

IMBRICATION D'UN MODELE DE CIRCULATION DES EAUX PRES DES COTES TUNISIENNES DANS UN MODELE DE CIRCULATION DE LA MER MEDITERRANEE

Mohamed ALIOUA* et Ali HARZALLAH*

*Institut National des Sciences et Technologies de la Mer
28, rue du 2 mars 1934
2025 Salammbô

ملخص

إدماج نموذج لتتقل المياه المحاذات للسواحل التونسية في نموذج لتتقل المياه في كامل البحر الأبيض المتوسط: تهدف هذه الدراسة إلى وضع منظومة نمذجة رقمية لتتقل مياه البحر حذو السواحل التونسية. ولقد وقع استعمال نموذج به إمكانية الترفيع في دقته في مكان محدد وهو مؤطر في جوانبه الخارجية بنموذج آخر يعمل على كامل البحر الأبيض المتوسط ويقع استعمال النماذج بالتالي ابتداء من نموذج البحر الأبيض المتوسط وصولاً إلى السواحل التونسية عبر النموذج عالي الدقة. ولقد أظهرت النتائج أن هذا النظام مكن من محاكاة الخصائص الفيزيائية لمياه البحر وتقلها في خليج قابس بكفاءة ودقة عالية.

كلمات مفاتيح: نموذج، تتقل المياه، المياه التونسية، خليج قابس

RESUME

La présente étude a pour objectif la mise en place d'un système de modélisation numérique de la dynamique marine près des côtes tunisiennes. Pour cela on imbrique un modèle de circulation de l'eau près des côtes tunisiennes dans un modèle de circulation générale de la mer Méditerranée. La grille du modèle des côtes tunisiennes comporte la possibilité d'augmenter la résolution dans un domaine ciblé. Les conditions initiales pour ce modèle étiré sont obtenues par interpolation des états simulés par le modèle côtier à résolution constante. Vu sa résolution plus élevée, le modèle à grille étirée nécessite un long temps de calcul. Cependant les tests effectués avec ce modèle montrent que des simulations de 20 jours suffisent pour atteindre un équilibre dynamique. Les résultats des simulations avec un étirement sur le Golfe de Gabès confirment l'aptitude du modèle à grille variable à reproduire la circulation de l'eau et ses caractéristiques physiques.

Mots clefs: modèle numérique, circulation marine, imbrication de modèles, Golfe de Gabès

ABSTRACT

Nesting of a numerical model of water circulation along the Tunisia coasts in a numerical model of the Mediterranean sea : The present work aims at nesting a regional ocean model near the Tunisia coasts in a general circulation model of the Mediterranean Sea. The grid of the Tunisia coasts model includes a zooming option that permits the resolution increase in a given area. Initial conditions are obtained by the interpolation of the outputs provided by the regular grid model. The stretched model needs more computing time than the regular resolution one. But tests performed with this model have shown that a 20-day simulation is sufficient to reach a dynamical equilibrium. The stretched model reproduced efficiently the water circulation and characteristics in the Gulf of Gabes.

Key words: numerical model, water circulation, model nesting, Gulf of Gabes

INTRODUCTION

Circulation générale

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. Nous donnons dans ce qui suit une brève description de la dynamique marine en couvrant d'abord toute la Méditerranée et ensuite le détroit de Sicile et les côtes tunisiennes. Au détroit de Gibraltar se superposent deux veines d'eau; une veine Atlantique entrante (AW) et une autre méditerranéenne sortante (LIW). Ces deux écoulements inverses proviennent du gradient horizontal de pression dirigé vers

la Méditerranée dans la couche superficielle et vers l'Océan Atlantique dans la couche profonde (Lacombe et al., 1972 ; Harzallah and Koutitonsky, 2001). L'eau entrante est peu salée (36.5 psu en moyenne) comparée à l'eau sortante de type méditerranéenne de salinité plus élevée (38.7 psu en moyenne). Comme l'écoulement entrant de surface est plus intense que celui sortant dans des couches plus profondes, le bilan net de sel est équilibré. La différence entre le flux d'eau entrant et sortant équilibre, quant à elle, l'excès d'évaporation.

Lors de son cheminement vers l'est méditerranéen, la couche Atlantique superficielle se modifie en se mélangeant à l'eau méditerranéenne (elle devient MAW). Cette eau se transforme au niveau du bassin oriental en une eau levantine intermédiaire (LIW) plus dense et plus salée

sous l'effet du forçage atmosphérique (Lacombe and Tchernia, 1972 ; Pinardi et al., 1997). Elle s'enfonce ensuite vers des couches plus profondes et s'oriente vers l'ouest. Cette eau s'évacue ensuite dans l'océan Atlantique à travers le détroit de Gibraltar.

La circulation qu'on vient de décrire est appelée circulation thermohaline, maintenue par les gradients de température et de salinité. Cette circulation atteint des profondeurs de 300 à 500 m. Les veines des couches de surface et des couches intermédiaires traversent le détroit de Sicile dans les deux sens (Lascaratos et al., 1999)

Circulation de l'eau le long des côtes tunisiennes

Brandhorst (1977) a réalisé les premières descriptions complètes de la circulation des masses d'eau au large des côtes tunisiennes. Un schéma de circulation a été établi selon la répartition de la salinité des eaux. Les résultats montrent qu'en été le courant Atlantique détecté par son minimum de salinité (36.8 psu) s'écoule à une profondeur comprise entre 90 m et 250 m au niveau des côtes nord. Les eaux méditerranéennes ayant une salinité de 38.3 à 38.6 psu circulent à une profondeur de 200 à 220 m. En automne l'eau Atlantique circule au dessous d'une forte thermocline à une profondeur moyenne de 50 à 40 m. Au niveau du golfe de Gabès, la salinité est supérieure à 39 psu suite à une forte évaporation se faisant sur une eau de faible profondeur. Au printemps, les eaux de surface sont plus salées sous l'effet de la convection hivernale et les eaux de basse salinité sont plus accolées aux côtes tunisiennes ; une large couche de salinité inférieure à 37.1 psu associée à la branche tyrrhénienne s'étend autour du Cap Bon et le golfe d'Hammamet. De très faibles salinités de surface ont été observées au niveau du golfe de Tunis et sont dues au déversement des eaux de la Medjerda, principale rivière de la Tunisie.

Les Modèles numériques mis en place

Dans ce travail on utilise trois modèles. Un modèle de circulation générale de la Méditerranée et deux versions d'un modèle des côtes tunisiennes ; l'une est régulière et l'autre est étirée. Il s'agit de modèles de circulation océanique basés sur POM (Princeton Ocean Model, Mellor, 2004). C'est un modèle numérique à surface libre utilisant un système de coordonnées sigma.

Le modèle numérique de la mer Méditerranée

La grille adoptée pour la Méditerranée est une grille curviligne à résolution variable. La figure 1 montre la distribution de cette grille. Le modèle comporte 190 points de grille en longitude, 54 points de grille en latitude et 28 niveaux verticaux. La résolution augmente dans les détroits de Gibraltar et de Sicile afin de résoudre correctement la circulation dans ces régions clefs. Une bathymétrie a été construite en se basant sur la base de données de la Méditerranée MODB (Mediterranean Ocean Data Base).

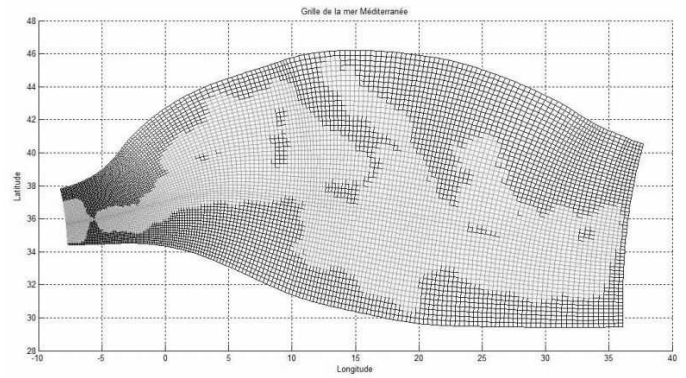


Fig. 1 : Grille curviligne du modèle de la mer Méditerranée

Des versions de ce modèle ont déjà été appliquées à d'autres bassins. Un modèle simulant l'hydrodynamisme (Harzallah and Koutitonsky, 2001) et les bilans d'eau, de sels et de chaleur dans la lagune de Bizerte (Harzallah et al., 2003) au nord de la Tunisie a été mise en place et testé avec succès. Un modèle de transport de sédiment a aussi été développé et couplé au modèle de circulation de la lagune (Hamouda, 2007).

Le modèle numérique des côtes tunisiennes

Les côtes tunisiennes sont représentées par deux types de grilles : une grille régulière et une grille étirée.

Le modèle régulier

La grille adoptée est régulière et cartésienne comportant 109 points en longitude, 129 points en latitude et 19 niveaux verticaux (figure 2).

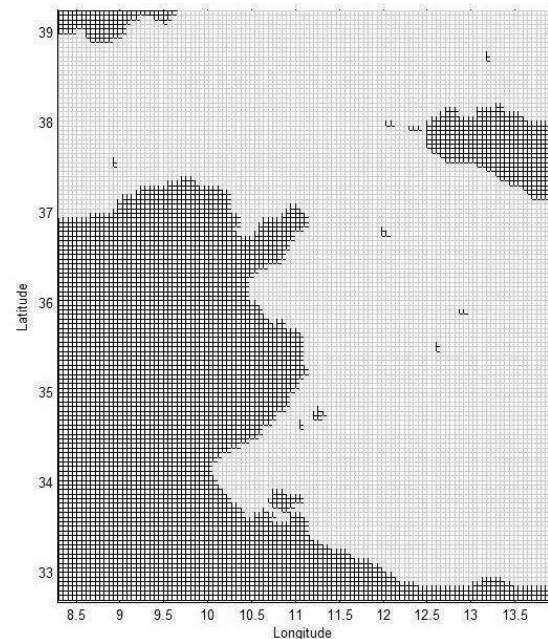


Fig. 2 : Grille rectiligne et régulière du modèle des côtes tunisiennes

La grille a une résolution de $0.05^\circ \times 0.05^\circ$. Ceci correspond à une résolution de 5 à 7 km selon la position en latitude. La bathymétrie du modèle régulier est issue de la carte marine du Canal de Sicile à l'échelle 1/750000 digitalisée initialement sur une grille régulière de $1/20^\circ$.

Le modèle à grille étirée

Il s'agit d'une grille basée sur la grille du modèle régulier avec une augmentation de la résolution dans un endroit choisi. L'intérêt de la grille étirée est d'augmenter la résolution en un endroit donné tout en couvrant le même

domaine que le modèle à grille régulière. Elle comporte 179 points en latitude et 212 points en longitude et 25 niveaux verticaux (figure 3). La bathymétrie du modèle à grille étirée est issue d'une combinaison de la bathymétrie du modèle à grille régulière et des données des cartes marines locales à une échelle de l'ordre de $1/64000$ et digitalisées sur une grille régulière de $1/200^\circ$. La figure 3 montre la distribution des points de la grille étirée et l'affinement obtenu au niveau du Golfe de Gabès.

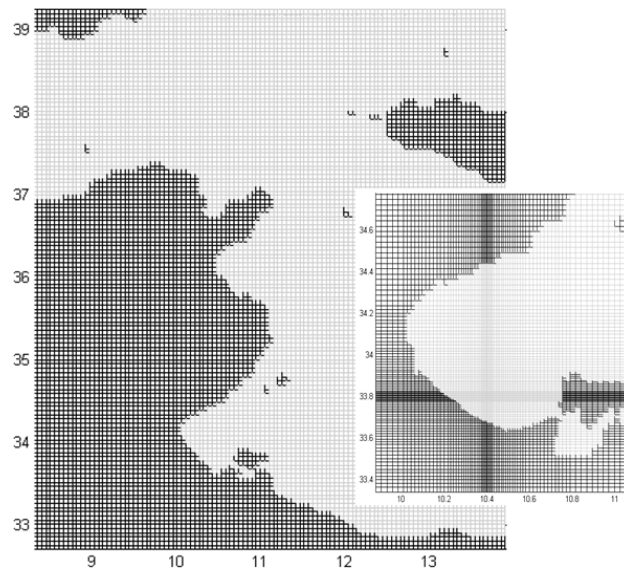


Fig. 3 : Grille rectiligne mais avec étirement dans le Golfe de Gabès. Modèle des côtes tunisiennes.

Forçages

Conditions initiales

Les conditions initiales utilisées pour démarrer les trois modèles sont des champs de température et de salinité. Pour la vitesse de déplacement de l'eau on démarre à partir de conditions au repos sauf pour le modèle étiré où on démarre à partir d'un état de redémarrage du modèle à grille régulière interpolé sur la grille étirée (voir détails plus loin). Les champs sont interpolés horizontalement et verticalement sur la grille de chaque modèle. Les valeurs de ces champs sont issues de la base de données MODB MED-6. Ces conditions initiales sont calculées pour chaque mois de l'année

Conditions aux limites latérales

Les conditions aux limites latérales des modèles sont :

- Pour le modèle de la mer Méditerranée on utilise une condition de radiation dans le détroit de Gibraltar dans laquelle le niveau à l'extérieur d'une zone tampon (de l'ordre de d'une centaine de kilomètres) est rappelé à une valeur constante. Il n'y a pas de conditions particulières pour la vitesse de déplacement de l'eau. Pour les conditions aux limites de température et de salinité, elles sont

rappelées progressivement aux valeurs climatiques dans la zone tampon. Pour les échanges avec la mer Noire on impose un apport constant d'eau de la mer Noire égal à $6000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. La température et la salinité sont rappelées aux valeurs climatiques au niveau du détroit quand l'écoulement est dirigé vers la Méditerranée ; elles sont calculées par advection quand l'écoulement est dirigé vers la mer Noire.

- Pour les modèles des côtes tunisiennes les conditions aux limites latérales proviennent des simulations du modèle de la circulation générale de la Méditerranée à intervalles de cinq jours. Ces champs sont la température, la salinité et la vitesse. Ils sont interpolés aux grilles utilisées.

RESULTATS

L'idée de base du modèle étiré est d'augmenter la résolution en un endroit donné tout en couvrant le même domaine que le modèle à grille régulière. De cette façon nous améliorons la résolution dans la région d'étirement tout en utilisant les mêmes conditions aux limites du modèle à grille régulière. Ceci évite le recours à la procédure d'emboîtement de modèles avec des étapes d'interpolations pour les conditions aux limites. Cette approche permet aussi de mieux tenir compte des interactions dynamiques des

phénomènes dans la zone d'étirement avec l'extérieur dans les deux sens qui ne peuvent se faire que de l'extérieur vers la zone d'étirement dans l'approche des modèles emboîtés.

Une contrainte de conception majeure est rencontrée lors de la mise en place du modèle à grille variable est le temps de calcul qui est fortement augmenté par l'augmentation du nombre de points de grille surtout selon la verticale (de 19 à 25). A haute résolution il n'est pas envisageable, surtout en mode opérationnel, de démarrer le modèle à partir d'un état initial donné et d'attendre que le modèle se stabilise. Le temps nécessaire pour l'exécution de cette tâche est trop important (quelques jours à plusieurs jours). Pour surmonter cette contrainte nous avons choisi l'approche suivante :

- Réaliser avec le modèle à grille régulière des simulations suffisamment longues pour obtenir un état stationnaire représentatif de la climatologie du milieu. Des états de redémarrage sont ainsi disponibles à des intervalles réguliers (tous les trois mois).

- Interpoler l'état de redémarrage du modèle à grille régulière correspondant au début de la période à simuler sur la grille étirée.

- Effectuer la simulation sur la période souhaitée.

Stabilisation des simulations

Les premiers tests ont permis d'estimer la période transitoire afin de statuer sur la durée des simulations à

effectuer pour atteindre un état stable. La figure 4 présente l'énergie cinétique des deux modèles régulier et étiré partant d'un même état de redémarrage et subissant les mêmes forçages. Au bout de 20 jours de simulation, l'énergie cinétique du modèle étiré se stabilise après une augmentation due au changement de la grille entre les deux modèles. L'énergie du modèle régulier reste bien sûr stable durant la simulation. La période de stabilisation minimale est donc de 20 jours.

Courants

En hiver, la circulation générale de surface est sous l'influence du vent moyen de direction nord-ouest. La figure 5 montre les champs de courants obtenus par le modèle régulier. Le modèle reproduit la circulation générale de cette région avec l'entrée de l'eau Atlantique dans le détroit de Sicile. Le modèle reproduit aussi de façon assez claire la circulation tourbillonnaire au niveau de Malte. Cependant la veine de courant passant au nord des côtes tunisiennes en hiver ne se divise pas suffisamment en deux branches au niveau du canal de la Sicile. La veine qui longe le nord de la Sicile est plus faible que ne le suggère les observations telles que celles de Poulain et Zambianchi (2007) qui utilisent des dériveurs Lagrangiens pour décrire le courant de surface (figure. 6).

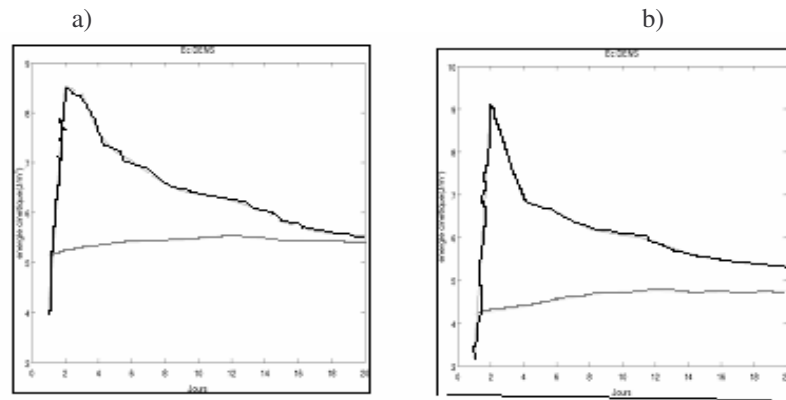


Fig. 4 : Densité de l'énergie cinétique du modèle régulier (ligne fine) et du modèle étiré (ligne épaisse) pour l'hiver (a) et l'été (b).

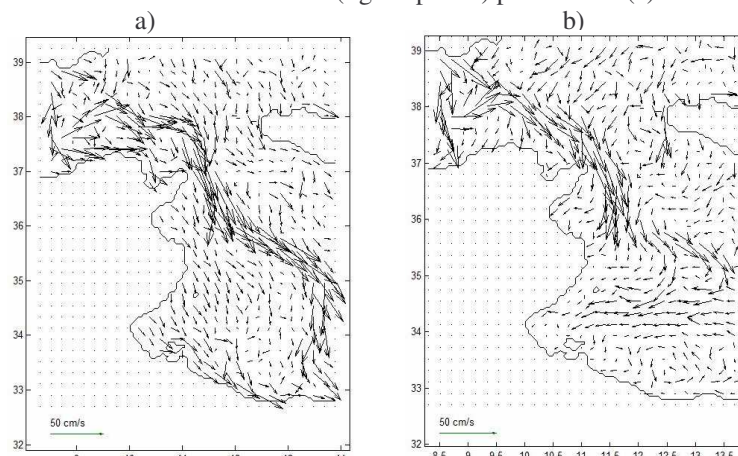


Fig. 5 : Courants de surface simulés par le modèle à grille régulière en hiver (a) et en été (b)

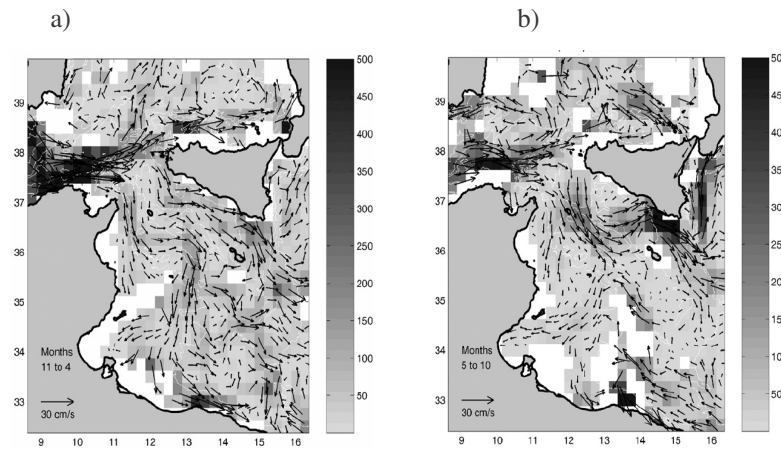


Fig. 6 : Courants de surface obtenus par les dériveurs Lagrangiens en hiver (a) et en été (b).
D'après Poulain et Zambianchi (2007)

En été une meilleure correspondance avec les résultats de Poulain et Zambianchi est obtenue. La différence de circulation en hiver est attribuée, soit aux conditions aux limites, soit au forçage atmosphérique. Le rôle que peut jouer le forçage atmosphérique dans la circulation de surface est illustré par les simulations faites par Demirov et Pinardi. Ces auteurs ont utilisé deux séries de données pour forcer un modèle de circulation générale de la Méditerranée. Le rotationnel de vent au niveau du détroit de Sicile est plus important dans la première série que dans la deuxième. La figure 7 montre les résultats obtenus en utilisant les deux séries de données. On peut observer sur cette figure l'effet du changement de forçage atmosphérique sur le comportement du courant de surface au niveau du canal de Sicile. Pour étudier l'effet du forçage

atmosphérique nous avons comparé des simulations faites avec le modèle de la Méditerranée forcé avec deux types de champs atmosphériques.

La figure 8a montre le courant de surface simulé par modèle de l'INSTM en utilisant les données du Centre National de Prévision de l'Environnement (NCEP). La figure 8b montre le courant de surface simulé mais en utilisant comme forçage atmosphérique des données issues du modèle LMDZ (Laboratoire de Météorologie Dynamique avec Zoom sur la Méditerranée) à plus haute résolution. Dans ce cas le modèle de la Méditerranée de l'INSTM simule de façon plus réaliste la division du courant Atlantique en deux branches au niveau de son arrivée à la pointe est de la Sicile.

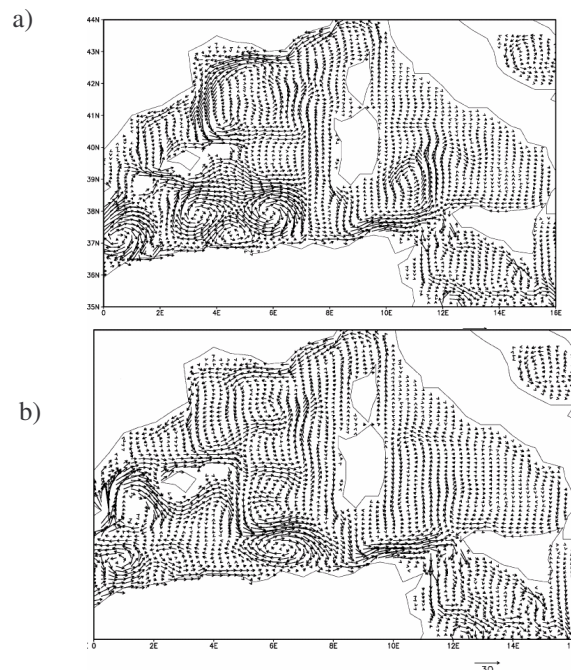


Fig. 7 : Courants de surface simulés par le modèle de la Méditerranée (a) en utilisant la première série de données et (b) en utilisant la deuxième d'après Demirov et Pinardi (2002)

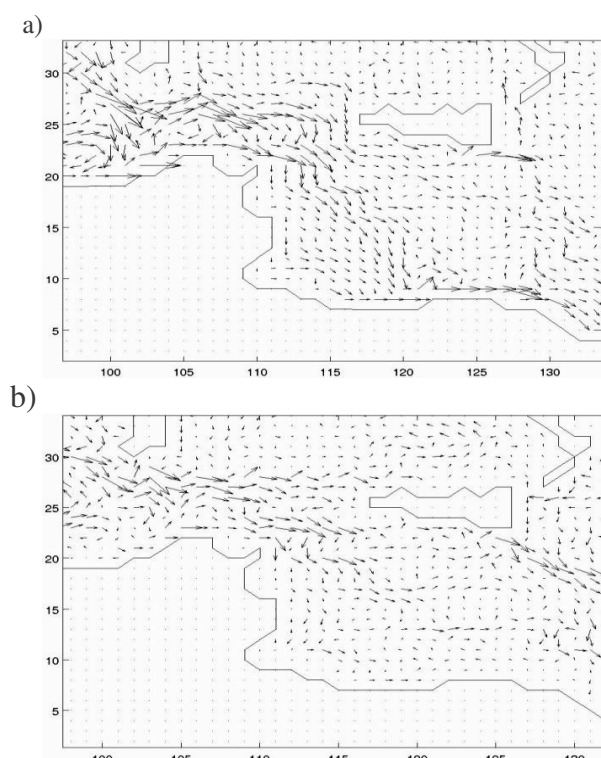


Fig. 8: Courants de surface simulés par le modèle de la Méditerranée de l'INSTM.

Salinité

La figure 9 montre les distributions de la salinité simulée par le modèle à grille régulière et par le modèle étiré pour la saison d'hiver. Les deux distributions sont assez similaires. Des différences existent en particulier dans le

golfe, la région où l'étirement est effectué. La salinité est augmentée dans les zones les moins profondes autour de Kerkenna et long des côtes du golfe. L'effet de la bathymétrie est mieux simulé par modèle étiré.

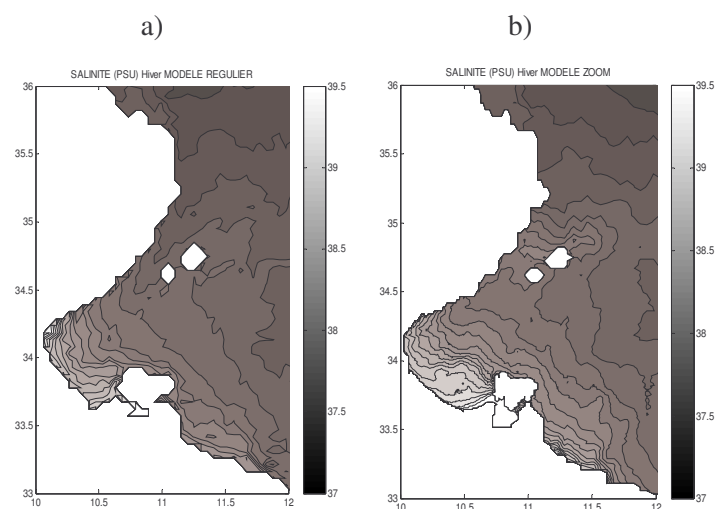


Fig. 9 : Salinité de l'eau de surface simulée en hiver par les modèles à grille régulière (a) et à grille étirée (b)

La figure 10 montre les salinités simulées en été. Le minimum de salinité est collé de façon plus importante aux côtes tunisiennes par rapport à l'hiver. Ceci est dû aux vents de surface qui sont dirigés de façon plus importante vers le sud-ouest (vers l'intérieur du golfe) en cette saison. Une partie de l'eau Atlantique arrive donc au Golfe de Gabès. Cela confirme aussi la différence de distribution des maximums de la salinité dans le Golfe de Gabès entre

l'hiver et l'été. En effet, en hiver les maxima sont localisés à l'intérieur du golfe alors qu'elles se trouvent plus au sud en été. Cette différence est due au courant d'origine Atlantique qui pénètre dans le golfe en été et ramène des eaux moins salées diminuant ainsi la salinité. En hiver ce courant est dirigé vers le sud est et ne pénètre que très partiellement dans le golfe. Ces résultats coïncident avec les courants de surfaces obtenus par les simulations.

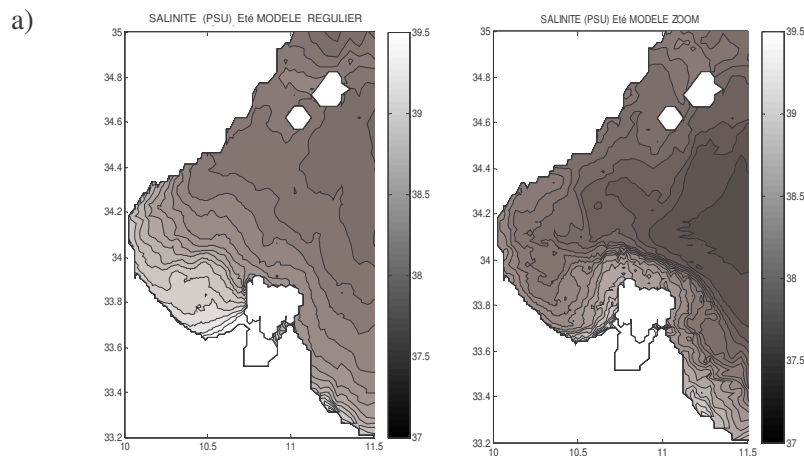


Fig. 10 : Salinité de l'eau de surface simulée en été par les modèles à grille régulière (a) et à grille étirée (b)

CONCLUSIONS

Ce travail a permis d'imbriquer un modèle de circulation des masses d'eau le long des côtes tunisiennes à grille variable pour une région donnée. Les simulations faites avec le modèle à grille étirée montrent que ce modèle est capable de simuler des détails qui ne sont reproduits que par un modèle standard à grille régulière. Le modèle étiré, étant démarré à partir d'un état de redémarrage du modèle à grille régulière pour économiser le temps de calcul, il a été démontré qu'une période transitoire de 20 jours est nécessaire pour obtenir une simulation stable. Ainsi le modèle étiré peut servir pour simuler la dynamique marine très localement en réponse à un événement atmosphérique particulier pourvu qu'on débute la simulation suffisamment en avance (une vingtaine de jours environ).

Remerciements

Ce travail a été financé par le projet de recherche national tunisien *MODEM* (Modélisation Opérationnelle pour une gestion Durable des Ecosystèmes Marins) et par le projet de recherche européen *CIRCE* (Climate Change and Impact Research: the Mediterranean Environment) du 6ème PCRD (Contract No 036961 GOCE) <http://www.circeproject.eu/>.

BIBLIOGRAPHIE

- Atraldi M., Gasparini G. P., Vertano A. and S. Vignudelli. 2001: Hydrographic characteristics and interannual variability of water masses in the central Mediterranean: a sensitivity test for long-term changes in the Mediterranean sea. *Deep Sea Research*, 49 :661-680.
- Brandhorst W., 1977 : Les conditions de milieu au large de la côte tunisienne. *Bull. Inst. Nat. Sci. Tech. Océanogr. Pêche Salammbô*, 4 :129-220.
- Demirov E. and N. Pinardi, 200: Simulation of the Mediterranean Sea circulation from 1979 to 1993: Part I the interannual variability. *Journal of Marine Systems*, 33-34, 23-50.
- Hamouda, A.Y., 2007: Développement d'un modèle de transport de sédiments : application à la lagune de Bizerte, Rapport de Mastère, ENIT 2007.
- Harzallah A., Brahim M., Sammari C. and V. Koutitounsky, 2003: Water, salinity and heat budgets in the Lagoon of Bizerte estimated from observations and model simulation, *Proceeding of JICA3*.

- Harzallah A. and V. Koutitonsky, 2001: Observations and simulations of the hydrodynamics of the Bizerte Lagoon. Proceeding of the fifth international conference on the Mediterranean Coastal Environment. 23-27 October, Hammamet, 1101-1110.
- Lacombe H. and P. Tchernia, 1972: The Mediterranean Sea. Dowden. Hutchinson and Ross, Inc.
- Lascaratos A., Roether W., Nittis K. and B. Klein, 1999 : Recent change in deep water formation and spreading in the eastern Mediterranean Sea : a review. Progress in oceanography, 44 :5-36.
- Mellor G. L., 2004: Users guide for a three-dimensional primitive equation numerical ocean model. Princeton University, Princeton, NJ, 08544-0710.
- Pinardi N., Korres G., Lascaratos A., Roussenov V., and E. Stanev. 1997: On the interannual variability of the Mediterranean Sea upper ocean circulation. Geophys. Res. Lett., 24 : 425-428.
- Poulain P.-M. and E. Zambianchi, 2007: Surface circulation in the central Mediterranean Sea as deduced from lagrangian drifters in the 1990's. Continental Shelf Research, 27, 981-001.