

YANN DRILLET

ROMAIN BOURDALLÉ-BADIE

LAURE SIEFRIDT

Tests de sensibilité dans le modèle haute résolution Mercator

Annales mathématiques Blaise Pascal, tome 9, n° 2 (2002), p. 283-298

http://www.numdam.org/item?id=AMBP_2002__9_2_283_0

© Annales mathématiques Blaise Pascal, 2002, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la revue « Annales mathématiques Blaise Pascal » (<http://math.univ-bpclermont.fr/ambp/>) implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (<http://www.numdam.org/conditions>). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques
<http://www.numdam.org/>

Tests de sensibilité dans le modèle haute résolution Mercator

Yann Drillet
Romain Bourdallé-Badie
Laure Siefridt

Résumé

Le projet MERCATOR vise, à l'échéance 2003, à fournir un système de prévision pré-opérationnel des courants océaniques. Celui-ci doit simuler l'océan mondial avec un modèle aux équations primitives à moyenne résolution dans lequel sont assimilées des données altimétriques et in situ. Dans le même temps un prototype à haute résolution couvrant l'Atlantique Nord et la Méditerranée (PAM) est développé. C'est dans la phase de mise au point de ce prototype que cette étude a été réalisée. Des tests de sensibilité ont été effectués dans le but d'améliorer la calibration du modèle avant le branchement de l'algorithme d'assimilation de données qui sera utilisé dans le nouveau système analyse prévision (PSY2). Les tests réalisés concernent le contexte de l'expérience et non les paramétrisations elles mêmes. Il s'agit de la bathymétrie qui représente la condition limite au fond, du forçage atmosphérique qui représente la principale source d'énergie responsable des circulations, et le rappel dans la masse à la température et à la salinité dans la région clé du Golfe de Cadix. Ils améliorent respectivement la pénétration de la dérive nord Atlantique, l'intensité de la cellule méridienne de retournement et la plongée de la veine d'eau méditerranéenne dans l'Atlantique.

1 Introduction

Le développement du système de prévision opérationnel à très haute résolution de l'Atlantique Nord et de la Méditerranée (PAM [8]) est un des objectifs principaux du projet Mercator. Ce système permettra de fournir une description en temps réel ainsi que des prévisions de l'état de l'océan dans ses trois dimensions avec une représentation réaliste des phénomènes méso-échelle. Aujourd'hui le premier système quasi-opérationnel d'analyse

et de prévision de l'océan (PSY1) fournit chaque semaine des champs de température, salinité, vitesses sur l'Atlantique Nord et tropical. Le domaine simulé s'étend de 20°S à 70°N avec une résolution de $\frac{1}{3}$ de degré (entre 12 et 37 km). On sait qu'une meilleure représentation des phénomènes océaniques passe aujourd'hui par un raffinement de la résolution horizontale des modèles. Ainsi l'effort dans le développement du deuxième système de prévision Mercator (PSY2) a été essentiellement basé sur une amélioration très importante de celle ci. La grille développée pour cette nouvelle configuration du modèle [6] est une grille Mercator au $\frac{1}{15}$ de degré tournée de 90° sur l'Atlantique (équateur fictif à 60° ouest et pôle fictif à 30° est), raccordée à une grille Mercator classique au $\frac{1}{16}$ de degré sur la Méditerranée (figure 1). La résolution la plus fine est ainsi ciblée sur le détroit de Gibraltar (5 km) tandis que la résolution la plus grossière est située à 60° Ouest (7 km). Outre les réglages numériques spécifiques à la haute résolution, les paramétrisations physiques sont très proches entre les deux systèmes. On peut donc attribuer les améliorations de PSY2 par rapport à PSY1 principalement à ce raffinement de la résolution horizontale. La grille verticale possède dans les deux prototypes 43 niveaux, mais ils ont été répartis différemment. Une résolution plus fine en surface a été adoptée pour le prototype PSY2 avec des premiers niveaux de 6 m d'épaisseur contre 12 m dans le prototype précédent. Cela a pour conséquence de dégrader la résolution au fond en Atlantique avec des niveaux de 300 m au lieu de 200 m.

Toutefois l'augmentation de la résolution ne résoud pas instantanément tous les défauts qui ont été observés à moyenne résolution. Nous allons décrire ci-après les améliorations obtenues grâce à des tests de sensibilité effectués à haute résolution.

2 Configuration du Prototype Atlantique Nord Méditerranée.

Le modèle d'océan utilisé pour le projet MERCATOR est le code numérique OPA développé au LODYC [5]. Ce modèle résoud les équations primitives l'hypothèse du toit rigide et une fermeture turbulente à l'ordre 1.5. La discrétisation horizontale du domaine est faite sur une grille C dans la classification d'Arakawa et la coordonnée z est utilisée sur la verticale. La diffusion et la viscosité horizontale sont paramétrées par un opérateur bilaplacien, le mélange vertical est paramétré par le schéma de mélange TKE. La bathymétrie

TESTS DE SENSIBILITÉ DANS LE MODÈLE HAUTE RÉOLUTION MERCATOR

du modèle a été interpolée à partir de la base de données Smith et Sandwell [11] qui a une résolution de $1/30^\circ \cos(\text{latitude})$. Les champs d'initialisation du modèle sont issus des climatologies Reynaud [12] pour l'Atlantique et MODB [9] pour la Méditerranée. Les forçages atmosphériques proviennent des prévisions à 6h du Centre Européen de Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT) à partir desquelles des champs journaliers de flux et de vent sont calculés.

Pour cette configuration du modèle, qui compte 56 millions de points de grille, la mémoire nécessaire est de 30Go et le temps de calcul sur un VPP5000 est de 180 heures par année de simulation. Quatre expériences PAM05, PAM10, PAM14, PAM20 décrites dans le tableau ci-dessous sont par la suite comparées. Le coût de ce modèle ne nous a pas permis de faire tous ces tests de sensibilité dans des conditions idéales. On notera que parfois plus d'un paramètre a pu varier.

Expérience	Forçage	Bathymétrie	Zone de rappel	Durée
PAM05	cep98. $40W/m^2$	brute	Sud Nord	12 ans
PAM10	cep98. $40W/m^2$	lissée	Sud Nord	16 mois
PAM14	cep9800 $20W/m^2$	lissée	Sud Nord Cadix	16 mois
PAM20	98,99,00 $20W/m^2$	lissée	Sud Nord Cadix	3 ans

TAB. 1 – *cep98: Forçage mars 98- à février 99 du CEP; cep9800: Moyenne des forçages de mars 98 à février 00; 98,99,00: années 98,99,00 successivement; rappel en surface de 40 ou $20W/m^2$; la simulation PAM20 est la suite de PAM14*

3 Les défauts identifiés dans le modèle

Dans cet article nous nous focalisons sur les problèmes rencontrés dans le modèle en Atlantique Nord, la Méditerranée étant étudiée par ailleurs [7]. La circulation générale dans ce bassin est composée de deux gyres principaux : le gyre subpolaire et le gyre subtropical qui sont séparés par un des principaux courants du globe, le Gulf Stream. La bonne représentation de ce courant est un des objectifs essentiels de ce modèle. A moyenne résolution, des quantités comme le volume d'eau qu'il transporte ou sa température peuvent être bien simulés. Par contre le niveau d'énergie cinétique turbulente, l'intensité des

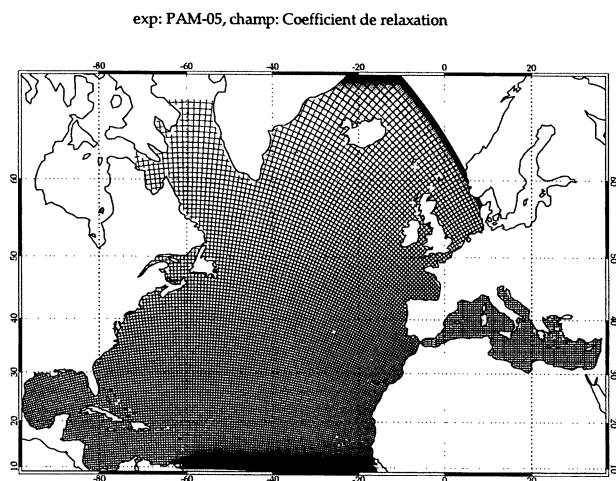


FIG. 1 – Grille du modèle PAM, 1 point sur 64. La zone grisée représente la zone éponge qui sert de limite aux frontières nord et sud. Les coefficients de relaxation aux champs climatologiques saisonniers de température et de salinité varient dans cette région de 3 à 100 jours.

vitesse ou le décollement du courant au niveau du Cap Hatteras sont en général assez mal reproduits. Le décollement du Gulf Stream au Cap Hatteras nous a particulièrement préoccupé car il semblait que le raffinement de la résolution pouvait être une condition suffisante à la bonne représentation de ce phénomène.

En réalité de nombreuses paramétrisations peuvent avoir un impact sur le comportement du jet au voisinage de l'accident bathymétrique que représente le cap. L'accroissement de la résolution a tout de même l'effet le plus remarquable, le décollement du Gulf Stream est nettement plus réaliste dans les simulations PAM que dans les expériences CLIPPER [4] avec le même modèle d'océan mais à des résolutions plus basses ($\frac{1}{3}$ et $\frac{1}{6}$ de degré). L'accroissement de la résolution horizontale allant de pair avec une meilleure représentation de la bathymétrie dans un modèle en coordonnées z , il est difficile d'attribuer l'amélioration au seul raffinement de la grille. On sait par exemple que l'utilisation d'une coordonnée σ qui permet de mieux représenter la topographie a un impact très important sur le décollement du Gulf Stream.

Les autres principaux défauts identifiés sont le transport trop faible dans le détroit de Floride (source du Gulf Stream), la mauvaise pénétration de la dérive Nord Atlantique, la faible intensité du front des Açores, une fonction de retournement méridienne trop faible et une mauvaise plongée des eaux méditerranéennes dans l'Atlantique.

Nous avons réalisé un certain nombre de tests sur les conditions de frottement latéral, sur la valeur des coefficients de diffusion et de viscosité et sur l'influence de l'intensité du vent qui n'ont pas été très concluants, ils ne seront donc pas détaillés par la suite.

D'autres tests réalisés permettent en partie de résoudre ces principaux problèmes, ils sont décrits par la suite avec l'influence directe de ces changements sur la solution du modèle.

4 Les solutions proposées dans les différentes expériences

4.1 Lissage de la bathymétrie

La bathymétrie initiale a été obtenue par simple interpolation de la base de données Smith et Sandwell sur la grille du modèle. Les accidents topographiques (pics, creux, chenaux et rides) de moins de 2 mailles ont ensuite

été supprimés de façon systématique. Le lissage supplémentaire de la bathymétrie qui a été réalisé dans la simulation PAM10 est relativement faible puisqu'il consiste en trois filtres de Shapiro successifs appliqués à la bathymétrie précédente (figure 2). Il permet de conserver tout le réalisme et les fines structures du fond des océans tout en supprimant suffisamment d'accidents topographiques qui augmentent le frottement et créent des circulations très bruitées au voisinage du fond. Le lissage a en particulier permis de régulariser certains détroits, comme celui de Floride, sans modifier de façon notable leur volume.

Ce traitement de la bathymétrie a eu plusieurs impacts immédiats qui sont probablement liés. Tout d'abord le transport dans le détroit de Floride qui conditionne la puissance du jet côtier qu'est le Gulf Stream avant sa séparation à la côte, a été augmenté de 1.5 Sv soit 6%. Cette augmentation est loin d'être négligeable puisqu'elle permet de passer d'un transport moyen de 25 Sv dans la simulation PAM05 à 26.5 Sv dans PAM10 pour une valeur observée supérieure à 30 Sv.

L'augmentation de puissance du jet côtier dans cette expérience n'a pas d'impact sur le décollement, par contre la trajectoire du Gulf Stream est considérablement modifiée et plus précisément son extension Nord Atlantique. La bifurcation de la dérive Nord Atlantique au niveau du "North West Corner" est un élément important de la circulation en Atlantique Nord car elle transporte de l'eau chaude dans cette zone et influe donc sur le gyre sub polaire et sur le courant du Labrador. En comparaison aux observations, la pénétration et la trajectoire de la dérive Nord Atlantique sont, après le lissage de la bathymétrie, nettement plus réalistes (figure 3).

4.2 Forçages interannuels

Le forçage atmosphérique de surface de l'océan est sa principale source d'énergie et conditionne très fortement la circulation océanique. Si l'on veut obtenir un état moyen de la circulation océanique il faudrait donc pouvoir prescrire un état moyen des forçages atmosphériques. On souhaite généralement utiliser cet état moyen pour la phase de spin up du modèle d'océan.

Ce forçage moyen atmosphérique, appliqué de façon périodique plusieurs années successives, permet de plus d'étudier le modèle soumis à sa seule variabilité interne.

On peut cependant se poser la question de la signification géophysique de cet état moyen qui sous-entend que l'atmosphère, et donc le système couplé

TESTS DE SENSIBILITÉ DANS LE MODÈLE HAUTE RÉOLUTION MERCATOR

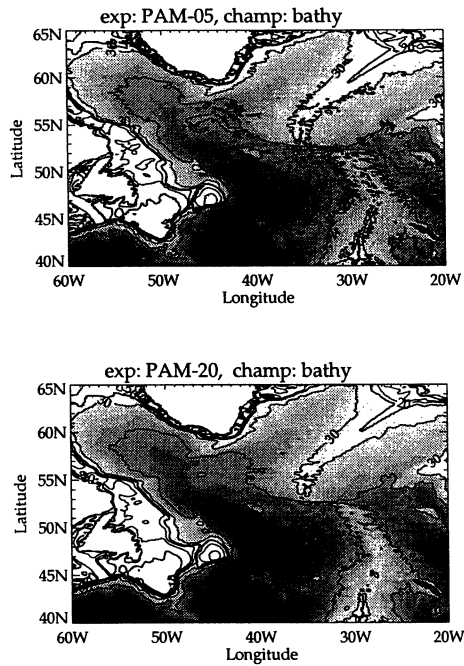
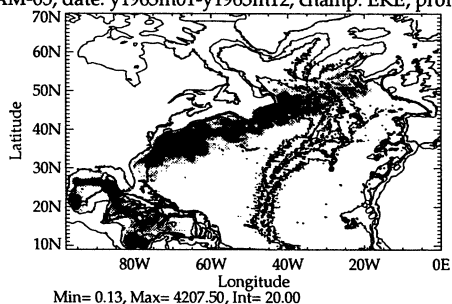


FIG. 2 – Bathymétrie du modèle PAM avant et après lissage dans l'Atlantique nord ouest (un contour tous les 1000 m). Le lissage du "North West Corner" au large de Terre Neuve a un effet direct sur la trajectoire du Gulf Stream. La dorsale Medio Atlantique a également été lissée en conservant la fracture Gibbs (35° ouest, 53° nord)

exp: PAM-05, date: y1963m01-y1963m12, champ: EKE, profondeur: 44 m



exp: PAM-20, date: y1999m01-y1999m12, champ: EKE, profondeur: 44 m

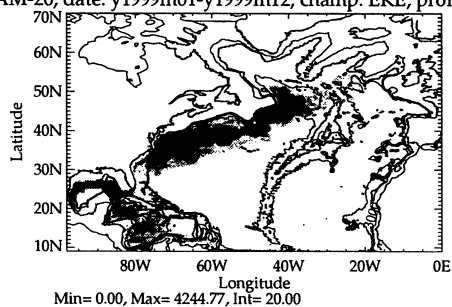


FIG. 3 – Energie cinétique turbulente à 44 m de profondeur en cm^2/s^2 et contour de bathymetrie à 1000, 2000, 3000 et 4000 m. La zone noircie représente la région de maximum d'EKE ($> 100\text{cm}^2/\text{s}^2$). A noter la meilleure pénétration de la dérive Nord Atlantique au delà du "North West Corner" (45° ouest 48° nord)

TESTS DE SENSIBILITÉ DANS LE MODÈLE HAUTE RÉOLUTION MERCATOR

océan-atmosphère, est dans un état stable sur la période de la description de cet état.

Il existe actuellement plusieurs jeux de forçages qui diffèrent par leur origine (système d'analyse et de prévision du CEPMMT, NCEP, Météo France, ... ou bien ensembles de données issus de mesure in situ ou satellitales), leur résolution spatiale et la période représentée.

Dans le cadre de Mercator, le choix s'est porté sur les analyses du CEPMMT. Les analyses météorologiques fournies sont reconnues pour leur bonne qualité, et bénéficient d'une grille régulière et globale, et de la prise en compte des observations satellitales et in situ disponibles. Durant la dernière décennie, le système d'analyse prévision a bénéficié de progrès notables, notamment en ce qui concerne la résolution spatiale atteinte, mais aussi le système d'assimilation (4D-VAR) et la prise en compte des observations satellitales comme les vents diffusiométriques ERS.

La résolution permet en particulier de représenter les reliefs et donc des structures météorologiques à des échelles qui ont leur importance pour le forçage d'un modèle à la résolution de PAM. Par exemple la représentation réaliste du mistral en Méditerranée n'est effective dans les prévisions du CEP que depuis avril 1998, date à laquelle une grille TL319 (équivalente à 0.5626° en grille Gaussienne régulière) a été implantée dans le modèle spectral.

La fréquence journalière qui a été choisie permet également de bien représenter la variabilité du vent qui est une source importante d'énergie pour l'océan. Par contre nous ne représentons pas le cycle diurne, ce qui pourrait se justifier en particulier pour le flux solaire, mais qui nécessiterait une discrétisation verticale plus fine de l'océan, avec des couches de surface de l'ordre de 1 m d'épaisseur et non de 6 m.

Les tests qui ont été réalisés sur le forçage diffèrent uniquement par la période représentée par ces forçages, la résolution du modèle d'atmosphère et la fréquence de forçage étant identiques.

La première expérience PAM05 a été forcée en répétant 11 fois l'année 1998. Le forçage est apparu assez particulier, avec une anomalie chaude dans le Nord Ouest de l'Atlantique inhibant dans un premier temps la formation d'eau profonde en mer du Labrador. Le mélange étant par la suite très accentué par des vents anormalement forts dans la même région. Par ailleurs, la mer des Caraïbes est également au cours de l'année 98 une région de forçage particulière avec des vents d'est faibles (année El Niño) ce qui a pour conséquence de limiter la quantité d'eau entrant dans la mer des Caraïbes et, par suite, dans le Golfe du Mexique.

La répétition périodique de ce forçage a ainsi introduit des “biais systématiques” dans la simulation PAM05 qui ont eu en particulier pour conséquence de former un jet du Gulf Stream légèrement sous estimé à sa source au détroit de Floride.

Des mesures de transport d'eau entre la Floride et les Bahamas sont disponibles grâce à la présence d'un câble téléphonique reconverti pour des utilisations scientifiques. Nous estimons un transport annuel moyen de 25 Sv dans la simulation PAM05, alors que les mesures indiquent un transport moyen variant entre 30 et 35 Sv et sans que l'année 1998 apparaisse comme une année de transport particulièrement faible. Le forçage 1998 semble cependant pénaliser particulièrement ce transport dans le modèle. Les années 1999 et 2000, conjointement au lissage de la bathymétrie, permettent d'atteindre des valeurs proches de 27 Sv dans la simulation PAM20. Ce transport est toujours déficitaires, mais comparables à ce qu'indiquent les modèles de résolution inférieure et équivalente. Il semble donc que le forçage de l'année 1998 soit à l'origine d'un déficit de transport spécifique à la configuration PAM05, mais que les modèles actuels ne puissent simuler des transports réalistes dans cette région.

Enfin un dernier impact très important lié aux différents forçages est l'intensité de la circulation thermohaline dans le domaine. Cette circulation est représentée par la fonction de courant méridienne (figures 4 et 5) qui est l'intégrale sur la verticale de la moyenne zonale des vitesses méridiennes.

Outre la circulation de surface dans la couche d'Ekman, elle met en évidence deux cellules principales de signes opposés dans l'Atlantique Nord. La cellule supérieure qui est la plus intense représente la circulation de subsurface. Dans les 1500 premiers mètres cette circulation est globalement orientée vers le Nord car elle est largement dominée par le Gulf Stream et son extension Nord Atlantique. Le maximum d'intensité de cette cellule de retournement est important car il est directement relié à la quantité de formation d'eau profonde que l'on voit s'écouler vers le sud dans le fond de l'Atlantique ouest entre 2000 et 3000m. Enfin, on note la discontinuité vers 38° nord signature de l'entrée d'eau méditerranéenne en Atlantique. Sur la quatrième année de l'expérience (1964 pour PAM05 et 2000 pour PAM20) l'intensification de la cellule supérieure de la circulation est de 3.2 Sv sur le maximum et entre 2Sv et 3Sv sur l'ensemble du bassin entre 500 et 1500m de profondeur, ce qui représente de 20 à 30% d'augmentation. La cellule négative, en dessous de 4000 m, correspond aux eaux de fond Antartique qui sont les plus denses. Elles ont été créées dans les zones de convection de l'At-

TESTS DE SENSIBILITÉ DANS LE MODÈLE HAUTE RÉOLUTION MERCATOR

lantique Sud et s'écoulent jusqu'en Atlantique nord. Dans nos simulations de quelques années cette circulation n'est pas influencée par les forçages.

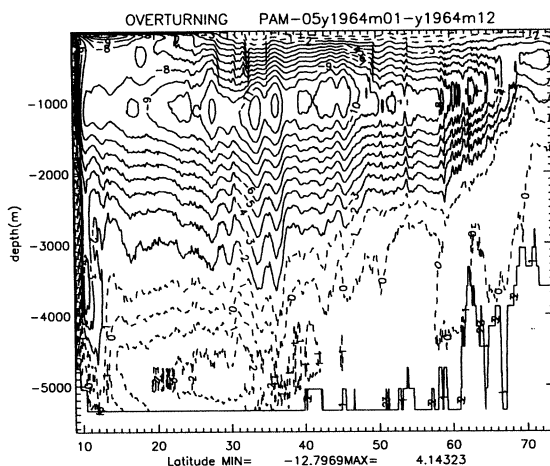


FIG. 4 – Fonction méridienne d'overturning de PAM05. Boucle de circulation intermédiaire globalement orientée vers le nord en sub-surface et circulation moins intense au fond du bassin. On remarque vers 38° Nord l'entrée de l'eau méditerranéenne dans l'Atlantique.

4.3 Zone de rappel dans le Golfe de Cadix

Un des problèmes identifiés dans les modèles en coordonnée z est la représentation des écoulements sur les seuils. Dans notre domaine, le passage de l'eau méditerranéenne en Atlantique par le détroit de Gibraltar est un excellent exemple de ce phénomène. L'eau méditerranéenne, plus chaude mais beaucoup plus salée, est plus dense que l'eau atlantique. Elle s'écoule au fond du détroit tandis que l'eau atlantique rentre en Méditerranée en surface. Après le seuil du détroit qui se trouve vers 250 m, les observations montrent que la veine d'eau Méditerranéenne plonge dans le Golfe de Cadix et se stabilise aux alentours de 1000-1200 m. Ce phénomène de plongée est mal représenté à cause de la bathymétrie en marche d'escalier, la veine d'eau reste donc vers 750 m (figure 6). Or une grande partie de l'eau méditerranéenne s'écoule par la suite vers le Nord en longeant les côtes portugaises

et on peut la retrouver jusqu'au large de l'Irlande. Cette masse d'eau très distincte influence tout l'Atlantique Nord Est et son mauvais positionnement va transformer fortement les caractéristiques de température et de salinité des eaux atlantiques.

Une solution technique consistant à faire du rappel vers les conditions de température et salinité climatologiques a été adoptée. Le rappel se fait sur un disque de 3 degrés de rayon centré à 8° Ouest, 35° Nord. Il est maximal au centre de ce disque avec un temps de rappel de 25 jours. Sur la verticale le rappel n'est appliqué qu'en dessous de 500 m, il croît ensuite linéairement jusqu'à 1000 m et reste constant jusqu'au fond. L'effet de ce rappel est immédiat, la veine d'eau principale se positionne comme dans la climatologie en dessous de 1000 m. Une veine supérieure vers 700 m reste présente dans le modèle analogue à celle observée lors de campagnes de mesures comme SEMANE.

Le danger d'effectuer un rappel trop fort dans la masse est de supprimer une partie importante de la variabilité. Ce serait d'autant plus dommageable que c'est la zone de formation des tourbillons d'eaux méditerranéennes (MEDDIES). Ces lentilles d'eaux salées se forment au niveau du Cap St Vincent par l'interaction de la veine d'eau méditerranéenne très énergétique

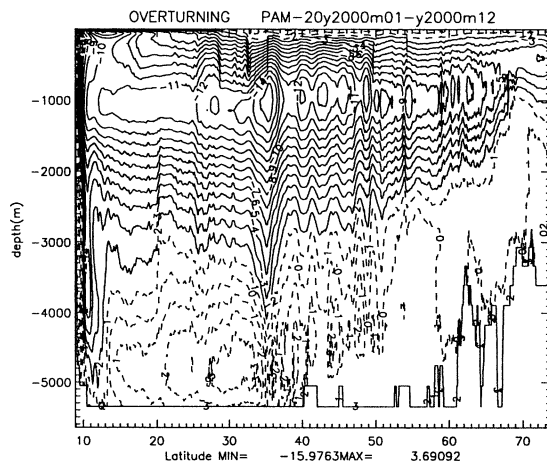


FIG. 5 – Fonction méridienne d'overturning de PAM20. Le forçage interannuel a permis d'augmenter le maximum d'overturning de 3.2 Sv soit 20%

TESTS DE SENSIBILITÉ DANS LE MODÈLE HAUTE RÉOLUTION MERCATOR

et de la topographie. Ces tourbillons conservent ensuite des propriétés très homogènes au cours de leur déplacement. Dans la réalité comme dans le modèle la durée de vie des Meddies est de plusieurs années et leurs trajectoires peuvent être très variées avec un déplacement privilégié vers l'ouest. La zone de rappel dans le Golfe de Cadix ne détruit pas cette activité mésoéchelle, le nombre de tourbillons est semblable entre les deux simulations. Ce qui diffère essentiellement c'est l'endroit de formation de ces tourbillons. Avec la zone de rappel les tourbillons se détachent légèrement au Nord du Cap St Vincent. Cependant la zone de formation des tourbillons qui coïncide avec le maximum de vorticité est toujours positionnée vers 750 m là où le rappel n'a encore que peu d'effet.

Les tourbillons simulés sont proches des Meddies observés dans leurs caractéristiques de température, salinité et vitesse et en nombre de tourbillons créés, leurs trajectoires et leur durée de dissipation. Leur positionnement sur la verticale est par contre trop haut par rapport aux observations. Même après plusieurs années de déplacement vers l'est le maximum de salinité dans le tourbillon n'est jamais situé en dessous de 1000m.

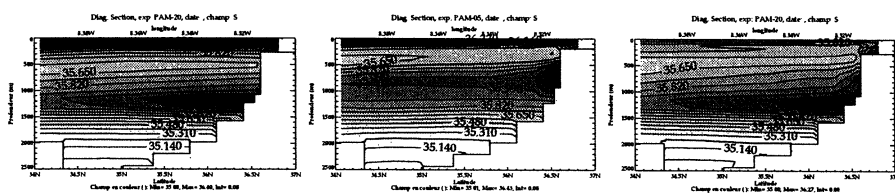


FIG. 6 – Coupe de salinité dans le Golfe de Cadix. A gauche la climatologie, au centre l'expérience PAM05 et à droite PAM20. Noter que dans l'expérience PAM20 la veine d'eau méditerranéenne se trouve en dessous des 1000 m de profondeur comme dans la climatologie alors qu'elle se situait vers 800 m dans l'expérience PAM05.

5 Conclusion

Le modèle servant au Prototype Atlantique Nord Méditerranée de Mercator a aujourd'hui atteint un stade satisfaisant pour ce qui est de la représentation réaliste des grands courants mais également de phénomènes méso échelles.

Les Meddies dont nous avons parlés précédemment sont présents dans le modèle, mais celui-ci simule également de façon satisfaisante les tourbillons du Golfe du Mexique, les anneaux chauds et froids qui se détachent du Gulf Stream ou encore les upwellings le long des côtes africaine et portugaise. C'est dans cette configuration que le modèle a été couplé à une méthode d'assimilation de donnée SOFA [10], basée sur l'interpolation optimale. C'est tout d'abord en assimilant les données altimétriques fournies par les satellites Topex/Poseidon et Jason que le deuxième système d'analyse et de prévision de l'océan (PSY2) va démarrer en 2002. Ce nouveau système Mercator sera ensuite amélioré tant du point de vue de l'assimilation de données que du modèle seul. Après les données satellitales ce sont les données in situ qui seront assimilées, puis un nouveau schéma d'assimilation basé sur le filtre de Kalman (SEEK [3]) sera implanté. Pour le modèle, les améliorations envisagées sont l'implantation d'une frontière ouverte à 9°N qui pourrait permettre une meilleure représentation des circulations dans la zone "éponge" associée à la frontière fermée. De nouvelles paramétrisations physiques comme le schéma de mélange vertical KPP [2] ou une paramétrisation de la couche limite de fond (BBL [1]) seront également testées dans cette configuration.

Références

- [1] Beckmann A. et Dorschner R. A method for improved representation of dense water spreading over topography in geopotential-coordinate models. *J. Phys. Oceanogr.*, 1997. 27, 581-591.
- [2] Barnier B. et Brasseur P. Modélisation de la couche de mélange océanique et assimilation de données spatiales au moyen du filtre seek dans la configuration atlantique nord au 1/3° natl3. Rapport final Groupe Mission Mercator, 2001.
- [3] Testut C.E. Assimilation de données satellitales avec un filtre de Kalman de rang réduit dans un modèle aux équations primitives de l'océan atlantique. PH D Thesis Université J Fourier, Grenoble., 2000.
- [4] Treguier A.M. et al. An eddy permitting model of the Atlantic circulation. evaluating open boundary conditions. *J. Geophys. Res.*, 2001.

TESTS DE SENSIBILITÉ DANS LE MODÈLE HAUTE RÉOLUTION MERCATOR

- [5] Madec G., Delecluse P., Imbard M., et Lévy C. OPA8.1 ocean general circulation model reference manual. Notes du pôle de modélisation IPSL, 11., 1998.
- [6] Blanchet I. et Siefridt L. Achieving the grid and the bathymetry construction for the mercator prototype. Rapport interne Mercator, 1998.
- [7] Béranger K. Modélisation aux équations primitives à très haute résolution de la circulation générale de la Méditerranée. Rapport annuel Groupe Mission Mercator, 2002.
- [8] Siefridt L., Drillet Y., Bourdalle-Badie R., Beranger K., et Greiner E. Mise en oeuvre du modèle mercator à haute résolution sur l'atlantique nord et la méditerranée. Newsletter Mercator, 2002.
- [9] Brasseur P., Beckers J., Brankart J., et Schoenauen R. Seasonal temperature and salinity fields in the mediterranean sea: climatological analyses of a historical data set,. *Deep Sea Research*, 43., 1996. 43.
- [10] De Mey P. et Benkiran M. A multivariate reduced-order optimal interpolation method and its application to the Mediterranean basin scale circulation. Ocean Forecasting: conceptual basis and application. In press, 2002.
- [11] Smith et Sandwell. Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth sounding. *Science*, 1997.
- [12] Reynaud T., Legrand P., Mercier H., et Barnier B. . (1998) a new analysis of hydrographic data in the atlantic and its application to an inverse modelling study. *International WOCE Newsletters*, 1998. 32.

Y DRILLET, R BOURDALLÉ-BADIE, L SIEFRIDT

YANN DRILLET

CERFACS
42 Av CORIOLIS
31057 TOULOUSE CEDEX
FRANCE
drillet@cerfacs.fr

ROMAIN BOURDALLÉ-BADIE

CERFACS
42 Av CORIOLIS
31057 TOULOUSE CEDEX
FRANCE
bourdall@cerfacs.fr

LAURE SIEFRIDT

CERFACS
42 Av CORIOLIS
31057 TOULOUSE CEDEX
FRANCE
siefridt@cerfacs.fr