

Master océanographie physique et biogéochimique
OPB205: modélisation de la circulation océanique

Modélisation de la circulation océanique dans le Golfe du Lion



Clément Bouvier
Mai 2013

Table des matières

Résumé.....	3
Introduction.....	4
I)Matériel et méthode.....	5
1)Implémentation du modèle pour le Golfe du Lion.....	5
2) Les équations primitives.....	6
3)Conditions aux limites.....	7
II)Résultats et discussions.....	8
1)Diagnostique et stabilité du modèle.....	8
2)La circulation dans le Golfe du Lion.....	9
a)La formation d'eau dense.....	9
b) Le courant Nord.....	11
c) Circulation générale.....	12
Conclusion.....	15
Bibliographie.....	16

Résumé

Dans cette étude, il est question de proposer un modèle numérique dans le but de simuler la circulation océanique dans la région du Golfe du Lion. Nous proposerons pour ce devoir l'utilisation du modèle 3D ROMS ($\frac{1}{4}$ de résolution). Nous décrirons dans un premier temps la région du Golfe du Lion en insistant sur la variabilité saisonnière des régimes des vents dominant dont l'influence marquera la circulation océanique du golfe. Dans un second temps nous nous consacrerons à la description des équations de la dynamique des fluides utilisées pour le modèle et son implémentation pour la région souhaitée. Nous verrons dans un troisième temps comment les vents dominants que sont la tramontagne et le mistral jouent un rôle déterminant dans la formation d'eau profonde et de tourbillons dans la région. Nous étudierons également la variabilité saisonnière du courant Nord. Enfin nous verrons quelles sont les limites de notre modèle et comment apporter des améliorations à celui-ci.

Introduction

La modélisation est un outil puissant pour l'océanographe, il permet la représentation, l'interprétation et la compréhension de différents processus physiques et biogéochimiques. L'objectif de notre étude est d'implémenter un modèle réaliste de la circulation océanique pour la zone du Golf du lion et ses environs.

Le Golfe du lion appartient au bassin Ouest de la Méditerranée (voir carte page de présentation). C'est la partie la plus ventée de la Méditerranée (Andrea M. Doglioli Notes sur la Circulation Générale en Méditerranée). Les vents dominants sont:

- Le mistral qui souffle du Nord, depuis la vallée du Rhône et qui s'oriente Nord Ouest une fois dans le golfe.
- La tramontane qui vient de l'Ouest, Nord Ouest (entre les Pyrénées et la Massif Central).

Ce sont des vents froids et secs qui soufflent le plus souvent simultanément toute l'année et à toute saison. Ce sont des vents de Nord Ouest qui atteignent leurs maximum de puissance et qui soufflent sur des périodes plus longues durant la saison froide, de Novembre à Avril. Ces vents atteignent en hiver des vitesses de 15 à 25m/s et soufflent sur des périodes pouvant aller jusqu'à une semaine. Ils sont aussi très fréquent. En été il soufflent moins fort et pendant des périodes moins longues, de deux à quatre jours. La présence de ces vents très puissants dans le Golfe du Lion est la raison du choix de ma zone pour l'implémentation de mon modèle. Il est en effet intéressant de voir quel est l'impact de ces vents sur les paramètres physiques de l'eau de mer dans cette zone et également d'étudier le contrôle de ces vents sur la circulation océanique générale du Golfe du Lion. « le Golfe du Lion est un système côtier de morphologie complexe où la marée est insignifiante. Sa circulation est alors uniquement influencé par les vents, les apports fluviaux, la circulation générale (le courant Nord) », (Andrea M. Doglioli Notes sur la Circulation Générale en Méditerranée).

Pour cette étude, nous allons utiliser le modèle ROMS (Regional Oceanic Modeling System). L'objectif de cette étude est d'observer et d'examiner l'impact des vents sur la circulation océanique du Golfe du Lion. Nous étudierons également dans ce devoir la variabilité saisonnière de cette circulation. Notre modèle s'étendra de 38,5°N à 44°N pour la latitude et de 0,5°E à 9,3°E pour la longitude.

I) Matériel et méthode

1) Implémentation du modèle pour le Golfe du Lion

Pour faciliter, l'interprétation et pour comprendre les origines ou les impacts des différentes circulation de masse d'eau, nous avons choisi pour notre grille, des latitudes et longitudes qui correspondent à un domaine plus vaste que le Golfe du Lion ($38,5^{\circ}\text{N}$ - 44°N et $0,5^{\circ}\text{E}$ - $9,3^{\circ}\text{E}$). En ce qui concerne les paramètres de cette grille, ceux ci sont décrits ci-dessous dans le tableau 1.

résolution	Taille de la grille	Taille de la grille	Nombres de niveaux verticaux	Profondeur min à la cote
1/4	LLm=87	MMm=80	N=32	75m

Tableau 1: paramétrage de la grille

Lorsque l'on édite la « mask » sur laquelle on fera tourner le modèle, je choisi de fermer la cote au Nord Est (au niveau de Genova) et de fermer l'espace « mer » entre la Sardaigne et la Corse.

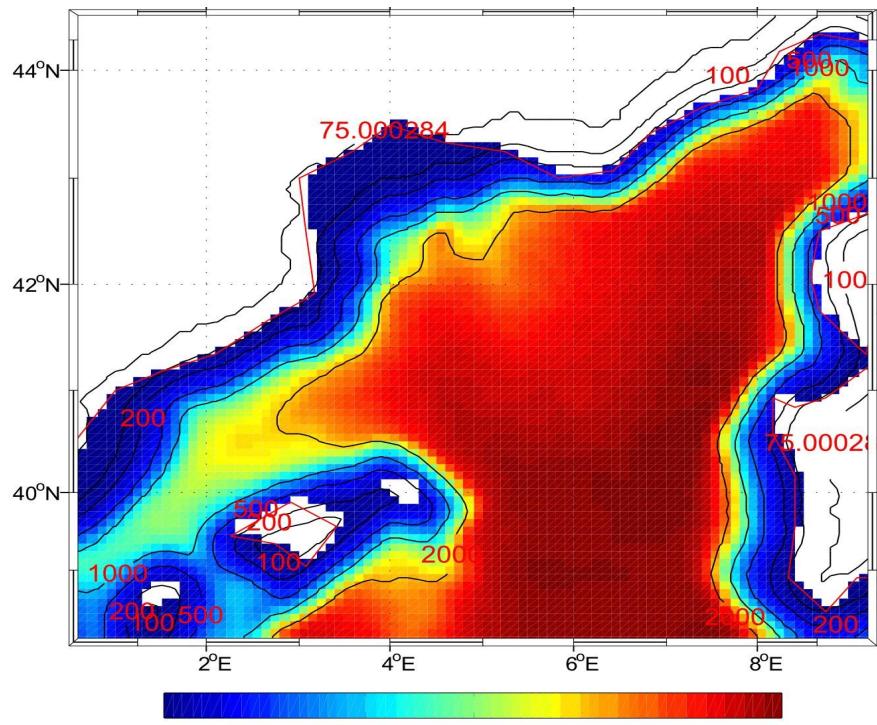


figure 1: Carte bathymétrique Golfe du Lion ('mask')

Sur la base du critère cfl on a pu calculer le pas de temps interne(DTI) et externe(DTE) de notre modèle. On trouve un DTE de 18 et un DTI de 1080. NDTfast est le rapport entre les deux DTI/DTE. NDTfast= 60

Pour mon modèle, un jour correspond à 80 itérations et donc un mois (=30jours) correspond à 2400 itérations. Pour diminuer les temps de calcul , on fait réaliser au modèle une sortie tous les trois jours (NAVG)=240.

On aura donc un modèle qui simulera pour 30 jours, répétée sur 10ans et qui sera archivé tous les trois jours.

2) Les équations primitives

Le modèle ROMS que l'on va utiliser pour notre étude résout les équations primitives de Navier-Stokes (1), couplées à l'équation de continuité (2), à des équations de conservation de la chaleur et de la salinité (3), ainsi qu'à l'équation d'état de l'eau de mer (4). Les formulations de ces équations dépendent de diverses hypothèses, simplifications et méthodes de calculs.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + U \cdot \nabla u - fv = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + A_h \nabla_h^2 u + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

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

Équation de Navier Stockes (1)

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Equation de continuité (2)

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

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

Équation de conservation de la chaleur et de la salinité (3)

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

Équation d'état de l'eau de mer(4)

u et v les vitesses horizontales

T la température et S la salinité

f= la force de Coriolis (avec approximation beta)

p=pression

ρ= la masse volumique

Ah et Av les coefficients de viscosité horizontaux et vitaux

Le modèle ROMS est un modèle numérique tridimensionnelle appliquée au domaine marin qui permet de calculer des paramètres physiques, biogéochimiques, tout en prenant en compte les variations de la surface libre de des océans. Pour pouvoir résoudre ces équations, on fait des approximations et des hypothèses qui sont:

-L'hypothèse hydrostatique. Elle transforme l'équation de la composante verticale du mouvement.

-L'approximation de Boussinesq qui estime les variations de masse volumique négligeables.

-L'approche de Reynolds qui permet la fermeture de la turbulence en introduisant des concepts d'écoulement moyen et de coefficients de viscosité turbulente: A_x ; A_y ; A_z .

-On fait l'hypothèse que les coefficients verticaux de viscosité turbulente sont égaux:

On dit que $A_x = A_y = A_z$. Ces coefficients sont calculés par l'approche de Marge et Al (1994) dite à K-profil et les coefficients horizontaux sont calculés avec l'approche de Smagorinski.

3) Conditions aux limites

Des conditions aux limites pour la surface libre et pour le fond sont appliquées pour la paramétrisation des coefficients verticaux et représenter fidèlement les processus physiques qui y sont liés (cisaillement au fond, forçage atmosphériques de surface). Les conditions aux frontières latérales sont paramétrables (fermées aux côtes ou ouvertes sur l'océan) pour s'adapter à la zone d'étude et reproduire des entrées et sorties de champ réalistes. La discrétisation spatiale du modèle ROMS est la suivante : à l'horizontal, des coordonnées curvilignes sont utilisés avec une grille décalée type Arakawa C. A la verticale, ce sont les coordonnées σ qui sont utilisés. Concernant la discrétisation temporelle, la méthode de séparation des pas de temps (mode splitting) est choisie. Les conditions de stabilité entre la discrétisation spatiale et temporelle sont établies par un critère de stabilité de type CFL (Courant Friedrichs-Levy). Les conditions initiales du modèle peuvent être alimentées par différentes données comme ICOADS, QuickSCAT et WOA par le biais des scripts `make_forcing.m` et `make_clim.m`.

II) Résultats et discussions

1) Diagnostique et stabilité du modèle

Pour avoir une idée sur la stabilité de notre modèle, il est intéressant d'observer les variables diagnostiquées sur dix ans. L'étude de ces variables diagnostiques permettent de vérifier la conservation de la masse de notre modèle. La figure 1 représente l'évolution de certaines de ces variables au cours des dix années simulées.

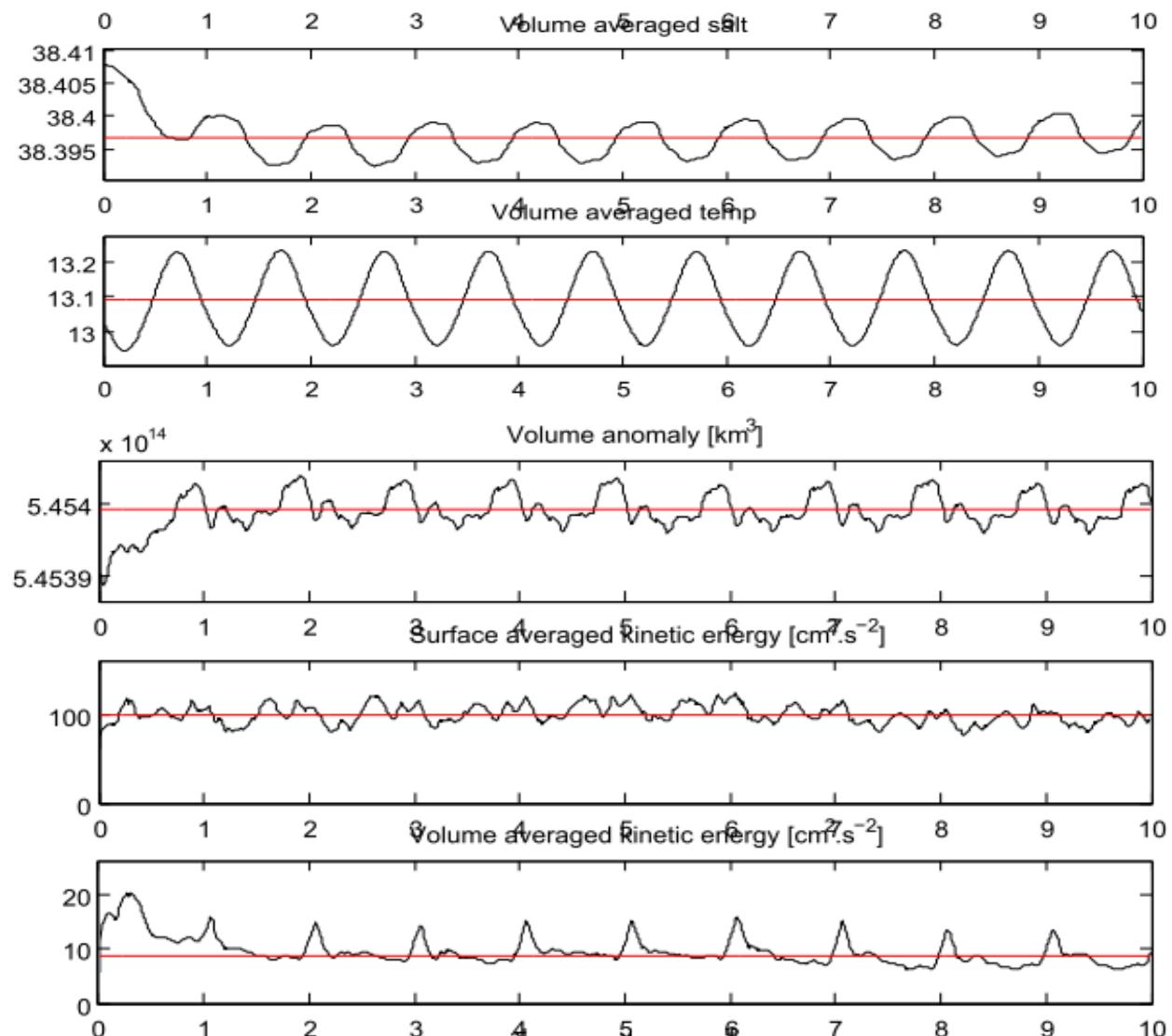


figure 2: Les variables diagnostiques du modèle

On peut voir que le temps que mettent les variables à s'orienter autour d'une valeur moyenne (en rouge) est faible (une année environ). Le modèle est donc stable, les conditions de conservation sont respectées.

2) La circulation dans le Golfe du Lion

a) La formation d'eau dense

Pour ce chapitre, on choisira d'expliciter les résultats du modèle pour l'année huit ou neuf. La dynamique du Golfe du Lion est fortement influencé par la présence de vent nord Ouest froid et sec. On a donc appliqué ces conditions atmosphériques pour notre modèle (figure3). Ce vent puissant de Nord Ouest va provoquer en hiver une remontée d'eau profonde (plus dense que l'eau de surface) à la côte (upwelling) et un refroidissement de la surface de la mer. La combinaison de ces deux phénomènes entraîne la formation d'eau dense dans cette zone.

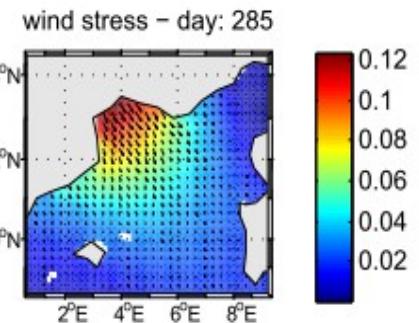


figure 3: stress du vent sur le Golfe du Lion

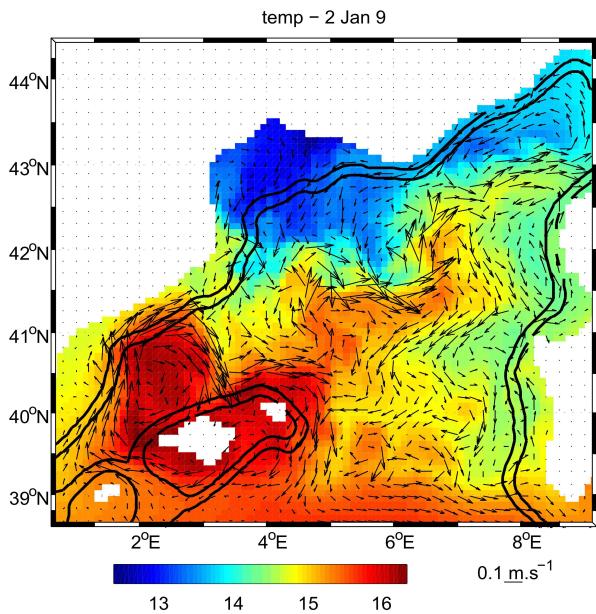


Figure 4: Température de surface du Golfe du Lion (Janvier année 09)

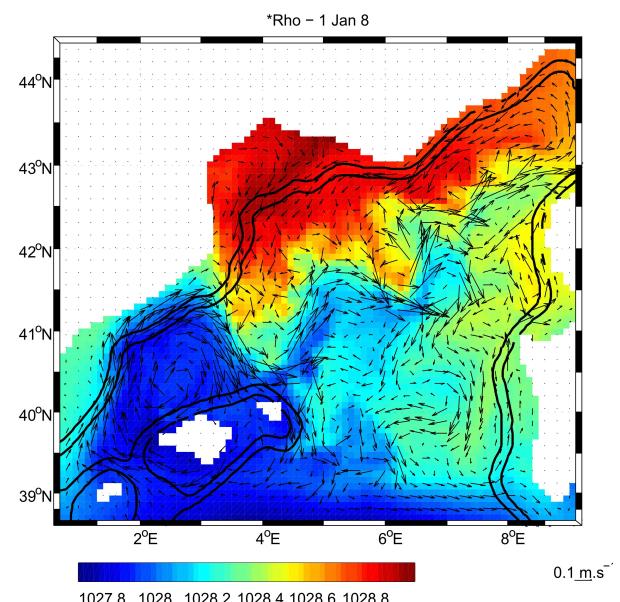


figure 5: Masse volumique (surface) du Golfe du Lion (Janvier année 09)

Comme on peut le voir sur les figures 4 et 5, en Hiver (Janvier de l'année 09) la température de surface dans le Nord du golfe est faible à cause du vent, cette baisse de la température de surface entraîne une augmentation de la masse volumique de surface (figure5). L'eau de surface devient plus lourde que les couches plus profondes et va donc avoir tendance à couler vers les profondeurs. C'est le processus de formation d'eau dense. On voit très bien sur ce modèle l'influence du vent Nord/Nord-Ouest sur le Golfe du Lion par la direction des vecteurs courants. De plus, on remarque que la masse volumique de surface passe de 1028.5 kg.m^{-3} au l'extrémité Nord du golfe à 1028 kg.m^{-3} au large des

cotes au milieu du bassin occidental méditerranéen. On voit bien sur ce modèle l'influence du vent sur la température de surface et le lien direct avec la masse volumique de l'eau de mer. Ce modèle montre bien le processus de formation d'eau dense en hiver.

Pour appuyer notre démonstration on peut se concentrer à présent sur la figure 6 qui représente la hauteur de la couche de surface, en anglais HBL: Height boundary layer. La couche de surface (HBL) est aussi appelée couche de mélange. Elle est fonction des forçages de surface, de la flottabilité et du profil du vent. Sa profondeur est estimée à partir d'un nombre de Richardson critique. (Renault, 2008, impact des jets côtiers atmosphériques sur l'upwelling du système de courants de humboldt). Lorsqu'il y a formation d'eau dense, l'eau de surface plonge en profondeur et la couche de mélange (HBL) s'approfondit. On a donc une couche de surface plus profonde et plus « épaisse ». On peut donc observer ce phénomène sur la figure 6. Au large du Golfe du Lion, là où il y a formation d'eau dense, la couche de surface s'épaissit. Elle passe de 70m à 140m de profondeur. Cette figure confirme bien la plongée des eaux denses de surface dans le Golfe du Lion dû au forçage du vent en hiver.

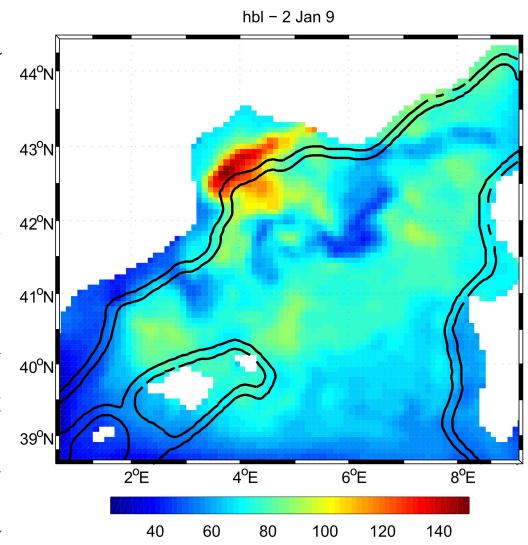


figure 6: épaisseur de la couche de mélange (janvier année 09)

On peut confirmer ce processus de formation d'eau dense avec la figure 7 qui représente la coupe vertical de la température proche de la côte jusqu'à 50km au large au mois de janvier de l'année 09. On peut voir que la colonne d'eau n'est pas stratifiée et on peut bien voir le processus de plongée des eaux de surface vers les profondeurs. Si l'on compare les figures 7 et 8 qui représentent la même variable (temp) en hiver et en été, on s'aperçoit que l'on trouve une colonne d'eau beaucoup plus stratifiée en été. Concernant le processus de formation des eaux denses dans le Golfe du Lion, la variabilité saisonnière est donc bien représentée dans ce modèle.

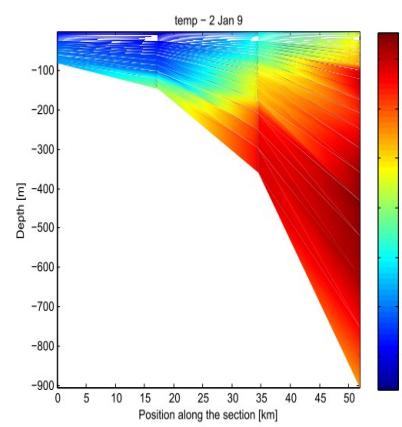


figure 7: coupe verticale de la température (hiver)

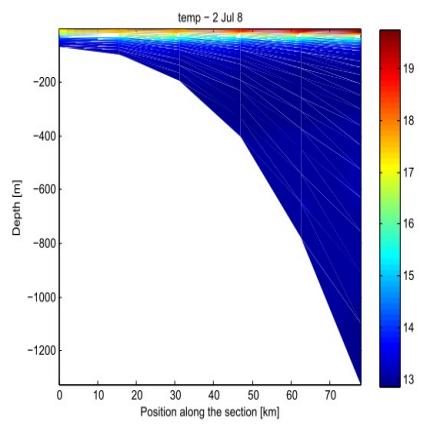


figure 8: coupe verticale de la température (été)

b) Le courant Nord

Si l'on se reporte à la figure 9, on peut voir les vecteurs vitesses des courants de surface. On remarque au niveau du cap de Toulon, (partie Est du Golfe du Lion) un courant d'Ouest qui longe la côte. Si l'on se reporte à la figure 5 (masse volumique de surface), on peut remarquer que ce courant sépare plus ou moins franchement les eaux côtières de celles du large. C'est le courant Nord. Ce courant est fortement guidé par la bathymétrie, il longe le talus continental du Golfe du Lion d'Est en Ouest. Il a une largeur variable, très étroit voire quasi inexistant à l'est de Marseille et s'élargit au large de Montpellier (Doglioli, circulation générale en Méditerranée). On peut vérifier ces caractéristiques sur la figure 9. Le courant Nord est une veine qui présente une forte variabilité saisonnière. (Millot 1991). En été, le courant Nord diminue d'intensité. Sur la figure 10, le courant Nord n'est plus visible, il est quasi inexistant. Ce modèle valide donc la théorie de Millot.

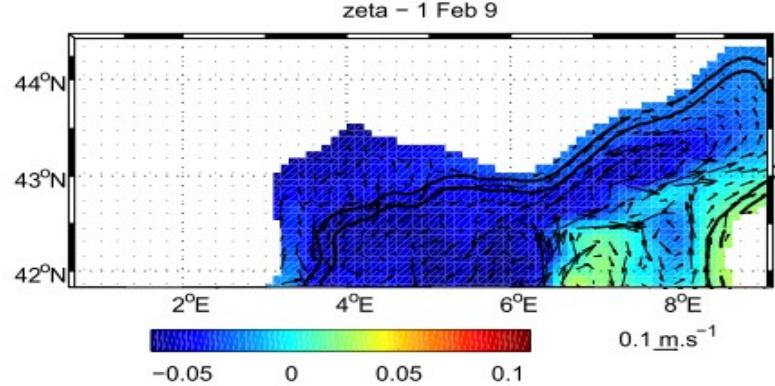


figure 9: le courant Nord en hiver (fevrier 09)

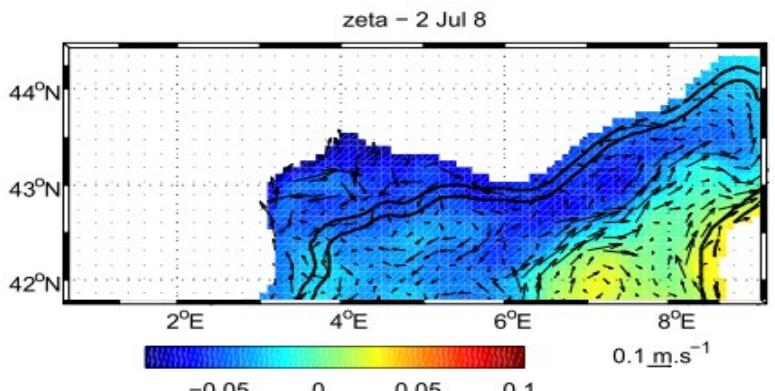


figure 10: Le courant Nord en été (juillet 08)

On a vu les caractéristiques du courant Nord en surface, on peut étudier le comportement de ce courant en profondeur avec le profil vertical des vitesses de courant u (figure 11). On établit le profil vertical du courant Nord à 43°N , 6°E . On voit clairement sur le profil le courant Nord avec des vitesses de courant maximales entre 20 et 40 km de la côte. Cette figure nous permet de valider la présence de ce courant en hiver. Il faut cependant faire attention car les paramètres de la grille appliquée à ce modèle ne permettent pas de valider le fait que le courant Nord soit présent à des profondeurs aussi élevées que celles décrites ici.

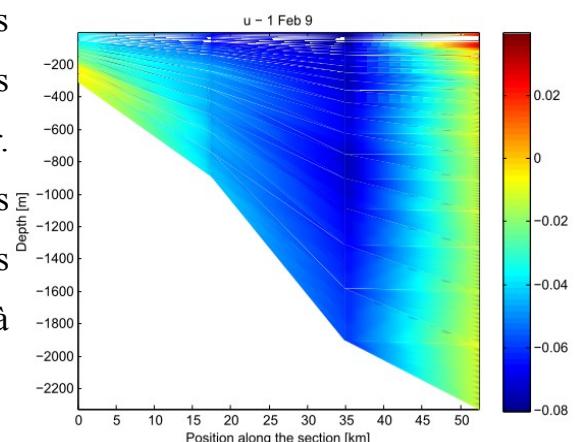


figure 11: profil vertical des vitesses de courant u (fevrier9)

c) Circulation générale

On a vu dans une première partie de quelle manière les vents dominants (Mistral et Tramontagne) influaient dans les processus de formation d'eau dense dans le Golfe du Lion, on a pu remarquer la présence d'un courant, le courant Nord, dans notre modèle. Nous allons porter notre étude dans cette partie de notre devoir sur les structures tourbillonnaires présentent dans notre modèle. Les vents de nord-nord-ouest qui soufflent dans le Golfe du Lion et particulièrement en hiver provoque la formation de structures anticycloniques et cycloniques. On peut en effet observer sur la figure 12, la formation en hiver d'un tourbillon anticyclonique au large de Barcelone. Il s'agit d'un tourbillon à cœur chaud. On observe également une surélévation du niveau de la mer ($\zeta > 0$) en son centre, ce qui indique bien la présence d'une telle structure. Toujours sur la figure 12, on observe en hiver au large de Toulon un tourbillon cyclonique (ou à cœur froid). On remarque à l'inverse de précédemment un abaissement du niveau de la mer ($\zeta < 0$) par rapport au niveau moyen. Il s'agit donc bien d'un tourbillon cyclonique. Il est certain que le vent est l'un de moteurs fondamental de la formation de tels structures. Cependant, la figure 12 montre que le courant Nord pourrait également jouer son propre rôle dans la mise en place des structures tourbillonnaires.

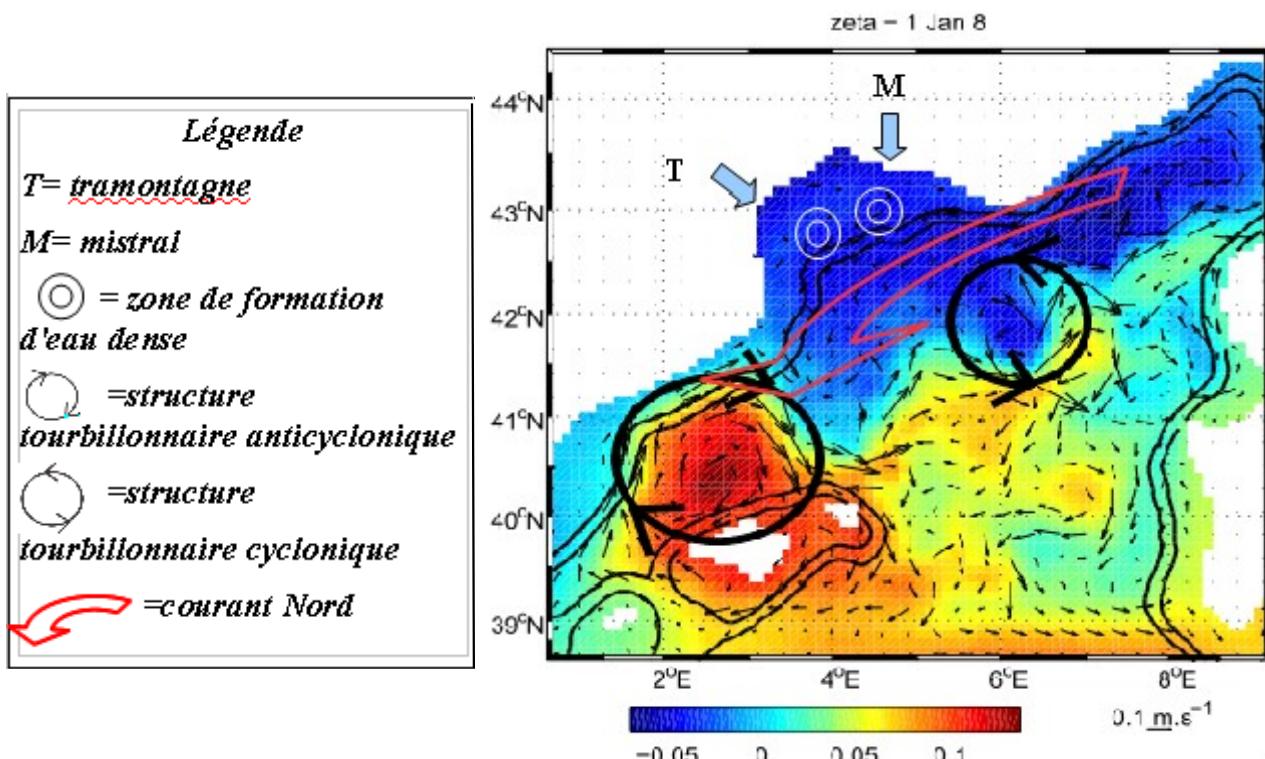


figure 12: la circulation générale dans le Golfe du Lion en hiver (janvier, année 08)

Nous allons voir que ces structures tourbillonnaires présentent également une variabilité saisonnière importante. On montrera donc l'influence des vents sur ces structures.

En été lorsque les vents dominants s'affaiblissent en intensité et qu'ils soufflent sur des périodes moins longues, les structures anticycloniques et cycloniques ne sont quasiment plus visible. De plus comme le courant Nord diminue en intensité, celui-ci ne peut plus alimenter de façon aussi marquées ces structures.

On peut aussi évoquer la présence d'un tourbillon anticyclonique au large de la Sardaigne (figure12, $40,5^{\circ}\text{N}$; 7°E). Ce tourbillon comme les précédents est plus marqué en hiver, lorsque le mistral et la tramontane souffle fort.

En été une nouvelle structure à l'ouest de la corse. Il s'agit d'un tourbillon anticyclonique d'une cinquantaine de kilomètre.(figure13).

Nous avons pu voir les différentes caractéristiques de la circulation océanique générale dans le Golfe du Lion. On a pu voir que c'est un espace qui présente une importante variabilité de phénomènes.

Des structures tourbillonnaires, le courant Nord, la formation d'eau dense et des cellules d'upwelling et de downwelling. C'est une zone particulièrement intéressante pour l'océanographie. De nombreuses mesures comme de nombreux modèles ont été réalisés dans cette zone, et il aurait été intéressant d'établir des comparaisons et de comprendre la raison des écarts qui opposent les différentes études réalisées dans la zone. Cependant l'objet de mon exposé était de présenter la circulation océanique dans le Golfe du Lion avec le modèle numérique ROMS et je ne m'étendrais donc pas sur des comparaisons avec des campagnes en mer réalisée ou avec d'autres modèles.

Il est tout de même intéressant de revenir rapidement sur les résultats obtenus de la coupe verticale des vitesses de courant u établit pour le courant Nord. Je rappelle que je trouve une profondeur de courant allant jusqu'à 2000m. Or en comparant mon modèle avec d'autres et avec les mesures réalisées en campagne océanographique, les profondeurs maximales du courant Nord ont été établit en hiver avec des profondeurs de 200m (Doglioli, circulation générale en méditerranée). L'écart est certainement du à la résolution relativement faible de mon modèle (niveaux vertical de 32) et le courant n' a pas le « temps » de s'atténuer en

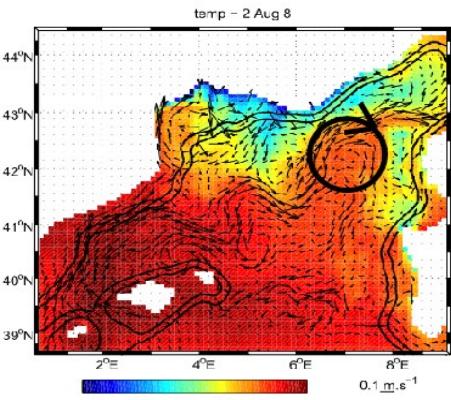


figure13: Le tourbillon anticyclonique Ouest Corse

profondeur. Le nombre de couche inférieure prise en compte pour mon modèle étant faible, les frottements qui en résultent sont trop faible pour représenter une profondeur de courant réelle. Cependant, le modèle établit permet de bien remarquer la présence du courant Nord et de représenter la circulation générale du Golfe et c'était bien l'objectif de mon étude.

Conclusion

On a vu dans un premier temps, le matériel et méthode pour la réalisation du modèle appliquée à la circulation océanique dans la région du Golfe du Lion. On a vu comment les conditions initiales ont été fixées. Il aurait été intéressant de tester des ouvertures ou fermetures lors de la définition de la mask de mon modèle. Pour ma part, j'ai tester un modèle avec une ouverture sur le bord Nord Est 44°N , 8°E . Je n'ai pas exposé les résultats de ce second modèle dans ce rapport car la circulation du Golfe du lion avec ce test d'ouverture n'a guère été modifiée. J'aurais aimé tester un modèle avec un domaine de définition plus large en prenant en compte le détroit de Gibraltar pour en voir sa circulation horizontal et vertical. Mais le sujet de mon devoir était porté sur l'étude du Golfe du Lion. Le détroit de Gibraltar sera peut être l'objet d'une prochaine étude.

Dans ma partie résultats, il est intéressant de voir comment les vents dominants que sont le mistral et la tramontagne influencent la circulation du Golfe du Lion, que ce soit dans le processus de formation d'eau dense ou dans la mise en place de tourbillons cycloniques et anticycloniques. Nous avons également vu dans ce devoir le courant Nord et le rôle qu'il avait pour la formation des mêmes tourbillons. Nous avons vu que ces différentes formes de circulation océanique présentait toutes une importante variabilité saisonnière. En hiver l'observation des différentes structures est plus facile qu'en été. La formation d'eau dense est flagrante, le courant nord y est le plus intense et les structures tourbillonnaires sont bien visibles en cette saison. En été comme les vents dominants faiblissent, il n'y a pas de formation d'eau dense et le courant Nord et les tourbillons y sont moins marqués. On remarque cependant en été le tourbillon anticyclonique situé à l'Ouest de la corse.

On a donc vu que le Golfe du Lion est une région intéressante en ce qui concerne la modélisation et que l'outil ROMS se trouvait être un bon outil et qu'il permettait la représentation d'un bon nombre de processus physique.

L'objectif de ce devoir qui était la modélisation de la circulation océanique du Golfe du Lion est réalisé, il serait à présent passionnant de tester par comparaison différents modèles avec différentes conditions initiales et différentes conditions d'ouverture ou de fermeture des frontières.

Bibliographie

Andrea M. Doglioli, Notes sur la Circulation Générale en Méditerranée, 2012

M.A. Ahumada and A. Cruzado Modeling of the circulation in the Northwestern Mediterranean Sea with the Princeton Ocean Model, 2007

Sschaffer, Impact of wind forcing on hydrodynamic circulation in the Gulf of Lions : high resolution modeling, 2010

Andrea M. doglioli, notes de cours et travaux dirigés de modélisation de la circulation océanique, 2013

Dufau-Julliand, Modélisation 3D réaliste de l'hydrodynamique du Golfe du Lion, Méditerranée Nord Occidentale, appliquée à l'expérience MOOGLI3, 2004