define UV_TIDES
# define TIDERAMP
# endif
/*          Grid configuration */
# define CURVGRID
# define SPHERICAL
# define MASKING
/*          Input/Output & Diagnostics */
# define AVERAGES
# define AVERAGES_K
# define DIAGNOSTICS_TS
# define DIAGNOSTICS_UV
/*          Equation of State */ ...
/*          Surface Forcing */ ...
/*          Lateral Forcing */ ...
/*          Input/Output & Diagnostics */ ...
*          Bottom Forcing */ ...
/*          Point Sources - Rivers */ ...
/*          Lateral Mixing */ ...
/*          Vertical Mixing */ ...
/*          Open Boundary Conditions */ ...
/*          Embedding conditions */ ...
```

Déroulement du modèle

roms.in provides the run time parameters for ROMS:

```
title:
    Southern Benguela
time_stepping: NTIMES dt[sec] NDTFAST NINFO
    480 5400 60 1
S-coord: THETA_S, THETA_B, Hc (m)
    6.0d0 0.0d0 10.0d0
grid: filename
    ROMS_FILES/roms_grd.nc
forcing: filename
    ROMS_FILES/roms_frc.nc
bulk_forcing: filename
    ROMS_FILES/roms_blk.nc
climatology: filename
    ROMS_FILES/roms_clm.nc
boundary: filename
    ROMS_FILES/roms_bry.nc
initial: NRREC filename
    1
    ROMS_FILES/roms_ini.nc
restart: NRST, NRPFRST / filename
    480 -1
    ROMS_FILES/roms_rst.nc
```

**Warning ! These
should be identical to
the ones in
romstools_param.m**

Annexe

```
history: LDEFHIS, NWRT, NRPFHIS / filename
        T 480 0
          ROMS_FILES/roms_his.nc
averages: NTSAVG, NAVG, NRPF AVG / filename
        1 48 0
          ROMS_FILES/roms_avg.nc

primary_history_fields: zeta UBAR VBAR U V wrtT(1:NT)
                      T F F F F 10*F
auxiliary_history_fields: rho Omega W Akv Akt Aks HBL Bostr
                        F F F F F F F F F
primary_averages: zeta UBAR VBAR U V wrtT(1:NT)
                 T T T T T 10*T
auxiliary_averages: rho Omega W Akv Akt Aks HBL Bostr
                   F T T F T F T T

rho0:
  1025.d0
lateral_visc: VISC2, VISC4 [m^2/sec for all]
             0. 0.
tracer_diff2: TNU2(1:NT) [m^2/sec for all]
             10*0.d0
bottom_drag: RDRG [m/s], RDRG2, Zob [m], Cdb_min, Cdb_max
             0.0d-04 0.d-3 1.d-2 1.d-4 1.d-1
gamma2:
  1.d0
sponge: X_SPONGE [m], V_SPONGE [m^2/sec]
        100.e3 800.

nudg_cof: TauT_in, TauT_out, TauM_in, TauM_out [days for all]
         1. 360. 10. 360.
```

Le démarrage de la simulation se fait avec le fichier. /roms roms.in

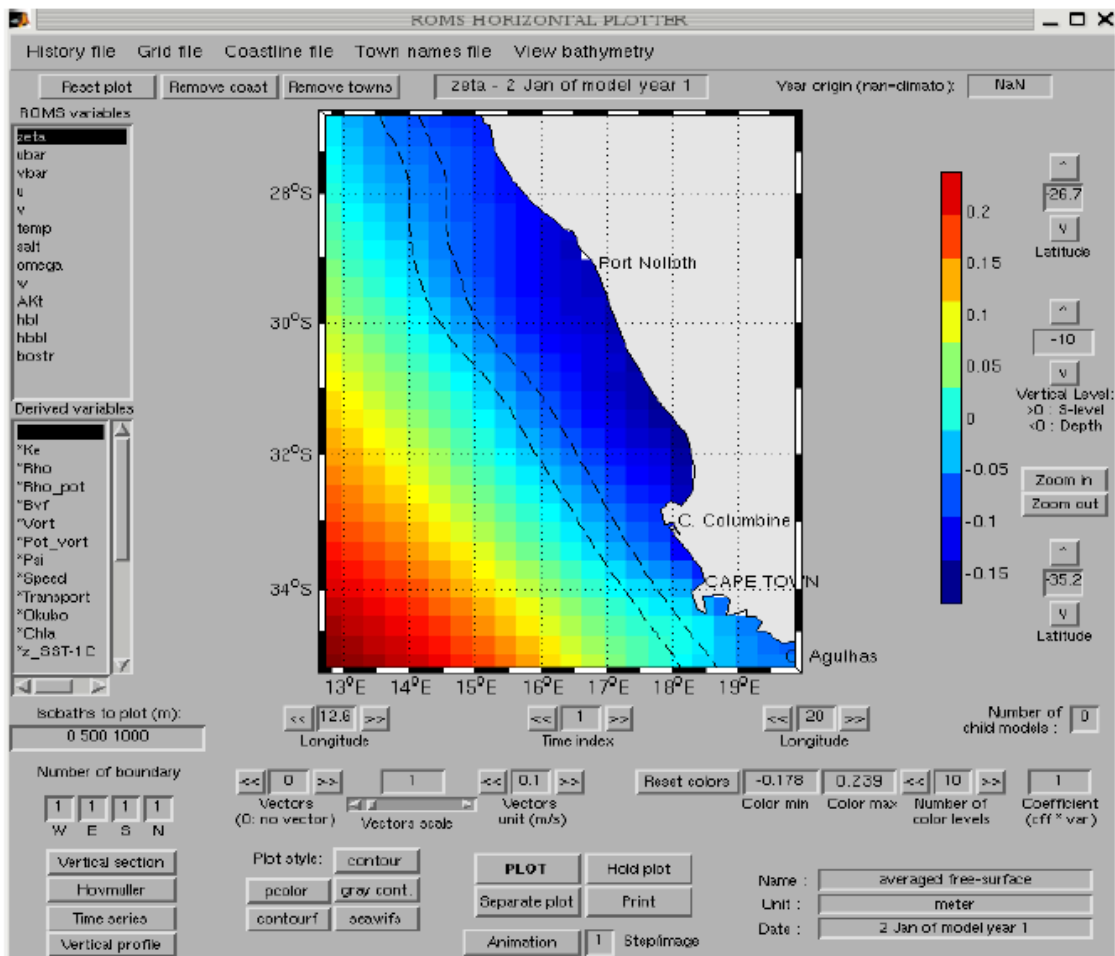
```
Southern Benguela
 480 ntimes Total number of timesteps for 3D equations.
5400.00 dt Timestep [sec] for 3D equations
 60 ndfast Number of 2D timesteps within each 3D step.
 1 ninfo Number of timesteps between runtime diagnostics.
...
Activated C-preprocessing Options:
...
Spherical grid detected
hmin hmax grdmin grdmax Cu_min Cu_max
75.000000 4803.032721 .301836927E+05 .331215714E+05 0.12176008 0.91533005
volume=9.523986093261087500000E+14 open_cross=6.104836888312444686890E+09
...
MAIN: started time-stepping.
STEP time[DAYS] KINETIC_ENRG POTEN_ENRG TOTAL_ENRG NET_VOLUME trd
 0 0.00000 0.000000000E+00 2.1475858E+01 2.1475858E+01 9.5239861E+14 0
 1 0.06250 1.306369099E-04 2.1476230E+01 2.1476361E+01 9.5239208E+14 0
...
```

Courant number:
evaluation of the CFL criterion:
 $dx/dt > \text{fastest waves (here gravity waves)}$.
 $Cu_{max} < 1 !!!$

Annexe

Visualization des resultants

Editer Roms_tools/Run \$matlab >> roms_gui



Les modifications

Pour chaque changement, on doit faire les modifications suivantes :

- le golfe de Gabès :

lonmin = 9.0°

lonmax = 12.5°

latmin = 32.5°

latmax = 36.0°

Avec grid résolution **dl = 1/6**

Annexe

- in matlab : edit **romstools_param**
- Ligne 87 : Fais les changements suivants :

% Grid dimensions:

lonmin = 9.0°; % Minimum longitude [degree east]

lonmax = 12.5°; % Maximum longitude [degree east]

latmin = 32.5°; % Minimum latitude [degree north]

latmax = 36.0°; % Maximum latitude [degree north]

% Grid resolution [degree]

dl = 1/6;

% Minimum depth at the shore [m] (depends on the resolution,

% rule of thumb: dl=1, hmin=300, dl=1/4, hmin=150, ...)

% This affect the filtering since it works on grad(h)/h.

hmax = 300;

Frontière ouverte, frontière fermée :

- Ligne 187 : Dans **romstools_param** :

% Open boundaries switches (! should be consistent with cppdefs.h !)

obc = [1 1 1 0]; % open boundaries (1=open , [S E N W])

- ligne 44 : Dans **cppdefs.h**

- Open Boundary Conditions */

undef TIDES

define OBC_EAST % (**define** pour une frontière ouverte et **undef** pour une frontière fermée)

undef OBC_WEST

define OBC_NORTH

define OBC_SOUTH

Annexe

- executer **make_grid** pour connaître les nouvelles **LLm** et **MMm**
- Exécute le programme: **ad_cfl.m** et on aura:
NTIMES dt NDTFAST

Et on aura aussi : **LLm** et **MMm** (**LLm=LLmo** et **MMm=MMmo**)

- edit **param.h**
- Ligne 47 # if defined golfe de Gabès
- Ligne 48 parameter (**LLm0=104, MMm0=127, N=32**)
- edit **roms.in** time_stepping:
- NTIMES dt[sec] NDTFAST NINF **2400 1080 60 1**

Pour un calcul de plusieurs années, plus précis, nombre d'années de calcul

- Dans **run_roms.csh**
- ligne 45 **set NY_START=1**
set NY_END=3
set NM_START=1
set NM_END=12