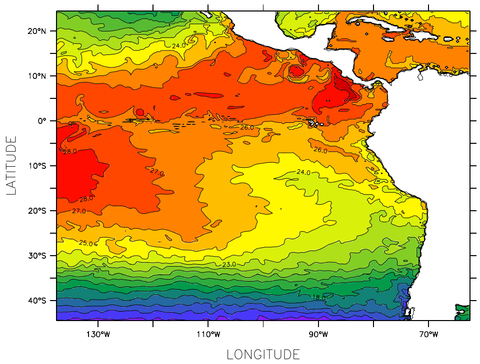
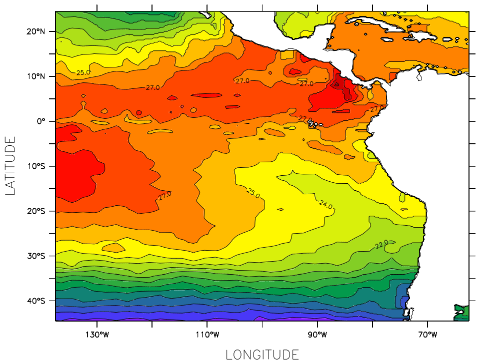
Rapport technique CERFACS n° TR/CMGC/06/41

Initialisation du modèle ORCA à l'aide d'analyses MERCATOR : application des outils de l'assimilation variationnelle.

MERSEA-1/4°



H(ORCA-2°)



par

Abdelaziz BABQIQI

Stage de recherche réalisé au : CERFACS/GLOBC, du 6 février au 15 juin 2006,
sous la direction de : **M. Philippe ROGEL et M. Nicolas FERRY**

Promotion d'élèves Ingénieurs Météorologistes de l'ENM 2003/2006 et
MASTER "Océan, Atmosphère et Surfaces Continentales" (UPS)

2006

Remerciements

Je tiens à remercier mes encadrants Philippe Rogel de l'équipe CERFACS/GLOBC et Nicolas Ferry de MERCATOR, pour avoir proposé se sujet stimulant et m'avoir laissé libre dans la manière de le traiter, me faisant confiance, tout en me soutenant. Ils ont su me faire partager leurs connaissances et leur goût pour la discipline.

Un grand merci à Anthony Weaver (CERFACS/GLOBC) et Gérald Desroziers (CNRM/GMAP) pour leurs conseils avisés et leur soutien.

Je remercie également Nicolas Daget (CERFACS/GLOBC), Serge Gratton (CERFACS/ALGO), Eric Maisonnave (CERFACS/GLOBC), Fabian Bastin (CERFACS/ALGO), Cyril Caminade (CERFACS/GLOBC), tous les membres de l'équipe informatique et tous ceux qui ont participé de près ou de loin au bon déroulement de mon stage.

Merci à Olivier Thual pour m'avoir accueilli au sein de son équipe "Climate Modelling and Global Change" du CERFACS.

Résumé Court

L'océan se révèle le siège de la composante climatique lente et joue un rôle important pour la prévision saisonnière. Une bonne connaissance de l'état initial de ses caractéristiques dans les modèles couplés de prévision est essentiel lorsque l'on veut prévoir un phénomène tel que l'ENSO (El Nino/Southern Oscillation) . Dans le cadre du projet MERSEA, MERCATOR utilise le modèle numérique ORCA0.25 pour produire des analyses de l'état de l'océan à haute résolution MERSEA-1/4°. L'objectif de ce stage est d'utiliser les analyses MERSEA1/4° et les outils d'assimilation variationnelle, dans le but de produire un état initial de l'océan à basse résolution pour le modèle de circulation générale océanique ORCA2 utilisé au sein du Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique (CERFACS). Durant ce travail, nous nous sommes intéressés uniquement au paramètre température de l'océan sur le domaine global.

Une première partie du travail a été d'intégrer les données MERSEA1/4° dans le système OPAVAR(Logiciel d'assimilation développé au CERFACS) et mettre en place un opérateur d'observation capable de réaliser le passage de l'espace de basse résolution vers l'espace de haute résolution. Pour valider cette étape, un exercice de comparaison entre les analyses MERSEA1/4° et les analyses ORCA2 transportées dans l'espace de haute résolution a été réalisé. Ceci permet l'étude de l'erreur de représentativité de ORCA2 par rapport à MERSEA1/4° sur une période de 10 ans entre le 01/02/1992 et le 01/02/2001. Les résultats montrent que le modèle est généralement en accord avec MERSEA1/4° sauf dans les zones de forte composante mésoéchelle (courants de bords Ouest) et dans la zone équatoriale où on note un léger décalage dans le positionnement de la thermocline entre les deux modèles.

Dans une deuxième partie, nous avons procédé à l'assimilation 3D-VAR des données MERSEA1/4° en modélisant les matrices R et B à l'aide d'un concept purement géométrique basé sur les facteurs d'échelles. Dans ce système, on dispose de plus de données à assimiler que de variables à contrôler. De ce fait, le terme d'ébauche a été supprimé de la fonction coût et par suite l'ébauche intervient uniquement pour le démarrage de l'algorithme de minimisation. Vu la taille importante du problème $(1442 \times 1021 \times 46)$, nous avons effectué des expériences sur des domaines limités. Les résultats ont permis de mettre en évidence la capacité de cette approche à extraire de l'information de la haute résolution tout en supprimant la signature des petites échelles. De plus, nous avons testé la sensibilité du système à l'ébauche, à l'échantillonnage, à la convergence, aux poids affectés aux données MERSEA1/4° et à la limitation du domaine. Ces tests montrent que la sensibilité à l'ébauche et à la limitation du domaine est très faible, la convergence est pratiquement atteinte à 40 itérations, la sensibilité à l'échantillonnage devient significative dès que le pas utilisé dépasse la résolution du modèle ORCA2 et la diminution des poids des données MERSEA1/4° permet de rendre le filtrage des petites échelles beaucoup plus efficace.

Dans la dernière partie, nous avons utilisé l'opérateur d'observation adjoint pour effectuer une interpolation de la haute résolution sur la grille du modèle basse résolution. Ceci permet de construire un système d'assimilation 3D-VAR indépendant de l'ébauche en démarrant la minimisation à partir d'une simple interpolation de MERSEA1/4°.

Résumé Long

La prévision saisonnière repose en grande partie sur la connaissance de l'état initial des composantes du système climatique à évolution lente. Principalement l'océan, spécifiquement via sa température de surface et de subsurface, avec lequel l'atmosphère échange masse et énergie, et qui évolue à une échelle de temps significativement moins rapide. C'est pourquoi il est important, dans les études de prévision à long terme (six mois), de bien prendre en compte l'état de l'océan. Dans cette perspective, MERCATOR a utilisé le modèle ORCA0.25 dans le cadre du projet européen MERSEA, pour produire des analyses globales de l'état de l'océan à haute résolution appelées MERSEA1/4°. Ces analyses disponibles à haute résolution peuvent constituer une bonne manière de démarrer les modèles couplés océan-atmosphère de prévision saisonnière. Il s'agit d'être capable d'initialiser un modèle de basse résolution, à partir d'une estimation de l'océan à haute résolution.

L'objectif de ce travail est d'utiliser les données de hautes résolution MERSEA1/4° et la méthode d'assimilation variationnelle 3D-VAR, dans le but de produire une estimation de l'état de l'océan à basse résolution, pour le modèle de circulation générale océanique ORCA2 utilisé au sein du Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique (CERFACS). Durant ce stage, nous nous sommes intéressés uniquement au paramètre température de l'océan sur le domaine global.

Une première partie du travail a été de construire une interface d'intégration des données de haute résolution MERSEA-1/4° dans le système d'assimilation OPAVAR (Logiciel d'assimilation développé au CERFACS), puis de mettre en place un opérateur d'observation de type polynomial capable d'effectuer le passage de l'espace de haute résolution MERSEA1/4° vers l'espace de basse résolution ORCA2. Pour valider cette étape, nous avons fait une étude de comparaison entre des analyses MERSEA1/4° et des analyses ORCA2 transportées dans l'espace de haute résolution (grille MERSEA1/4°). Ceci a permis d'étudier l'erreur de représentativité de ORCA2 par rapport à MERSEA1/4° pour le mois de février sur une période de 10 ans entre le 01/02/1992 et le 01/02/2001. En termes de variabilité, les résultats ont montré que l'amplitude de la variabilité interannuelle est plus forte dans MERSEA1/4° que dans ORCA2, particulièrement dans les zones des courants de bords Ouest, des gyres subtropicaux et d'upwelling.
En terme d'erreur de représentativité et d'écart moyen, les résultats mettent en évidence que le modèle ORCA2 est généralement en accord avec MERSEA1/4° sauf dans les zones de forte composante mésoéchelle (Gulf Stream, Kuroshio, ...) où on note un biais significatif entre les deux modèles (ORCA2 et ORCA0.25), apparaît sous la forme d'une alternance des méandres chauds et froids dûs à la présence de nombreux tourbillons dans MERSEA1/4°, chose qui n'existe pas dans ORCA2 (faible activité barocline). D'autre part dans la zone équatoriale, nous avons constaté un léger décalage dans le positionnement vertical de la thermocline entre les deux modèles.

Dans une deuxième partie, nous avons utilisé la technique d'assimilation variationnelle 3D-VAR et les données MERSEA1/4° pour construire un état initial en température du modèle de basse résolution ORCA2. la méthode consiste à modéliser les matrices des variances-covariances d'erreurs d'observations R et d'ébauche B à l'aide d'un concept purement géométrique basé sur les facteurs d'échelles . Dans ce système, on dispose de plus de données à assimiler que de variables à contrôler (Données MERSEA1/4° de haute résolution). De ce fait, le terme d'ébauche a été supprimé de la fonction coût et par suite l'ébauche intervient uniquement pour le démarrage de l'algorithme de minimisation. Vu la taille importante du problème $(1442 \times 1021 \times 46)$, nous avons effectué des expériences sur des domaines limités. Ainsi, des expériences d'assimilation des données MERSEA1/4° sur le domaine Pacifique Est et le Gulf Stream ont été menées. L'étude des résultats d'assimilation dans différentes couches du Pacifique Est a mis en évidence la capacité de cette approche à extraire de l'information de la haute résolu-

tion MERSEA1/4°. De plus, les résultats d'assimilation dans la zone de forte composante mésoéchelle du Gulf Stream a confirmé l'efficacité de la méthode utilisée pour supprimer la signature des petites échelles qui ne nous intéressent pas à basse résolution.

D'autre part, nous avons procédé à des tests de sensibilité du système d'assimilation à cinq effets : sensibilité à l'ébauche, à l'échantillonnage, à la convergence, aux poids des données MERSEA et à la limitation du domaine.
L'étude de la sensibilité du système d'assimilation à la convergence a permis de fixer 40 itérations comme nombre optimal pour extraire un maximum d'information des données MERSEA1/4°. L'analyse des résultats des expériences de sensibilité à l'ébauche et à la limitation du domaine a montré que le système d'assimilation est très robuste et relativement peu sensible à ces paramètres.
L'échantillonnage des données MERSEA1/4° a montré une corrélation significative entre deux points MERSEA1/4° contigus. D'autre part, l'expérience sur la sensibilité de l'analyse aux poids affectés aux données MERSEA1/4° a permis de mettre en évidence que tenir en compte l'erreur de représentativité améliore l'analyse.

Dans la dernière partie, nous avons utilisé l'opérateur d'observation adjoint pour effectuer une interpolation de la haute résolution sur la grille du modèle basse résolution. Ceci permet de construire un système d'assimilation 3D-VAR indépendant de l'ébauche en démarrant la minimisation à partir d'une interpolation de MERSEA1/4°. Pour résoudre le problème introduit par l'opérateur d'observation adjoint sur les côtes (pixels aberrants), nous avons procédé à une extrapolation qui nous a permis de le contraindre en remplaçant chaque pixel aberrant par le bon pixel le plus proche.

Table des matières

Introduction

L'état thermodynamique de l'océan en surface et en subsurface joue un rôle crucial dans la variabilité du climat et de sa mémoire. Il affecte le lent processus d'interaction océan-atmosphère en contrôlant les échanges de chaleur, d'eau et de quantité de mouvement à l'interface air-mer. En fait, ces échanges agissent sur l'atmosphère et l'océan, dans une boucle d'action et de rétroaction qui détermine en grande partie l'état d'équilibre du système couplé océan-atmosphère. C'est pourquoi il est important, dans les études de prévision saisonnière, de bien prendre en compte l'état de l'océan. La prévision de certains phénomènes importants comme l'ENSO (El Nino/Southern Oscillation) dans le Pacifique équatorial, fait utilement appel à l'assimilation de données. En effet, les outils d'assimilation de données permettent de construire un état de l'océan réaliste, qui peut être considéré comme une meilleure condition initiale au démarrage des modèles couplés de prévision à long terme. Dans cette perspective, le groupe de Modélisation du climat et de son changement global du CERFACS participe depuis des années à plusieurs projets de recherche dans le domaine de l'assimilation de données pour l'océanographie.

Dans ce contexte de la prévision saisonnière, MERCATOR a utilisé le modèle ORCA0.25 dans le cadre du projet européen MERSEA pour produire des analyses de l'état de l'océan à haute résolution appelées MERSEA-1/4° ([16], 2006), ces analyses ont été réalisées sur une période de 10 ans depuis 1992 et pour l'ensemble des paramètres caractérisant l'océan(température, salinité, courant). Il s'avère que la qualité de MERSEA-1/4° notament la haute résolution peut être d'un apport significatif si cette information est correctement prise au démarrage des modèles couplés de prévision climatique. Dans cette perspective, le CNRM, en collaboration avec MERCATOR a utilisé les données MERSEA-1/4° pour estimer l'état initial du modèle de circulation générale océanique ORCA2 de basse résolution utilisé également au sein du CERFACS. La méthode utilisée est basée sur une simple interpolation ([17], 2006), ce qui reste trés limitant dans le filtrage de la signature des petites échelles qui ne devrait pas être présente dans l'état de l'océan à basse résolution. Mais à part cette étude, les problèmes d'initialisation des modèles de circulation générale océanique à partir des états d'autres modèles numériques de haute résolution a été jusqu'à ici peu abordée.

L'objectif de ce travail est d'utiliser la technique d'assimilation variationnelle 3D-VAR et les données MERSEA-1/4° pour produire un bon état initial du modèle ORCA2. En fait, la technique d'assimilation 3D-VAR permet de déterminer par minimisation un état océanique dont la distance à un jeu d'observations est minimale, sous la contrainte que cet état ne s'éloigne pas trop d'une estimation précédente appelée "ébauche". Dans notre étude nous considérons comme "observations" les données MERSEA1/4°, ce qui nous ramène à un problème d'assimilation de données dans un cas où il y a plus d'observations que de variables à contrôler.

Dans ce rapport, nous présenterons notre travail sous la forme de sept chapitres. Dans le premier chapitre, on décrira de façon générale le modèle OPA8.2 et ces configurations basse résolution ORCA2 et haute résolution ORCA0.25, puis on détaillera la méthode d'assimilation 3D-VAR dans ses formulations générales, incrémentales et sa version 3D-VAR/FGAT. Et en fin, on discutera la méthode de construction de deux séries de données, une à haute résolution (analyse MERSEA-1/4°) et une autre à basse résolution (analyse ORCA2).

Dans le deuxième chapitre, on présentera la technique de l'opérateur d'observation utilisé, puis on procédera à sa validation et la validation de l'intégration des données MERSEA-1/4° dans le modèle ORCA2. Au cours du troisième chapitre, on utilisera les deux séries de données MERSEA1/4° et ORCA2 du premier février pour la période allant du 01/02/1992 au 01/02/2001, pour comparer la variabilité entre la basse et la haute résolution, et étudier l'erreur de représentativité du modèle ORCA2 par rapport aux données MERSEA1/4°.

Dans le quatrième chapitre, On discutera la technique d'assimilation 3D-VAR des données MERSEA-1/4° dans le modèle ORCA2, puis on examinera la correction apportée à l'ébauche par cette technique d'assimilation dans le Pacifique Est et le Gulf Stream tout en investiguant sa capacité à filtrer les petites échelles. Le cinquième chapitre sera consacré à des études de sensibilité : au nombre des itérations, à l'échantillonnage, à l'ébauche, aux poids affectés aux données MERSEA1/4° et à la limitation du domaine.

Dans le sixième chapitre, on procédera par une interpolation des données MERSEA1/4° à la construction d'un état de basse résolution qui peut remplacer l'ébauche au démarrage de l'algorithme de minimisation. Le dernier chapitre conclura ce rapport en rappelant les principaux résultats et les perspectives à venir pour la poursuite de ce travail.

Chapitre 1

Théorie et état des lieux

1.1 Présentation du modèle OPA

OPA[1] est un modèle aux équations primitives de circulation océanique régionale et globale développé par le LODYC (Laboratoire d'Océanographie DYnamique et de Climatologie) en vue d'étudier la circulation de l'océan à grande échelle ainsi que ses interactions avec d'autres composantes du système climatique terrestre (atmosphère, glace de mer, traceurs biogéochimiques, ...). En perpétuel développement, ce code a notamment été choisi comme modèle de base pour des projets tels que MERCATOR.
Ses caractéristiques principales sont décrites dans le manuel de référence ([1],1998).

1.1.1 Formalisme tensoriel

L'utilisation d'un système en coordonnées géographiques ordinaires sur la grille donne lieu à un point singulier dans le Pôle Nord, ce qui pose beaucoup de problèmes au niveau de traitement des équations primitives dans le modèle global. Une solution consiste à introduire un système en coordonnées curvilignes, cette transformation permet de remplacer le point singulier par deux points situés sur les continents un au Nord de l'Amérique et l'autre au Nord de l'Asie, ceci rend le traitement des équations primitives plus efficace. Cette transformation permet aussi de raffiner le maillage dans les régions où la dynamique est plus intense (courant équatoriaux, couches de surface, courants de bords ouest, ...), et éventuellement permettre à la grille de suivre une frontière irrégulière.
Le modèle OPA est ainsi formulé en terme de coordonnées curvilignes sur l'horizontale et de coordonnées en z sur la verticale. En notant (***i,j,k***) les coordonnées curvilignes et (λ, φ,z) les coordonnées géographiques ordinaire, la déformation locale est obtenue par les trois facteurs d'échelles :

$$e_1 = (a+z)[(\frac{\partial \lambda}{\partial i}\cos\varphi)^2 + (\frac{\partial \varphi}{\partial i})^2]^{1/2} \tag{1.1}$$

$$e_2 = (a+z)[(\frac{\partial \lambda}{\partial j}\cos\varphi)^2 + (\frac{\partial \varphi}{\partial j})^2]^{1/2} \tag{1.2}$$

$$e_3 = (\frac{\partial z}{\partial k}) \tag{1.3}$$

Et, comme le rayon de la terre a est très grand par rapport à l'altitude z, on peut remplacer ***(a+z)*** par a et par suite e_1 et e_2 deviennent indépendants de k.

1.1.2 Hypothèses et équations

- ***Hypothèse de couche mince*** : la profondeur de l'océan est faible devant le rayon de la terre.
- ***Approximation sphérique*** : les surfaces géopotentielles sont supposées sphériques de façon à ce que la gravité soit parallèle au rayon de la terre.
- ***Hypothèse d'incompressibilité*** : se traduit par une divergence nulle du courant, l'équation de continuité s'écrit alors sous la forme :

$$\nabla.\vec{u} = 0 \tag{1.4}$$

[1] Océan PArallélisé.

– ***Approximation hydrostatique*** : cette approximation traduit la tendance très forte à un équilibrage entre la force de pression verticale et le poids. Ceci se résume par l'équation suivante :

$$\frac{\partial p}{\partial k} = -\rho g e_3 \tag{1.5}$$

Avec ***p*** est la pression,***k*** la coordonnée verticale, ρ la densité et ***g*** l'accélération de la pesanteur.

– ***Approximation de Boussinesq*** : On considère, étant donné la faible variation de la densité autour d'une valeur de référence, que l'équation de mouvement horizontale s'écrit :

$$\frac{\partial \vec{u}_h}{\partial t} = -[(\nabla \times \vec{u}) \times \vec{u} + \frac{1}{2}\nabla(\vec{u}^2)]_h - f.\vec{k} \times \vec{u}_h - \frac{1}{\rho_0}\nabla_h P + D^{\vec{u}} \tag{1.6}$$

Avec $\vec{u}$ est le courant, $\vec{u}_h$ sa projection horizontale, f le paramètre de Coriolis, t le temps, et $D^{\vec{u}}$ la dynamique sous maille.

– ***hypothèse de fermeture turbulente*** : les effets sous maille sont paramétrés par un terme prenant en compte les processus d'échelle inférieure à celle de la discrétisation des variables. Ceci se fait à l'aide d'un schéma de diffusion et de dissipation. En notant D^T et D^S les processus sous maille liés respectivement à la température et la salinité, les équations d'évolution de ces traceurs s'écrivent :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{1}{e_1 e_2}[\frac{\partial(e_2 T u)}{\partial i} + \frac{\partial(e_1 T v)}{\partial j}] - \frac{1}{e_3}\frac{\partial(Tw)}{\partial k} + D^T \tag{1.7}$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -\frac{1}{e_1 e_2}[\frac{\partial(e_2 S u)}{\partial i} + \frac{\partial(e_1 S v)}{\partial j}] - \frac{1}{e_3}\frac{\partial(Sw)}{\partial k} + D^S \tag{1.8}$$

1.1.3 Discrétisation spatiale et temporelle

– ***La discrétisation spatiale*** est effectuée selon un schéma classique de différences finies, centré d'ordre 2.
Les variables sont placées sur une grille décalée dite grille-C d'Arakawa([2],1972) ; une cellule contient les champs scalaires au centre, les champs vectoriels au centre de ses faces, la vorticité et le paramètre de Coriolis f au centre de ses arêtes verticales, et au-dessus de celles-ci, la fonction de courant barotrope (figure 1.1).

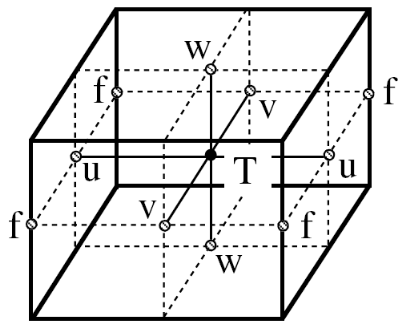


FIG. 1.1 – Position des variables sur la grille OPA8.2 : T indique les variables scalaires (pression, température, salinité, densité, et la divergence horizontale). (u,v,w) indique les trois composantes du vent, et f indique le tourbillon planétaire.

– ***Le schéma de discrétisation temporelle :*** est un schéma ***Leap-Frog*** stabilisé par un filtre de Asselin qui calcule la variable filtrée Z_f de Z.

$$Z_f(t_i) = Z(t_i) + \gamma[Z_f(t_{i-1}) - 2Z(t_i) + Z(t_{i+1})] \tag{1.9}$$

Où γ est la constante d'Asselin souvent prise égale à 0.5.
Au premier pas de temps, le modèle démarre par un schéma de type d'Euler.

1.1.4 Forçage externe

– ***Forçage par le vent atmosphérique*** : il se traduit par l'échange de l'énergie cinétique à l'interface entre océan atmosphère, ce processus est très important pour expliquer un certain nombre de phénomènes, comme par exemple l'atténuation des cyclones tropicaux : l'action du vent (dépression)

provoque un pompage d'Ekman en créant une ascendance dans la **CMO**[2]. Cette ascendance va donc entraîner des eaux profondes vers la surface. Ces eaux sont plus froides que l'eau de la CMO en surface. Et donc la température de surface de la mer se refroidit, ce qui affaiblit le cyclone, car celui-ci puise la majeure partie de son énergie des eaux chaudes en surface.
Ce couplage se résume par l'équation :

$$[\frac{A^{vm}}{e_3}\frac{\partial \vec{u}^h}{\partial k}]_{z=0} = \frac{\vec{\tau}}{\rho_0} \tag{1.10}$$

Où $\vec{\tau}$ est la tension du vent, A^{vm} la viscosité verticale, ρ_0 la densité de référence et e_3 est le facteur d'échelle sur la verticale.

– ***Forçage par le flux de chaleur*** : il représente un échange d'énergie avec l'atmosphère , ce flux est pris en compte à travers le terme représentant les phénomènes sous maille dans l'équation (1.7).

$$[\frac{A^{vT}}{e_3}\frac{\partial T}{\partial k}]_{z=0} = \frac{Q}{\rho_0 C_p} \tag{1.11}$$

Où C_p est la capacité calorifique, Q le flux de chaleur total et A^{vT} le coefficient de diffusion verticale. A fin de prendre en compte la rétroaction de l'océan sur le flux de chaleur Q, ce dernier est modélisé en rajoutant un terme de correction au flux net de chaleur Q_0 :

$$Q = Q_0 + \frac{\partial Q}{\partial T}(T - SST) \tag{1.12}$$

Où la SST est une température de surface de la mer de référence et $\frac{\partial Q}{\partial T}$ est le coefficient de rétro-action négative souvent mis à $-40W/m^2/K$, ce coefficient représente une estimation de la sensibilité du flux de chaleur aux variation de température de surface . L'équation (1.12) assure que si la température T est parfaitement égale à la SST alors le flux de chaleur Q est égal au flux net de chaleur Q_0 qu'est le bilan de flux solaire, infrarouge, de chaleur sensible et de chaleur latente.

– ***Forçage par échange d'eau douce*** : il se traduit dans le modèle par une modification de la salinité S de surface, tout en gardant le volume d'eau total constant durant l'évolution du modèle. Le terme source et puits s'écrit :

$$[\frac{A^{vT}}{e_3}\frac{\partial S}{\partial k}]_{z=0} = EMP_0 + \gamma^{-1}\frac{(S-SSS)}{S} \tag{1.13}$$

SSS est la salinité de surface de la mer,γ est un coefficient de rétro-action négative, ressemblant à celui utilisé dans le cas du forçage par le flux de chaleur (1.12). Le flux net d'eau douce EMP_0 est modélisé à partir du bilan : Evaporation plus le taux de variation de la glace de mer moins les précipitations et le ruissellement.

1.1.5 Les versions ORCA 2 et ORCA 0.25

Les modèles $ORCA0.25$ et $ORCA2$ sont deux configurations du modèle OPA 8.2 (tableau 1.1). $ORCA2$ est un modèle de circulation générale à basse résolution destiné à décrire la grande échelle océanique. ORCA 0.25 est un modèle à haute résolution destiné à décrire la mésoéchelle océanique, c'est cette

Configuration	**ORCA 2**	**ORCA 0.25**
Domaine	$global$	$global$
Grille	$182 \times 149 \times 31\, points$	$1442 \times 1021 \times 46\, points$
Type de Maille	$curviligne$	$curviligne$
Résolution horizontale	$2°\ en\ longitude\ et$ $2°.cos(\varphi)\ en\ latitude$	$0.25°\ en\ longitude\ et$ $0.25°.cos(\varphi) en\ latitude$
Résolution verticale	$31\ niveau\ Avec\ 10\ niveaux$ $dans\ les\ premiers\ 100m$	$46\ niveau\ Avec\ 10\ niveaux$ $dans\ les\ premiers\ 100m$
Pas de temps	$1h36min\ soit\ 15\ pas\ de\ temps$ $par\ jours$	$24min$

TAB. 1.1 – Caractéristiques des deux configurations ORCA 2 et ORCA 0.25 du modèle OPA 8.2

[2]Couche de Mélange Océanique

version qui a servi à produire les analyses MERSEA[3] -1/4° dites analyses MERCATOR. La façon de produire ces analyses est expliquée dans le paragraphe suivant.
Afin de mieux représenter la dynamique équatoriale, la résolution horizontale suivant la latitude du modèle ORCA2 compte un rafinement entre 5°N et 5°S (soit une résolution $\sim 0.5°$).

1.2 Analyses MERSEA-1/4° et ORCA-2°

1. **Analyses MERSEA-1/4°**
   Les états océaniques issus de modèles numériques servent notament à initialiser des modèles couplés océan-atmosphère de prévision saisonnière. Ainsi, le modèle ORCA2 est utilisé dans ce contexte par de nombreuses équipes. Il est apparu que la basse résolution de ce modèle pourrait être un aspect limitant à la prévision saisonnière. C'est pourquoi, des conditions initiales océaniques issues d'un modéle à plus haute résolution (1/4°) pourrait contribuer à améliorer cet aspect. C'est cette hypothèse qui est testée dans le cadre du projet européen MERSEA. Il s'agit de produire les analyses ***MERSEA 1/4***° disponibles sur 10 ans (1992-2001) pour servir comme conditions initiales à la prévision saisonnière. La technique de construction de ces analyses se résume dans les étapes suivantes :
   - Intégration du modèle ORCA 0.25 dans sa configuration globale sur la période 1992-2001.
   - Foçage du modèle par les flux journaliers ERA40 (**ECMWF**[4] ReAnalysis) sur la périodes 1992-1995 (tension du vent, flux net de chaleur, évaporation, précipitation et ruissellement). Puis utilisation de l'état final 1995 comme un état initial pour la simulation sur 10 ans (1992-2001).
   - Les champs modèle de température et de salinité sont faiblement rappelés (constante de temps de rappel à trois ans) vers la climatologie mensuelle(Levitus climatology).
   - La SST étant un paramètre clé du couplage atmosphère-océan, les analyses MERSEA-1/4° doivent avoir le biais le plus faible possible avec la SST observée (Reynolds). Pour ce faire, une technique "simple" de nudging par le biais d'un fort rappel (constante de rappel = $(-200W.m^{-2}.K^{-1})$) vers la SST de Reynolds a été utilisée. Mais afin de préserver la mésoéchelle du modèle de haute résolution, seule la composante grande échelle de la SST du modèle (notée $\tilde{T}$) est rappelée vers la SST de Reynolds. $\tilde{T}$ est obtenu par applications successives d'un filre de Shapiro.
     $$Q_n = Q_{ERA40} - 200.(\tilde{T} - T_{rey}) \tag{1.14}$$
     Avec Q_n est le flux de chaleur reçu par la première couche de l'océan, Q_{ERA40} le flux de chaleur journalier ERA40 et T_{rey} la SST de Reynolds.
     Le filtre 2D de Shapiro consiste à supprimer les petites échelles de la SST, sa formulation en 2D (i, j) s'écrit :
     $$\tilde{T}_{i,j} = T_{i,j} + \frac{\alpha}{4}.(T_{i+1,j} + T_{i-1,j} + T_{i,j+1} + T_{i,j-1} - 4.T_{i,j}) \tag{1.15}$$
     Où $T_{i,j}$ est la SST au point de grille (i, j), $\tilde{T}_{i,j}$ la SST filtrée, et α le coefficient quantifiant l'efficacité de filtrage des petites longueur d'onde, égal à 0,5. Ce filtre de Shapiro est appliqué 90 fois sur le champs de SST modèle ce qui consiste à filter les petites échelles(<$\sim$ 200 Km).
   - Filtrage des précipitations avec un rappel vers les précipitations mensuelles **GPCP**[5] :
     $$P_n = P_{ERA40} - \alpha.(\tilde{P}_{ERA40} - P_{GPCP}) \tag{1.16}$$
     Avec P_n est le flux net des précipitations reçu par l'océan, P_{ERA40} les précipitations journalières ERA40, P_{GPCP} les précipitations mensuelles GPCP observées,α un coefficient proche de 1, et $\tilde{P}_{ERA40}$ les précipitations ERA40 filtrées par le filtre de Shapiro comme dans le cas de la SST (1.15).

2. **Analyses ORCA2°**
   Ces données ont été obtenues par MERCATOR dans le cadre d'une expérience consistant à produire un jeu de données à basse résolution en utilisant les même conditions de forçage que celle de MERSEA-1/4° (paragraphe 1.2 (1)) et un rappel similaire vers la SST de Reynolds $(-200W/m^2/K)$. Durant cette expérience les bassins semi-fermés n'ont pas été prise en compte.

[3]Marine EnviRonnement and Security for the European Area
[4]European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
[5]Global Precipitation Climatology Project

1.3 Assimilation Variationnelle 3D-VAR

1.3.1 Généralités

Selon la définition de Courtier ([4],1997), l'assimilation de données est l'ensemble des processus qui permettent de combiner toutes les informations disponibles afin d'avoir la représentation la plus juste, de l'état de l'écoulement atmosphérique ou océanique.
C'est un élément essentiel d'un système de prévision numérique. En effet, l'analyse doit fournir un état initial précis, cohérent physiquement, utilisé pour le calcul de l'évolution ultérieure de l'atmosphère et de l'océan par les modèles de prévision numérique.
Pour cela un schéma d'assimilation dispose de deux types d'informations :
- Les observations qui sont notées sous la forme d'un vecteur $\boldsymbol{y}^o$ de dimension p .
- Une première estimation de l'état de l'écoulement donnée par le modèle, appelée ébauche et notée $\boldsymbol{x}^b$; c'est un vecteur de variables de contrôle représentant l'écoulement dans le modèle, de dimension n.

Soit $\boldsymbol{x}^t$ l'état réel à un instant donné du système à étudier.
Si on dispose d'une observation $\boldsymbol{y}^o$ de $\boldsymbol{x}^t$ donnée par le sytème de mesure, on peut alors écrire :

$$\boldsymbol{y}^o = \boldsymbol{H} \cdot \boldsymbol{x}^t + \epsilon^o \tag{1.17}$$

Où $\boldsymbol{H}$ est l'opérateur d'observation qui permet d'établir une relation entre les variables de contrôle à estimer et les variables mesurées, c'est à dire le passage de l'espace du modèle vers l'espace des observations.
Et si on possède une ébauche $\boldsymbol{x}^b$ de même dimension que le vecteur $\boldsymbol{x}$ que l'on veut estimer alors :

$$\boldsymbol{x}^b = \boldsymbol{x}^t + \epsilon^b \tag{1.18}$$

On note la matrice des variances-covariances des erreurs d'observation :

$$\mathbf{R} = E(\epsilon^o \epsilon^{oT}) \tag{1.19}$$

et la matrice des variances-covariances des erreurs d'ébauche :

$$\mathbf{B} = E(\epsilon^b \epsilon^{bT}) \tag{1.20}$$

En assimilation de données, on cherche à estimer $\boldsymbol{x}^a$ qui est l'état analysé et qui correspond à la combinaison optimale des informations contenues dans $\boldsymbol{x}^b$ et $\boldsymbol{y}^o$. Il existe différentes approches pour calculer l'état optimal $\boldsymbol{x}^a$. Entre autre, il y'a l'approche de minimisation de la variance d'erreur d'estimation, l'approche des Moindres Carrés Pondérés ou, naturellement, l'approche du Maximum de Vraissemblance.
L'approche des Moindres Carrés Pondérés permet de définir l'expression quadratique suivante :

$$\boldsymbol{J}(\boldsymbol{x}) = \underbrace{\frac{1}{2}(\boldsymbol{x}^b - \boldsymbol{x})^T \mathbf{B}^{-1} (\boldsymbol{x}^b - \boldsymbol{x})}_{\boldsymbol{J}^b(\boldsymbol{x})} + \underbrace{\frac{1}{2}(\boldsymbol{y}^o - \boldsymbol{H}\boldsymbol{x})^T \mathbf{R}^{-1} (\boldsymbol{y}^o - \boldsymbol{H}\boldsymbol{x})}_{\boldsymbol{J}^o(\boldsymbol{x})} \tag{1.21}$$

Cette fonction mesure les distances respectives de l'estimateur ($\boldsymbol{x} = \boldsymbol{x}^a$) à l'ébauche ($\boldsymbol{J}^b(\boldsymbol{x})$) et aux observations ($\boldsymbol{J}^o(\boldsymbol{x})$). Le meilleur estimateur ($\boldsymbol{x}^a$) non biaisé [$E(\boldsymbol{x}^a - \boldsymbol{x}^t) = 0$] au sens des Moindres Carrés de l'état vrai ($\boldsymbol{x}^t$) est celui qui minimise la fonction coût (1.21). Cet estimateur est appelé aussi le **BLUE**[6].
Dans le cas où $\boldsymbol{H}$ est linéaire et en faisant l'hypothèse que les erreurs d'observations et de l'ébauche sont indépendantes, on obtient l'équation matricielle :

$$\nabla \boldsymbol{J}(\boldsymbol{x}) = B^{-1}(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}^b) - \boldsymbol{H}^T \boldsymbol{R}^{-1}(\boldsymbol{y}^o - \boldsymbol{H}\boldsymbol{x}) = 0 \tag{1.22}$$

Ce problème admet une solution analytique donnée par la formule suivante :

$$\boldsymbol{x}^a = \boldsymbol{x}^b + \mathbf{K}(\boldsymbol{y}^o - \boldsymbol{H}\boldsymbol{x}^b) \tag{1.23}$$

[6]Best Linear Unbiased Estimate.

où $\mathbf{K} = (\mathbf{B}^{-1} + \boldsymbol{H}^T\mathbf{R}^{-1}\boldsymbol{H})^{-1}\boldsymbol{H}^T\mathbf{R}$ est la matrice de gain.
On définit aussi la matrice de variance-covariance des erreurs d'analyse par :

$$\mathbf{A} = (\mathbf{B}^{-1} + \boldsymbol{H}^T\mathbf{R}^{-1}\boldsymbol{H})^{-1} = (I_n - \mathbf{K}\boldsymbol{H})\mathbf{B}. \tag{1.24}$$

Dans la pratique le minimum de $\boldsymbol{J}$ est cherché en utilisant des méthodes itératives. l'algorithme de Quasi-Newton est l'une des méthodes les plus utilisées dans les modèles numériques, le principe de cet algorithme est le suivant :

$$\boldsymbol{x}^{(j+1)} = \boldsymbol{x}^{(j)} - \lambda\nabla\boldsymbol{J}(\boldsymbol{x}^{(j)}) \qquad \text{Avec} \qquad \boldsymbol{J}(\boldsymbol{x}^{(j+1)}) < \boldsymbol{J}(\boldsymbol{x}^{(j)}) \tag{1.25}$$

En donnant un état de départ à cet algorithme, souvent l'ébauche, et en répétant le processus, on réussit à converger graduellement vers le point où $\boldsymbol{J}$ atteint sa valeur minimale et où le gradient s'annule à une précision suffisante.

1.3.2 Formulation incrémentale

Une approche dite incrémentale est souvent utilisée dans les modèles, dont le but de faciliter la minimisation de la fonction $\boldsymbol{J}$. Le principe de cette méthode consiste à définir l'écart ou l'incrément entre l'analyse $\boldsymbol{x}^a$ et l'ébauche $\boldsymbol{x}^b$ ([5],2003) :

$$\boldsymbol{x}^a - \boldsymbol{x}^b = \delta\boldsymbol{x} \tag{1.26}$$

Donc en introduisant cette nouvelle variable, la fonction coût $\boldsymbol{J}$ définie dans l'équation (1.18) devient :

$$\boldsymbol{J}(\delta\boldsymbol{x}) = \frac{1}{2}(\delta\boldsymbol{x})^T\mathbf{B}^{-1}(\delta\boldsymbol{x}) + \frac{1}{2}(\boldsymbol{H}\delta\boldsymbol{x} - \boldsymbol{d})^T\mathbf{R}^{-1}(\boldsymbol{H}\delta\boldsymbol{x} - \boldsymbol{d}) \tag{1.27}$$

Avec $\boldsymbol{d} = \boldsymbol{y}^o - \boldsymbol{H}\boldsymbol{x}^b$ est le vecteur d'innovation, qui représente l'écart entre l'observation et la valeur de l'ébauche au même point d'observation.
La philosophie de cette approche consiste à prendre $\delta\boldsymbol{x}$ comme variable de contrôle dans l'algorithme de minimisation au lieu de $\boldsymbol{x}$.
Et, en suivant la même démarche que celle utilisée dans la minimisation de l'équation (1.21), on trouve :

$$\nabla\boldsymbol{J}(\delta\boldsymbol{x}) = \mathbf{B}^{-1}\delta\boldsymbol{x} + \boldsymbol{H}^T\mathbf{R}^{-1}(\boldsymbol{H}\delta\boldsymbol{x} - \boldsymbol{d}) \tag{1.28}$$

en posant maintenant $\nabla\boldsymbol{J}(\delta\boldsymbol{x}) = 0$ on obtient :

$$\delta\boldsymbol{x} = \mathbf{B}\boldsymbol{H}^T\mathbf{R}^{-1}(\boldsymbol{d} - \boldsymbol{H}\boldsymbol{x}^a) \tag{1.29}$$

1.3.3 Méthode 3D-VAR FGAT

La ***3D-VAR FGAT*** est une variante de 3D-VAR qui calcule l'innovation au moment de l'observation. En fait, les observations sont assimilées à l'instant exact de leur mesure, et ceci diffère de la version 3D-VAR dans laquelle les observations sont assimilées toujours au milieu de la fenêtre d'assimilation, ce qui revient à supposer que toutes les observations sont valables au même instant.
La méthode 3D-VAR FGAT peut être considérée comme une simplification d'une autre méthode appelée 4D-VAR ([5],2003) où l'évolution de l'incrément est assurée par le modèle linéaire tangent c'est à dire on considère que l'écart $\delta\boldsymbol{x}$ entre l'analyse $\boldsymbol{x}^a$ et l'ébauche $\boldsymbol{x}^b$ est suffisamment faible pour pouvoir écrire :

$$\boldsymbol{H}_i\boldsymbol{M}_{0\rightarrow i}(\boldsymbol{x}^a) - \boldsymbol{H}_i\boldsymbol{M}_{0\rightarrow i}(\boldsymbol{x}^b) = \boldsymbol{H}_i\boldsymbol{M}_{0\rightarrow i}(\delta\boldsymbol{x}) \tag{1.30}$$

Où $\boldsymbol{M}_{0\rightarrow i}$ est l'opérateur linéaire tangent associe à l'intégration du modèle entre les temps $\boldsymbol{t}_0$ et $\boldsymbol{t}_i$.
Dans la méthode 3D-VAR FGAT la propagation de l'incrément est réalisée au contraire par un modèle dit de persistance qui égal à l'identité $\boldsymbol{M} = \boldsymbol{I}$.
D'autre part les erreurs d'observation sont supposées décorrélées, en fait, il n'y a pas de raison de supposer une corrélation entre des observations indépendantes issues des instruments différents. Notons que ceci n'est pas toujours vrai dans certains cas des observations spatiales.
De ce fait la matrice de covariance d'erreurs d'observations devient diagonale et par suite la fonction coût dans ce cas s'écrit :

$$\boldsymbol{J}(\delta\boldsymbol{x}) = \frac{1}{2}(\delta\boldsymbol{x})^T\mathbf{B}^{-1}(\delta\boldsymbol{x}) + \frac{1}{2}\sum_{i=0}^{n}(\boldsymbol{H}_i\delta\boldsymbol{x} - \boldsymbol{d}_i)^T\mathbf{R}_i^{-1}(\boldsymbol{H}_i\delta\boldsymbol{x} - \boldsymbol{d}_i) \tag{1.31}$$

La sommation dans cette équation (1.31) est faite sur le temps et d_i est le vecteur d'innovation à l'instant i. La mise en oeuvre de cette méthode dans OPA est décrite dans ([5],2003).

Chapitre 2

Construction et Validation de l'opérateur d'observation

L'assimilation variationnelle 3DVAR des données MERSEA1/4° dans le modèle ORCA2 nécessite la présence d'un opérateur d'observation bien adapté et capable de réaliser le passage de l'espace de basse résolution vers l'espace de haute résolution, ainsi que son adjoint qui fait le passage inverse (chapitre 6). Le but essentiel était de construire et d'adapter l'opérateur d'observation de type polynomial à des données de haute résolution MERSEA1/4° issues d'une grille ORCA0.25 non régulière avec une bathymétrie et des lignes des côtes différentes de celle du modèle ORCA2.

Dans notre étude nous avons eu recours à des expériences de comparaison dans différentes zones de l'océan entre une analyse MERSEA1/4° et une ébauche ORCA2 composée avec l'opérateur d'observation. Ces expériences nous ont permis de valider l'opérateur d'observation ainsi que l'implémentation d'un nouveau code d'intégration des données MERSEA1/4° dans le modèle ORCA2.
Dans la première partie de ce chapitre nous allons exposer la technique utilisée dans l'opérateur d'observation, dans la deuxième partie nous allons discuter des expériences permettant de montrer la validité de notre opérateur.
Pour simplifier, nous appelons dans toute la suite du rapport les analyses de haute résolution MERSEA1/4° par MERSEA.

2.1 Théorie de l'opérateur H

Notant $\boldsymbol{x}^{Hr}$ l'analyse MERSEA haute résolution et $\boldsymbol{x}^{Lr}$ le vecteur d'état du modèle ORCA2 basse résolution, l'opérateur d'observation H permet de calculer $H(\boldsymbol{x}^{Lr})$ l'équivalent modèle aux points d'analyse MERSEA(aux points d'observation par abus de langage). Ceci se fait en deux étapes (le code de base est décrit dans ([13],2004)) :

- ***Localisation de la cellule modèle contenant le point d'interpolation*** (x, y) ***:*** Sur la figure 2.1 nous avons représenté les quatre points (x_1,y_1), (x_2,y_2), (x_3,y_3), et (x_4,y_4) de la grille qui servent à retrouver la valeur au point (x, y), ces points sont localisés par le test :

  ($A.B \geq 0$), ($B.C \geq 0$), ($C.D \geq 0$) et ($D.A \geq 0$) avec :

$$\begin{aligned}
A &= (x - x_1).(y - y_3) - (x - x_3).(y - y_1) \\
B &= (x - x_3).(y - y_4) - (x - x_4).(y - y_3) \\
C &= (x - x_4).(y - y_4) - (x - x_2).(y - y_4) \\
D &= (x - x_2).(y - y_1) - (x - x_1).(y - y_2)
\end{aligned}$$

  Dans la pratique, pour localiser les quatre points de la cellule d'interplation, la recherche ne se fait pas sur toutes les cellules mais sur des domaines plus grand, puis on descend jusqu'à la cellule concernée c'est ce qu'on appel dichotomie ([13],2004).
- ***Interpolation polynomiale sur l'horizontale :*** la méthode consiste à chercher l'équivalent modèle au point (x, y) en interpolant les quatre points de la cellule (figure 2.1) à l'aide de la formule poly-

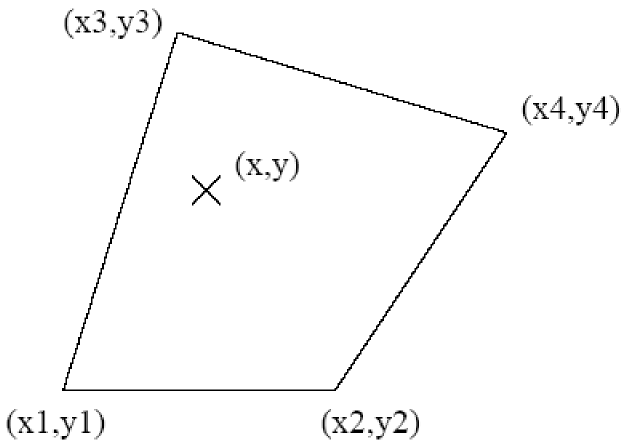


FIG. 2.1 – Position du point d'interpolation (x, y) au milieu de la cellule localisée par les quatre points (x_1,y_1), (x_2,y_2), (x_3,y_3), et (x_4,y_4).

nomiale suivante :

$$\tilde{\boldsymbol{x}}^{Hr}(x, y) = \sum_{i=1}^{4} \boldsymbol{x}^{Lr}(x_i, y_i) P^{(i)}(x, y) \tag{2.1}$$

$\tilde{\boldsymbol{x}}^{Hr}(x, y)$ est la valeur du modèle au point MERSEA (x, y) et $P^{(i)}$ un polynôme de dimension 4 avec deux variables :

$$P^{(i)} = a_1{}^{(i)} + a_2{}^{(i)}x + a_3{}^{(i)}y + a_4{}^{(i)}xy \tag{2.2}$$

Nous allons maintenant construire les coefficients de quatre polynômes pour i allant de 1 à 4 sous la condition :

$$\begin{pmatrix} a_1{}^{(1)} & a_2{}^{(1)} & a_3{}^{(1)} & a_4{}^{(1)} \\ a_1{}^{(2)} & a_2{}^{(2)} & a_3{}^{(2)} & a_4{}^{(2)} \\ a_1{}^{(3)} & a_2{}^{(3)} & a_3{}^{(3)} & a_4{}^{(3)} \\ a_1{}^{(4)} & a_2{}^{(4)} & a_3{}^{(4)} & a_4{}^{(4)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ y_1 & y_2 & y_3 & y_4 \\ x_1y_1 & x_2y_2 & x_3y_3 & x_4y_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

alors, les quatre polynômes d'interpolation sont donnés par :

$$\begin{pmatrix} P^{(1)} \\ P(2) \\ P^{(3)} \\ P^{(4)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ y_1 & y_2 & y_3 & y_4 \\ x_1y_1 & x_2y_2 & x_3y_3 & x_4y_4 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} 1 \\ x \\ y \\ xy \end{pmatrix}$$

Et en fin la valeur du modèle ORCA2 dans chaque point (x, y) est obtenue par la formule(2.1).

– ***Interpolation sur la verticale :*** après l'interpolation sur l'horizontale et pour retrouver l'équivalent modèle aux points MERSEA, on procède à une interpolation spline cubique sur la verticale.

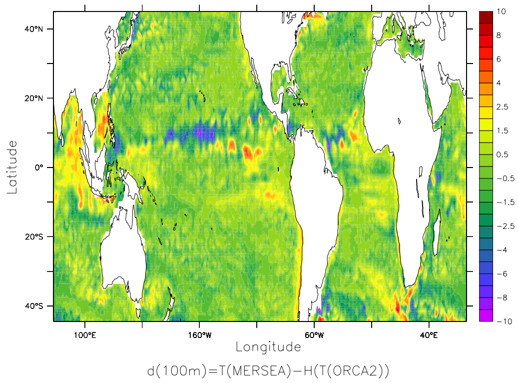
2.2 Contexte des expériences

Grâce à l'ensemble des analyses à basse résolution réalisées par MERCATOR dans les mêmes conditions de forçage et sur la même période que celle de MERSEA, il devient possible d'effectuer des comparaisons entre la basse et la haute résolution afin de tester l'opérateur d'observation H et d'investiguer la différence entre l'analyse ORCA2 et MERSEA. Nous commentons ici des expériences dans lesquelles

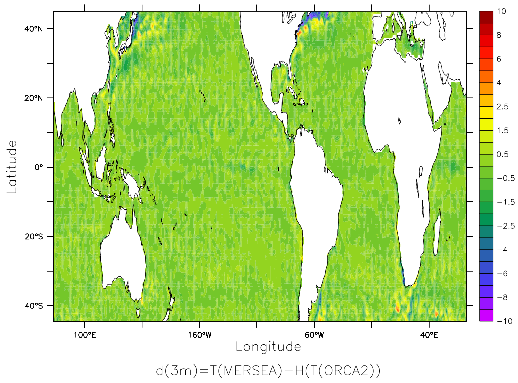
une ébauche ORCA2 du premier février 1992 ainsi qu'une analyse de haute résolution de la même date sont disponibles.
L'idée est de calculer la distribution spatiale de l'écart $d = \boldsymbol{x}^{Hr} - H(\boldsymbol{x}^{Lr})$ dans différentes zones de l'océan pour montrer quantitativement l'écart entre la basse et la haute résolution. Dans l'ensemble des endroits retenus pour ces expériences nous regardons uniquement le paramètre température de l'océan. Néanmoins, la méthode de calcul reste la même pour les autres paramètres scalaires comme la salinité et la densité.

2.3 Résultats

Nous avons représenté sur la figure (2.2) une comparaison entre la température de l'analyse de haute résolution MERSEA et celle du modèle basse résolution ORCA2. Les figures (2.2(a)) et (2.2(b)) illustrent respectivement la distribution spatiale de $T_{MERSEA} - H(T_{ORCA2})$ à 3m et à 100m. Nous constatons que



(a)$d = \boldsymbol{x}^{Hr} - H(\boldsymbol{x}^{Lr})$ à 100m en °C.



(b)$d = \boldsymbol{x}^{Hr} - H(\boldsymbol{x}^{Lr})$ à 3m en °C.

FIG. 2.2 – Distribution spatiale de l'écart $d = \boldsymbol{x}^{Hr} - H(\boldsymbol{x}^{Lr})$ à 3m et à 100m pour le premier février 1992.

cet écart à 3m prend des valeurs inférieurs à 1°C partout sauf dans les zones où la dynamique est plus importante, comme le cas des courants de bord ouest ((150°E,39°N) et (60°W 39°N)) où l'écart MERSEA-ORCA2 peut dépasser 8°C et Prés des zones frontales où l'écart devient négatif pour atteindre -8°C.
En comparant les deux figures (2.2(a) et 2.2(b)), on remarque que l'écart d dans la zone équatoriale prend

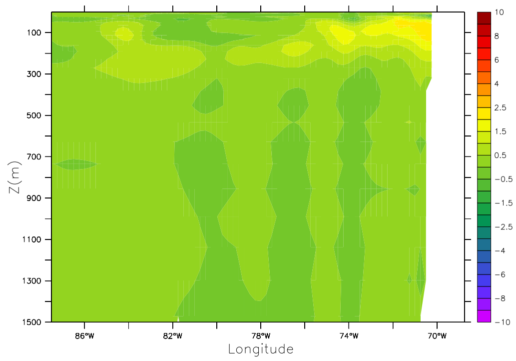
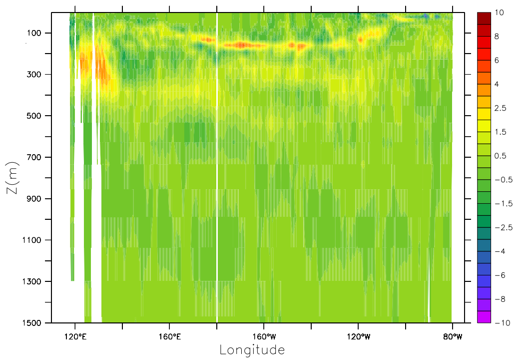


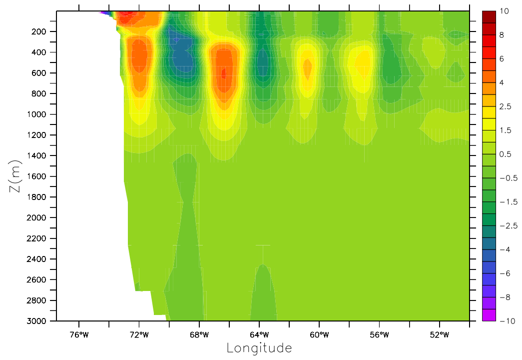
FIG. 2.3 – Distribution verticale de l'écart $d = \boldsymbol{x}^{Hr} - H(\boldsymbol{x}^{Lr})$ dans le pacifique Est à 25°S en °C pour le premier février 1992.

des valeurs beaucoup plus importantes à 100m que à 3m, ceci s'explique par le fait que la dynamique dans cette zone est plus variable (forts gradients verticaux et méridiens) en dessous de la couche de mélange que dans la couche de surface, en fait, les deux analyses ORCA2 et MERSEA ont été construites avec un rappel à la SST de Reynolds, ce qui explique que la température ORCA2 reste beaucoup plus proche de celle de MERSEA au niveau de la couche de surface qu'en profondeur. Sur le Pacifique Ouest (Indonésie) les fortes valeurs de d au niveau 100m sont associées aux effets des îles (trait de côtes et bathymétrie) qui ne sont pas représentées de façon similaire dans ORCA2 et dans MERSEA (différence de résolution).

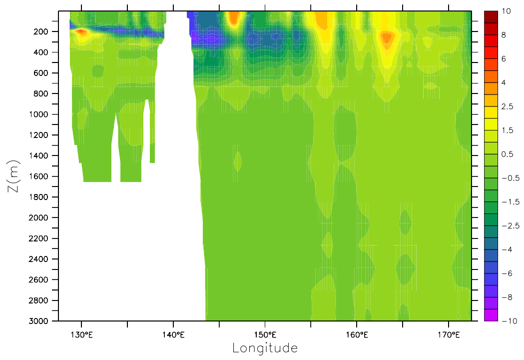
Nous avons vu que sur tout le bassin océanique à 3m comme à 100m l'écart entre l'analyse MERSEA et l'analyse ORCA2 transportée dans l'espace MERSEA ne dépasse pas 1°C en valeur absolue à l'exception des zones d'instabilité où la dynamique est trés différente dans les deux modèles(ORCA0.25 et ORCA2) : Gulf Stream, Kuroshio et ondes d'instabilité du pacifique équatorial ce qui confirme scientifiquement la validité des performances de notre système.
D'autre part, dans la zone du pacifique Sud-Est entre 20°S et 45°S (figure 2.2(b)), on note des fortes



(a)Coupe le long du Pacifique équatorial.



(b)Coupe dans le Gulf Stream à 39°N.



(c) Coupe dans le Kuroshio à 39°N.

FIG. 2.4 – Distribution verticale de l'écart $d = \boldsymbol{x}^{Hr} - H(\boldsymbol{x}^{Lr})$ en °C dans les zones de fortes instabilité dynamique pour le premier février 1992.

valeurs d'innovation le long des côtes qui sont certainement provoquées par la tension du vent utilisé dans le forçage des simulations MERSEA. Et pour mieux montrer cet effet, nous avons représenté sur la figure 2.3 une coupe verticale de l'écart MERSEA-ORCA2 dans le pacifique Est à 25°S. Nous constatons que cet écart prend des valeurs importantes très près des côtes et commence à diminuer rapidement vers le large. En effet l'erreur de discontinuité introduite par les montagnes sur le vent des analyses du CEPMMT (effet de Gibbs) se manifeste dans MERSEA sous forme d'onde sur le côte Est du continent

Sud américain. Nous allons revenir sur ce point dans le chapitre suivant.

Nous avons ensuite regardé les performances de MERSEA par rapport à ORCA2 dans les zones de forte dynamique. Les figures (2.4(a), 2.4(b) et 2.4(c)) montrent respectivement des coupes zonales de l'écart $d = \boldsymbol{x}^{Hr} - H(\boldsymbol{x}^{Lr})$ de température le long du Pacifique équatorial, dans le Gulf stream et dans le Kuroshio. On remarque que l'écat d prend des valeurs importantes dans le Pacifique entre 100m et 200m et remonte vers la couche de surface vers l'Est, ceci correspond exactement à la dynamique du sous-courant équatorial au coeur de la thermocline qui est très bien représenté dans MERSEA que dans ORCA2. Dans le Gulf Stream et le Kuroshio (figures 2.4(b) et 2.4(c)), nous constatons que les fortes valeurs de l'écart d sont restreintes au niveau des méandres associée à ces deux courants ce qui est compréhensible vu la résolution de MERSEA capable de mieux représenter la dynamique de petite échelle. Ailleurs l'écart qui ne dépasse pas $0.5°$C confirme largement la validité de notre opérateur d'observation.

2.4 Conclusion

Ces expériences de comparaison entre la basse et la haute résolution ont été réalisées dans le but de valider l'opérateur d'observation sur les données MERSEA. L'analyse des résultats a montré que l'innovation en dehors des zones d'instabilités ne dépasse pas en générale $0.5°$C ce qui est très convaincant pour la validité de l'opérateur d'observation. Les résultats ont permis aussi de mettre en évidence les zones où la différence en température est importante entre la basse et la haute résolution.

D'autre part cette étude a été réalisée à une date particulière (01/02/1992) ce qui limite nos constatations sur l'erreur de représentativité du modèle ORCA2 par rapport à MERSEA. En fait, il est intéressant de procéder à des expériences statistiques sur plusieurs années afin de produire des informations beaucoup plus réalistes sur cette erreur, ceci sera l'objectif du chapitre suivant.

Chapitre 3

Etude de l'erreur de représentativité avec ORCA2 et MERSEA

Dans ce chapitre nous allons procéder à des études statistiques sur l'erreur de représentativité du modèle basse résolution ORCA2 par rapport à la haute résolution MERSEA, dans le but d'investiguer les zones où l'état de l'océan à basse résolution s'éloigne de l'état réel qui est supposé être représenté par MERSEA dans notre étude. Ainsi, des expériences réalistes sur la température de l'océan ont été réalisées sur le premier février pour la période 1992-2001 (10 états océaniques).
Et afin d'acomplir ces expériences nous avons eu recours à deux jeux de données : les analyses MERSEA de haute résolution(chapitre1 1.2(1)) et les analyses ORCA2 de basse résolution(chapitre1 1.2(2)).

3.1 Diagnostiques de l'erreur

Dans un premier temps et avant d'entamer l'analyse de notre étude sur l'erreur de représentativité du modèle basse résolution, nous allons définir quelques outils statistiques nécessaires à une comparaison objective entre MERSEA et ORCA2 :

- ***Erreur de représentativité :*** caractérise ce que ORCA2 ne peut reproduire par rapport à MERSEA et qui peut être fonction de la résolution et/ou de la paramétrisation physique différentes, par exemple, la diffusion horizontale au niveau de la turbulence méso-échelle.
  Soit $\boldsymbol{x}^{Hr}$ une réalisation du modèle haute résolution ORCA0.25 (données MERSEA) et ${\boldsymbol{x}_t}^{Hr}$ son état vrai, on peut écrire :
  $$\boldsymbol{x}^{Hr} = {\boldsymbol{x}_t}^{Hr} + \epsilon \tag{3.1}$$
  Avec ϵ est l'erreur de $\boldsymbol{x}^{Hr}$ par rapport à ${\boldsymbol{x}_t}^{Hr}$.
  D'autre part l'erreur μ de l'état $\boldsymbol{x}^{Lr}$ du modèle basse résolution ORCA2 par rapport à son état vrai ${\boldsymbol{x}_t}^{Lr}$ peut s'écrire :
  $$\boldsymbol{x}^{Lr} = {\boldsymbol{x}_t}^{Lr} + \mu \tag{3.2}$$
  Si nous combinons maintenant les deux équations (3.1) et (3.2), l'état du modèle basse résolution peut se relier à MERSEA par :
  $$\boldsymbol{x}^{Hr} = \boldsymbol{H}{\boldsymbol{x}_t}^{Lr} + {\boldsymbol{x}_t}^{Hr} - \boldsymbol{H}{\boldsymbol{x}_t}^{Lr} + \epsilon = \boldsymbol{H}.{\boldsymbol{x}_t}^{Lr} + r \tag{3.3}$$
  L'opérateur d'observation $\boldsymbol{H}$ assure le passage de l'espace de basse résolution vers l'espace de haute résolution, il est considéré linéaire ici. Le terme $r = {\boldsymbol{x}_t}^{Hr} - \boldsymbol{H}{\boldsymbol{x}_t}^{Lr} + \epsilon$ constitue ***l'erreur de représentativité*** associe à une représentation incomplète de l'information contenue dans MERSEA par le modèle basse résolution. Dans cette équation on trouve le terme ϵ associe à l'erreur contenue dans l'analyse de haute résolution , elle est appelée erreur de mesure dans le cas des observations réelles et souvent considérée très faible devant le premier terme.
  En appliquant l'opérateur d'observation $\boldsymbol{H}$ à (3.2), l'équation équivalente s'écrit :
  $$\boldsymbol{H}\boldsymbol{x}^{Lr} = \boldsymbol{H}{\boldsymbol{x}_t}^{Lr} + p \tag{3.4}$$

Avec $p = \boldsymbol{H}.\mu$
Les équations (3.4) et (3.3) donnent :

$$< \boldsymbol{x}^{Hr}(\boldsymbol{x}^{Hr})^T >=< \boldsymbol{H}\boldsymbol{x}_t{}^{Lr}(\boldsymbol{H}\boldsymbol{x}_t{}^{Lr})^T > + < rr^T > \quad (3.5)$$

$$< \boldsymbol{x}^{Hr}(\boldsymbol{H}\boldsymbol{x}^{Lr})^T >=< \boldsymbol{H}\boldsymbol{x}_t{}^{Lr}(\boldsymbol{H}\boldsymbol{x}_t{}^{Lr})^T > \quad (3.6)$$

Ainsi la variance d'erreur de représentativité du modèle par rapport à MERSEA s'écrit :

$$< rr^T >=< \boldsymbol{x}^{Hr}(\boldsymbol{x}^{Hr})^T > - < \boldsymbol{x}^{Hr}(\boldsymbol{H}\boldsymbol{x}^{Lr})^T > \quad (3.7)$$

Dans notre étude, on considère uniquement la diagonale de $< rr^T >$, qui s'écrit :

$$Diag(< rr^T >) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}({x_i}^{Hr})^2 - \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}{x_i}^{Hr}\boldsymbol{H}(x_i^{Lr}) \quad (3.8)$$

où r correspond à la part du signal non représenté dans ORCA2 par rapport à MERSEA, N le nombre total de réalisations (10 réalisations dans notre étude), $\boldsymbol{H}$ l'opérateur d'observation, ${x_i}^{Hr}$ l'analyse MERSEA du premier février de l'année i, et x_i^{Lr} est l'analyse basse résolution ORCA2.
Ici, nous allons calculer l'erreur de représentativité en utilisant les variables centrées, c'est à dire au lieu de prendre $\boldsymbol{x}^{Hr}$ et $\boldsymbol{H}\boldsymbol{x}^{Lr}$ nous allons prendre $\boldsymbol{x}^{Hr} - < \boldsymbol{x}^{Hr} >$ et $\boldsymbol{H}\boldsymbol{x}^{Lr} - < \boldsymbol{H}\boldsymbol{x}^{Lr} >$. Et nous supposons aussi que les erreurs associées sont décorrélées entre elles ([3],2005).

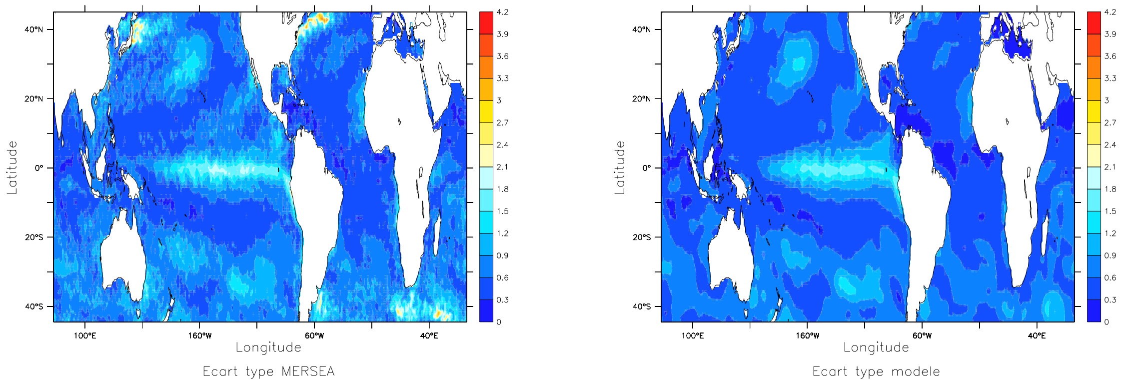
– ***Le biais :*** est la moyenne de la différence entre l'analyse MERSEA et les équivalents modèle :

$$Biais = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}({x_i}^{Hr} - \boldsymbol{H}(x_i^{Lr})) \quad (3.9)$$

3.2 Comparaison interannuelle entre l'analyse ORCA2 et MERSEA

3.2.1 Amplitude de la variabilité dans ORCA2

Dans un premier temps et afin de voir qualitativement si le modèle retrouve les mêmes zones de forte variabilité et avec les mêmes amplitudes que celles montrées dans MERSEA, nous avons représenté sur la figure (3.1), une comparaison des deux écarts types calculés en chaque point MERSEA sur 10 ans.
Les figures 3.1(a) et 3.1(b) illustrent respectivement l'écart type de la température T^{Hr} de MERSEA

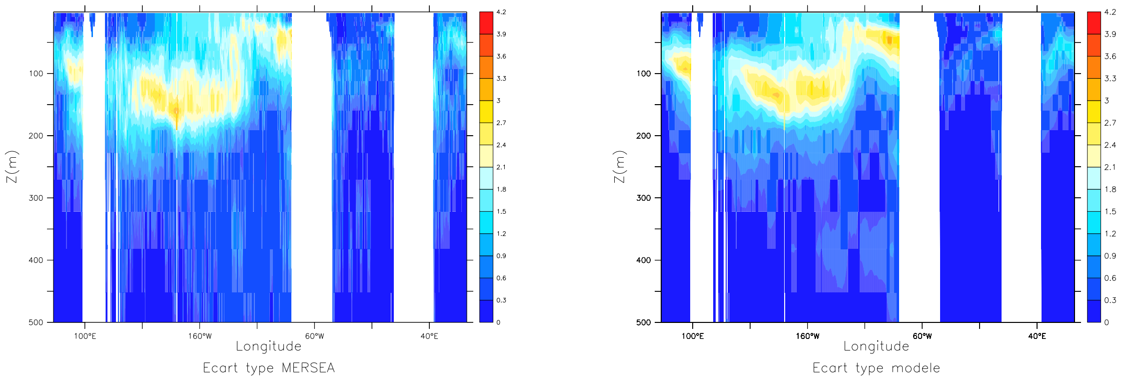


(a) Variabilité MERSEA dans la couche de surface à 3m. (b)Variabilté modèle dans la couche de surface à 3m.

FIG. 3.1 – Amplitude de la variabilité en °C (Ecart type) entre $45°$N et $45°$S calculée sur le mois de février pour la période allant de 1992 en 2001.

au niveau de la SST et l'écart type de la température $\boldsymbol{H}(T^{Lr})$ équivalente de ORCA2. Nous constatons

que en terme de localisation géographique, ORCA2 voit bien les zones de forte variabilité interannuelle qui apparaissent dans la haute résolution, en fait, nous trouvons la variabilité associée à la dynamique équatoriale, la dynamique des gyres subtropicaux ainsi que celle associée à la dynamique de l'upwelling au niveau de l'Afrique de l'Ouest et le Golfe de Bengale.
En terme d'intensité, nous remarquons que le modèle ORCA2 à généralement tendance à sous-estimer l'amplitude de la variabilité par rapport à la haute résolution, en fait, un écart type maximal de 1.6°C dans l'équateur et de 1.3°C dans les gyres subtropicaux Nord et Sud du pacifique sont estimés par le modèle basse résolution, comparés respectivement à 2.2°C et 1.9°C présents dans MERSEA.
Nous avons ensuite procédé à une comparaison en la profondeur entre la variabilité dans ORCA2 et la



(a)Variabilité MERSEA à l'équateur. (b)Variabilité ORCA2 à l'équateur.

FIG. 3.2 – Coupe de l'amplitude de la variabilité (Ecart type) en °C à l'équateur, calculée sur le premier février pour la période 1992-2001.

variabilité dans MERSEA . Pour des raisons de présentation seule la coupe à l'équateur est présentée ici (Figure 3.2). Nous constatons que les fortes valeurs de l'écart type se trouve au niveau de la thermocline dans la haute résolution comme dans la basse résolution. Ceci s'explique par la présence d'une zone de forte instabilité associée au sous courant équatorial dan cette zone. Dans le pacifique Est et l'océan Indien Est, nous remarquons une légère surestimation de l'amplitude de la variabilité par ORCA2 par rapport à MERSEA ce qui est certainement associe à l'effet des îles mal représenté par ORCA2 dans ces zones.
Nous représentons dans le tableau 3.1 une comparaison de l'amplitude de la variabilité maximale entre

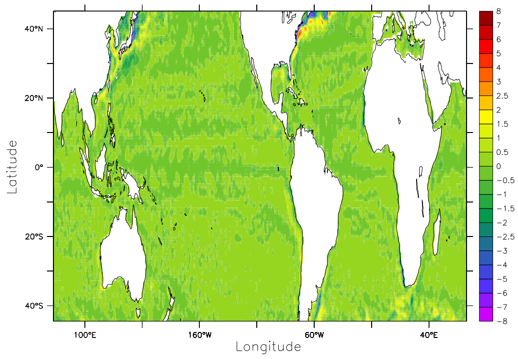
Zones	Couche de surface ORCA2	Couche de surface MERSEA	Thermocline ORCA2	Thermocline MERSEA
Gulf stream	1.3°C	4.2°C	2°C	3.2°C
Kuroshio	1.2°C	3.4°C	0.9°C	3°C
Equateur	1.6°C	2.2°C	2.8°C	4.2°C
gyre subtropical pacifique Nord	1.3°C	1.9°C	0.8°C	1.8°C
gyre subtropical pacifique Sud	1.3°C	1.8°C	0.6°C	1.2°C
Upwelling afrique de l'Ouest	1°C	1.4°C	0.6°C	0.8°C

TAB. 3.1 – Comparaison de l'amplitude maximale de la variabilité dans différentes zones de l'océan entre ORCA2 et MERSEA au niveau de la couche de surface et au niveau de la thermocline.

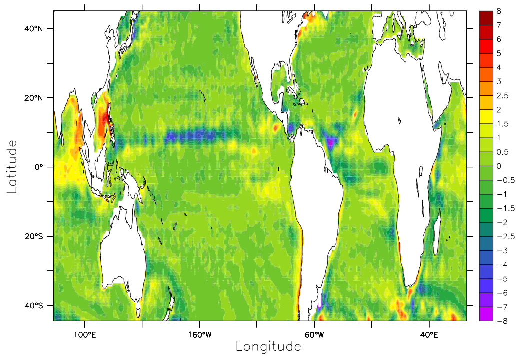
ORCA2 et MERSEA dans différentes zones de l'océan. On notra que de façon générale la variabilité MERSEA est plus importante que dans ORCA2.

3.2.2 Discussion de l'erreur de représentativité du modèle ORCA2

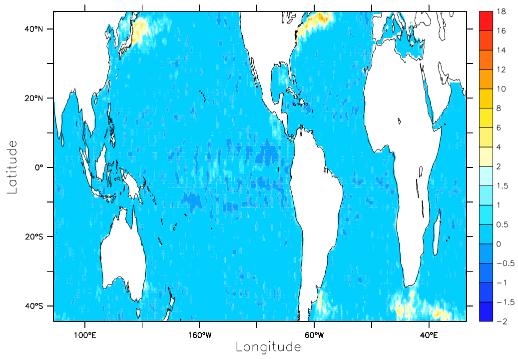
Aprés avoir étudié l'ensemble des zones de forte variabilité dans ORCA2 et évalué leurs amplitudes, nous nous somme intéressés ensuite à l'erreur de ORCA2 en terme d'écart moyen par rapport à MERSEA(équation 2.9) et à l'erreur de représentativité (équation 2.7) qui permet de localiser les zones où le modèle ne retrouve pas l'information contenue dans MERSEA.
Cette erreur de représentativité ne garantit pas que $< rr^T >$ > 0. En fait, on peut avoir numériquement $< rr^T >$<0. cela se voit trés bien sur les figures 3.3(d) et 3.6(b) où le biais entre ORCA2 et MERSEA est bien présent. Afin d'évaluer ces erreurs du modèle dans l'océan global, nous nous sommes intéressées à des régimes particuliers de l'océan.



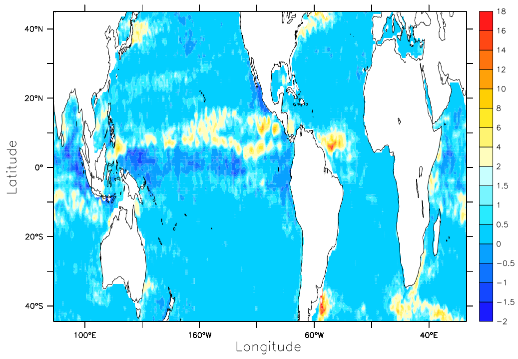
(a)Biais à 3m en °C.



(b)Biais à 100m en °C.



(c)Erreur de représentativité à 3m en $°C^2$.



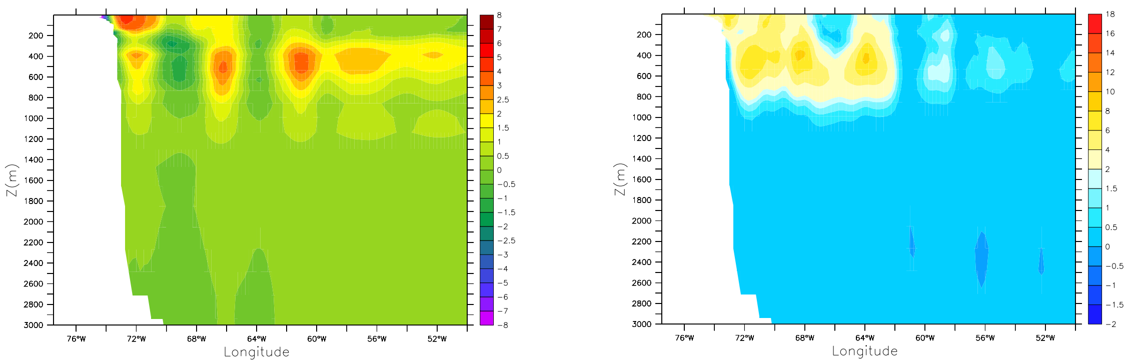
(d)Erreur de représentativité à 100m $°C^2$.

FIG. 3.3 – Biais et erreur de représentativité entre $45°$N et $45°$S dans la couche de surface(3m) et en subsurface (100m) , calculés sur le premier février pour la période 1992-2001.

1. **Dans la couche de surface**
   Dans un premier lieu, nous nous sommes intéressé à l'erreur de représentativité du modèle au niveau de la couche de surface sur l'océan global. C'est la couche supérieure de l'océan qui a une structure thermique verticale très complexe et variable, liée à la turbulence océanique, aux flux de chaleur océan-atmosphère et à la tension du vent à l'interface air-mer.
   Sur la figure 3.3(a) nous avons représenté l'écart moyen (Biais) entre MERSEA et l'équivalent modèle. Nous constatons que le biais ne dépasse pas généralement $0.5°$C en valeur absolue sur tout le domaine, sauf dans les zones de dynamique importante et en particulier les courants de bord Ouest : Gulf stream et Kuroshio, et le courant circumpolaire Antarctique vers $45°$S. Dans ces zones l'écart moyen peut atteindre $5°$C. Ce faible biais entre ORCA2 et MERSEA dans cette couche de l'océan, se justifie par le rappel à la SST de Reynolds utilisé lors de la construction de ces deux jeux

de données (ORCA2 et MERSEA).
Si l'on regarde maintenant l'erreur de représentativité (figure 3.3(c)), les fortes valeurs de cette erreur correspondent aux zones où le modèle n'arrive pas à représenter correctement l'état océanique moyen. Ceci peut être lié à la faible résolution de ORCA2 ou à des erreurs au niveau du forçage . Nous constatons que les fortes erreurs se situent au niveau du Gulf stream, Kuroshio, et le courant circumpolaire Antarctique, ce qui justifie largement l'important biais entre le modèle et MERSEA constaté dans ces zones. En fait, la variabilité différente dans les deux système produit un état moyen différent.

2. **En subsurface**
Les figures 3.3(b) et 3.3(d) représentent respectivement, le biais et l'erreur de représentativité au niveau de la thermocline (vers 100m de profondeur) sur l'océan global. Le biais négatif au niveau de l'équateur montre une forte surestimation de la température à 100m par ORCA2. Ceci s'explique par la dynamique d'upwelling équatoriale bien représentée dans MERSEA que dans ORCA2. D'autre part, on constate que dans les tropiques l'erreur en profondeur ($\sim$ 100m) est plus marquée que dans la couche de surface (figure 3.3(c)). En fait, le modèle est rappelé à la SST au cours de son évolution dans le temps, ce qui justifie le fait que la température dans la couche de surface dérive beaucoup moins qu'en profondeur où les zones des forts gradients verticaux donnent lieu à un biais et une erreur de représentativité significatives.
On remarque un important effet des îles au niveau du pacifique Ouest avec un biais de valeur maximale qui peut atteindre 5°C en Indonésie. Un autre écart moyen significatif entre ORCA2 et MERSEA apparaît sur la zone du pacifique Sud-Est. Cette erreur est dûe au fait que dans les simulations MERSEA, on utilise un vent CEPMMT qui contient des erreurs de discontinuité numérique. En fait, l'effet des montagnes le long des côtes mal représenté dans CEPMMT donne lieu à un vent irréaliste, ceci se manifeste dans MERSEA sous la forme d'importantes ondes près des côtes conduisant à des upwellings irréalistes et à une surestimation de la température de l'océan.



(a)Biais en °C.

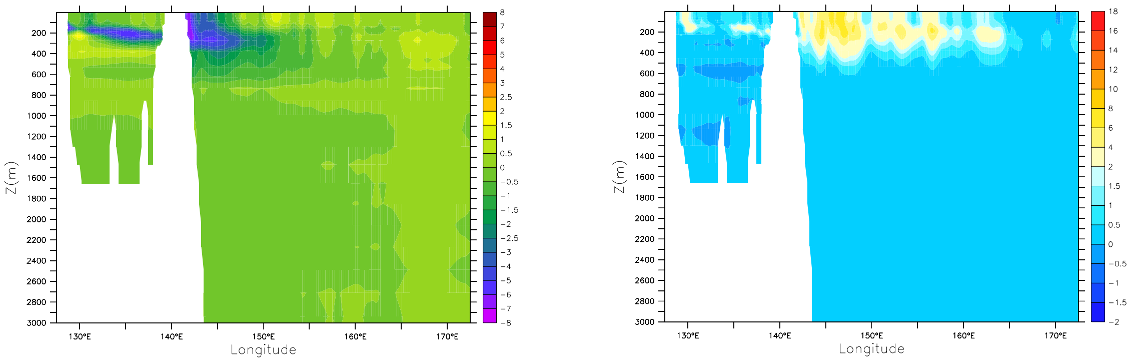
(b)Erreur de représentativité en $°C^2$.

FIG. 3.4 – Coupe du Biais et d'erreur de représentativité dans la zone du Gulf Stream (39°N) , calculés sur le premier février pour la période 1992-2001.

3. **Dans les courants de bord Ouest**

– **Le Gulf Stream :**Dans cette région de l'océan, le biais varie entre -0.5°C et 0.5°C (figure 3.4(a)) ce qui reste trés satisfaisant sauf dans les cellules du Gulf Stream où l'écart peut atteindre une valeur maximale de 5°C en valeur absolue, cet écart se présente sous forme d'une alternance des noyaux chauds et froids au niveau de la thermocline avec des extensions peuvant remonter jusqu'à la surface. L'alternance des cellules chaudes et froides (méandres) s'expliquent par la présence de nombreux tourbillons qui déforment les isothermes, chose qui n'existe pas dans ORCA2 (faible activité barocline). D'autre part la forte erreur de représentativité (figure 3.4(b))coïncide exactement avec les endroits où ORCA2 sous-estime la température MERSEA, ceci confirme que ORCA2 n'arrive pas à représenter correctement la turbulence du Gulf stream bien présente dans MERSEA. En fait, ceci est compréhensible vu sa faible résolution spatiale ainsi que sa paramétrisation physique qui reste peu efficace pour représenter les phénomènes mésoéchelle.

– **Le Kuroshio :** dans cette zone, le biais(figure 3.5(a))montre une forte surestimation par le modèle ORCA2 de la température MERSEA sur les côtes Est du Japon entre la surface et 400m de profondeur ainsi qu'au niveau de la thermocline sur les côtes Ouest. L'écart moyen maximal dans cette région peut atteindre 8°C. On remarque aussi une sous-estimation de la température par

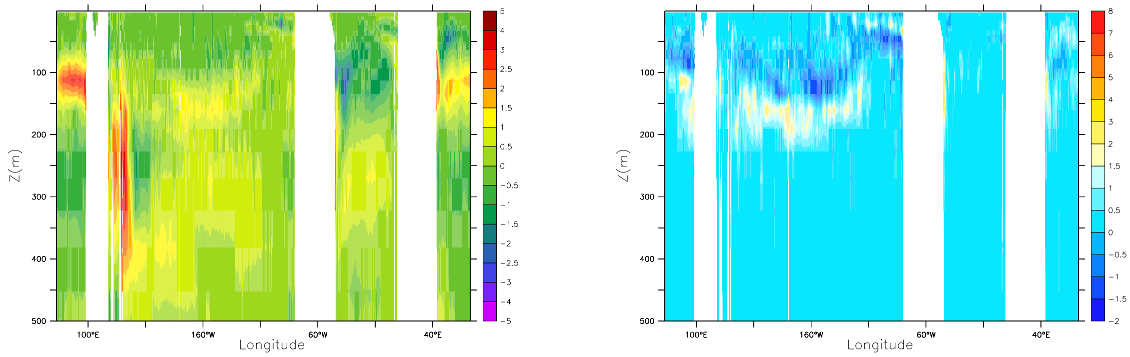


(a)Biais en °C. (b)Erreur de représentativité en $°C^2$.

FIG. 3.5 – Coupe du Biais et d'erreur de représentativité dans la zone du Kuroshio (39°N) , calculés sur le premier février pour la période 1992-2001.

ORCA2 au niveau des cellules de Kuroshio entre 145°E et 170°E. Ailleurs le modèle reste très proche de la température MERSEA avec un écart ne dépassant pas 0.5°C ce qui est largement satisfaisant. Les fortes valeurs de la variance d'erreur de représentativité (figure 3.5(b)) trace la dynamique du Kuroshio où ORCA2 à un biais important par rapport à MERSEA.
D'autre part, l'erreur au niveau du Kuroshio reste nettement moins importante que celle du Gulf Stream (figure 3.4(b)) où la dynamique apparaît beaucoup plus forte.

4. **En profondeur à l'équateur**
Les figures 3.6(a) et 3.6(b) illustrent respectivement le diagnostic du biais et la variance d'erreur de représentativité le long de l'équateur. Les erreurs dans cette zone sont restreintes au talus continental et au niveau de la thermocline à l'équateur vers 150m de profondeur. Dans le Pacifique, on



(a)Biais à l'équateur en °C. (b)Erreur de représentativité à l'équateur en $°C^2$.

FIG. 3.6 – Coupe du Biais et d'erreur de représentativité à l'équateur, calculés sur le premier février pour la période 1992-2001.

remarque deux lignes d'erreur de représentativité l'une prés de l'autre en dessous de la couche de mélange. Ceci correspond à un léger décalage dans le positionnement de la thermocline par ORCA2 par rapport à MERSEA. D'autre part, le biais sur toute la profondeur équatoriale ne dépasse pas $0.5°C$ en valeur absolue sauf dans la zone de la thermocline et la zone d'effet des îles sur le pacifique Ouest et Est.

3.3 Conclusion

L'analyse du biais et de la variance sur 10 ans a permis de remarquer les zones de fort écart MERSEA-ORCA2 et les zones où la variabilité en température est importante. Le diagnostic de l'erreur de représentativité a montré que c'est dans les zones de forte activité barocline que le modèle n'arrive pas à représenté correctement l'état de l'océan. En fait, l'étude a mis en évidence que la forte variabilité en température associée à la dynamique de petite échelle dans les courants de bord Ouest entraîne de fortes erreurs de représentativité pour ORCA2.

Dans la couche de surface, le modèle ORCA2 représente mieux la dynamique équatoriale ce qui montre l'efficacité du rappelle à la SST de Reynolds utilisé. D'autre part, en subsurface la dynamique importante au niveau de la thermocline introduit une légère différence de comportement entre le modèle ORCA2 et MERSEA.
Sur le reste du domaine, l'écart moyen et l'erreur de représentativité sont très faibles et en particulier en dessous de 700m où le modèle ORCA2 simule raisonnablement la variabilité océanique de MERSEA.

Chapitre 4

Assimilation 3DVAR de MERSEA dans ORCA2

Nous avons vu précédemment que le modèle basse résolution ORCA2 a un biais significatif dans les zones où la dynamique de l'océan est importante. Et afin de corriger ces erreurs et par suite produire un état de l'océan à basse résolution beaucoup plus fiable, un système d'assimilation 3D-VAR basé sur les données MERSEA et les facteurs d'échelles a été mis en oeuvre. L'idée consiste à exploiter la grande information sur la structure thermique de l'océan contenue dans MERSEA, pour construire un état initial pour la prévision du modèle basse résolution ainsi que pour la prévision saisonnière.

Dans la première partie de ce chapitre, nous exposerons la nouvelle technique d'assimilation utilisée. Dans la deuxième partie, nous discuterons des expériences permettant de montrer les performances et l'état de l'art de notre système en répondant à la question : l'assimilation des données MERSEA dans le modèle ORCA2 permet-elle de produire un bon état de l'océan à basse résolution ?
Dans toute la suite du rapport, les expériences d'assimilation réalisées utilisent les données MERSEA du 01/02/1992.

4.1 Description des expériences

L'assimilation de toutes les données MERSEA sur le domaine globale nécessite des moyens de calcul et de stockage mémoire assez importants, en effet la manipulation des matrices de taille énorme telle que celles de MERSEA $(1442 \times 1021 \times 46) \times (1442 \times 1021 \times 46)$ consomme beaucoup d'espace mémoire. De plus l'utilisation du gradient conjugué au niveau de la minimisation de la fonction coût vient s'ajouté pour rendre ce besoin en espace mémoire beaucoup plus grand.

Expériences	Description
EXP1	Consiste à regarder l'impact de l'assimilation des données MERSEA dans différentes couches du pacifique Est ((25°N, 45°S), (60°W, 140°W)).
EXP2	Consiste à assimiler les données MERSEA dans la zone de forte composante mésoéchelle du Gulf Stream ((0°, 50°N), (20°W, 110°W)).
EXP3	consiste à construire une analyse complète sur tout le domaine global en regroupant des analyses obtenues sur 12 domaines limités.

TAB. 4.1 – Description des expériences d'assimilation 3D-VAR des données MERSEA.

Dans notre étude et vus les moyens de calcul disponibles au sein de CERFACS qui ne permettent pas d'assimiler toutes les données MERSEA sur le domaine global (OPAVAR mono processeur), nous avons décidé de procéder à une assimilation sur des domaines limités. Ainsi des expériences réalistes d'assimilation 3DVAR des données MERSEA ont été réalisées (tableau 4.1). Pour des raisons de présentation, l'expérience EXP3 sera présentée dans l'annexe D.
Afin d'éliminer l'effet du bord dans ces trois expériences, nous avons effectué des simulations sur des domaines plus grands tout en gardant le résultat sur des domaines intérieurs qui sont mentionnés dans

le tableau (4.1). Une expérience de sensibilité à cette limitation du domaine sera présentée dans le chapitre 5.

4.2 Technique d'assimilation 3DVAR de MERSEA dans ORCA2

La méthode consiste à prendre l'analyse de haute résolution MERSEA notée $\boldsymbol{x}^{Hr}$ comme des observations de l'état réel ${\boldsymbol{x}_t}^{Lr}$ du modèle ORCA2 de basse résolution :

$$\boldsymbol{x}^{Hr} = \boldsymbol{H} \cdot {\boldsymbol{x}_t}^{Lr} + \epsilon^{Hr} \tag{4.1}$$

$\boldsymbol{H}$ est l'opérateur qui fait le passage de l'espace de basse résolution ORCA2 vers l'espace de haute résolution MERSEA et ϵ^{Hr} est l'erreur associée à MERSEA.
Si nous disposons d'une ébauche ${\boldsymbol{x}_b}^{Lr}$ à la date d'analyse, son erreur ϵ^b par rapport à l'état réel du modèle, s'écrit :

$${\boldsymbol{x}_b}^{Lr} = {\boldsymbol{x}_t}^{Lr} + \epsilon^b \tag{4.2}$$

En introduisant maintenant ces notations, l'équation (1.21) de la fonction coût $\boldsymbol{J}$ devient :

$$\boldsymbol{J}(\boldsymbol{x}^{Lr}) = \underbrace{\frac{1}{2}({\boldsymbol{x}_b}^{Lr} - \boldsymbol{x}^{Lr})^T {\mathbf{B}_L}^{-1}({\boldsymbol{x}_b}^{Lr} - \boldsymbol{x}^{Lr})}_{\boldsymbol{J}^b(\boldsymbol{x}^{Lr})} + \underbrace{\frac{1}{2}(\boldsymbol{x}^{Hr} - \boldsymbol{H}\boldsymbol{x}^{Lr})^T {\mathbf{R}_H}^{-1}(\boldsymbol{x}^{Hr} - \boldsymbol{H}\boldsymbol{x}^{Lr})}_{\boldsymbol{J}^o(\boldsymbol{x}^{Lr})} \tag{4.3}$$

Où $\mathbf{R}_H = E(\epsilon^{Hr}{\epsilon^{Hr}}^T)$ est la matrice des variances-covariances des erreurs d'analyse de haute résolution MERSEA et $\mathbf{B}_L = E(\epsilon^b{\epsilon^b}^T)$ la matrice des variances-covariances des erreurs d'ébauche.
Afin de faciliter la minimisation, nous allons par la suite éliminer le terme d'ébauche de la fonction coût (4.3). Notons que ceci reste largement justifié vu qu'on dispose de plus d'observations que des variables à contrôler (données MERSEA de haute résolution).
A ce stade de l'étude, le problème de modélisation de la matrice $\mathbf{R}_H$ se pose. Et pour ce faire, nous avons eu recours à une méthode purement géométrique qui consiste à prendre $\boldsymbol{R}_H = {\boldsymbol{W}_H}^{-1}$. Avec $\boldsymbol{W}_H = (\boldsymbol{e}_1.\boldsymbol{e}_2.\boldsymbol{e}_3)_{ii}$ est la matrice diagonale contenant le produit des trois facteurs d'échelle à chaque point de grille i MERSEA (grille ORCA0.25) qui sont déterminés par les équations (1.1), (1.2) et (1.3).
L'utilisation de cette nouvelle technique basée sur les facteurs d'échelle donne à notre système d'assimilation une interprétation purement mathématique que statistique. En fait, d'habitude dans l'assimilation le poids des observations dans le système est déterminé par les variances d'erreur, contrairement à notre étude où le poids de chaque donnée MERSEA dans le système d'assimilation est déterminé par son domaine de signification égal à $(\boldsymbol{e}_1.\boldsymbol{e}_2.\boldsymbol{e}_3)_{ii}$.
Ainsi, en remplaçant $\boldsymbol{R}_H$ par ${\boldsymbol{W}_H}^{-1}$ et en éliminant le terme d'ébauche, la fonction coût devient :

$$\boldsymbol{J}(\boldsymbol{x}^{Lr}) = \tfrac{1}{2}(\boldsymbol{x}^{Hr} - \boldsymbol{H}\boldsymbol{x}^{Lr})^T \mathbf{W}_H(\boldsymbol{x}^{Hr} - \boldsymbol{H}\boldsymbol{x}^{Lr}) \tag{4.4}$$

Le gradient $\nabla\boldsymbol{J}(\boldsymbol{x}^{Lr})$ s'écrit :

$$\nabla\boldsymbol{J}(\boldsymbol{x}^{Lr}) = \boldsymbol{H}^T\boldsymbol{W}_H(\boldsymbol{H}\boldsymbol{x}^{Lr} - \boldsymbol{x}^{Hr}) \tag{4.5}$$

En posant par suite ce gradient à zéro, on obtient la solution optimale :

$${\boldsymbol{x}_a}^{Lr} = (\boldsymbol{H}^T\boldsymbol{W}_H\boldsymbol{H})^{-1}\boldsymbol{H}^T\boldsymbol{W}_H\boldsymbol{x}^{Hr} \tag{4.6}$$

Dans notre étude, nous avons procédé à une minimisation à l'aide d'une méthode itérative basée sur l'algorithme appelé CONGRAD perfectionné au sein du CERFACS ([20],1998). Cet algorithme utilise la formulation incrémentale de la fonction coût, défini par :

$$\boldsymbol{J}(\delta\boldsymbol{x}^{Lr}) = \tfrac{1}{2}(\boldsymbol{H}\delta\boldsymbol{x}^{Lr} - \boldsymbol{x}^{Hr} + \boldsymbol{H}{\boldsymbol{x}_b}^{Lr})^T \mathbf{W}_H(\boldsymbol{H}\delta\boldsymbol{x}^{Lr} - \boldsymbol{x}^{Hr} + \boldsymbol{H}{\boldsymbol{x}_b}^{Lr}) \tag{4.8}$$

Avec $\delta \boldsymbol{x}^{Lr} = \boldsymbol{x}^{Lr} - \boldsymbol{x_b}^{Lr}$ est l'incrément. D'autre part, cette méthode nécessite un préconditionnement pour faciliter la convergence de l'algorithme de minimisation. La meilleur technique pour faire ce préconditionnement est de procéder à un changement de variable tel que :

$$\boldsymbol{v}^{Lr} = \boldsymbol{U}^{-1}\delta \boldsymbol{x}^{Lr} \tag{4.9}$$

Avec $\boldsymbol{U}\boldsymbol{U}^T = \boldsymbol{W}_L{}^{-1}$, Où $\boldsymbol{W}_L$ est la matrice diagonale modélisée par le produit de trois facteurs d'échelle de la grille du modèle basse résolution ORCA2 comme le cas de MERSEA ci-dessus.
Ainsi le problème d'analyse variationnelle est résolu dans l'espace de $\boldsymbol{v}$ puis transformé à l'espace du modèle en utilisant la transformation inverse :

$$\delta \boldsymbol{x}^{Lr} = \boldsymbol{U}\boldsymbol{v}^{Lr} \tag{4.10}$$

En introduisant ce changement de variable, la fonction coût devient :

$$\boldsymbol{J}(\boldsymbol{v}^{Lr}) = \frac{1}{2}(\boldsymbol{HUv}^{Lr} - \boldsymbol{x}^{Hr} + \boldsymbol{Hx_b}^{Lr})^T \mathbf{W}_H (\boldsymbol{HUv}^{Lr} - \boldsymbol{x}^{Hr} + \boldsymbol{Hx_b}^{Lr}) \tag{4.11}$$

4.3 Assimilation de MERSEA sur le Pacifique Est

Avant d'entamer l'analyse des résultats, nous avons représenté sur la figure (4.1), l'évolution de la norme du gradient de la fonction coût en fonction de nombre des itérations lors de l'expérience $EXP1$. Pour des raisons de présentation (grandes valeurs sur l'axe Y) nous avons montré le logarithme du gradient de la fonction coût au lieu du gradient sur l'axe des ordonnées. On remarque que le gradient descend de la valeur 60 pour commencer à se stabiliser au bout de 30 itérations et atteint quasiment sa valeur optimale après 45 itérations. Ainsi, cette forte stabilisation du gradient met en évidence que l'état trouvé par notre système de minimisation est largement proche de l'état optimal T_a appelé **l'analyse**.

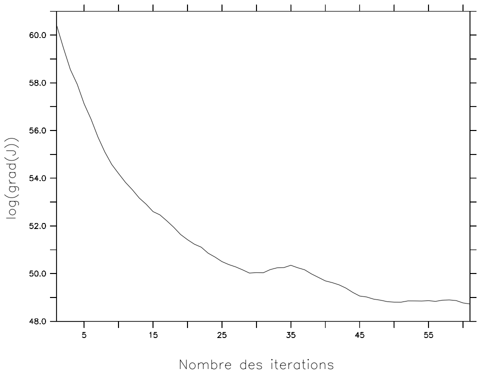
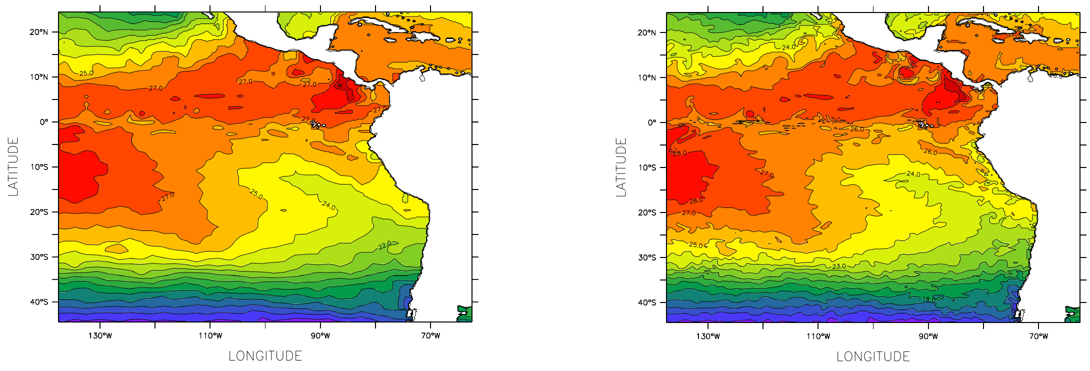


FIG. 4.1 – Evolution de la norme du gradient de la fonction Coût en fonction de nombre des itérations dans l'expérience EXP1.

4.3.1 Diagnostiques du lissage à basse résolution

Dans le but de vérifier si le système d'assimilation variationnelle 3D-VAR produit une analyse à basse résolution beaucoup plus lisse que MERSEA, on va effectuer une comparaison qualitative entre l'analyse transportée dans l'espace MERSEA $\mathbf{H}(T_a)$ et les données MERSEA assimilées T^{Hr}.
Nous avons représenté sur les figures 4.2(a) et 4.2(b) ces deux champs dans la couche de surface. On constate que l'analyse T_a retrouve l'allure de la température MERSEA avec un bon lissage bien marqué sur les isothermes, par exemple au point (25°S,130°W). De plus, on remarque que l'ensemble de la variabilité méso-échelle présente dans MERSEA(figure 4.2(b)) a été supprimée de l'analyse (figure 4.2(a)). Le système a gardé uniquement les ondulations des échelles suffisamment pertinentes, ce qui met en évidence que l'assimilation 3D-VAR des données MERSEA est efficace pour lisser les champs de température.



(a) $\mathbf{H}(T_a)$ à 5m.

(b) T^{Hr} à 5m.

FIG. 4.2 – Comparaison entre la température MERSEA T^{Hr} et l'analyse de température transportée dans l'espace MERSEA $\mathbf{H}(T_a)$ en °C.

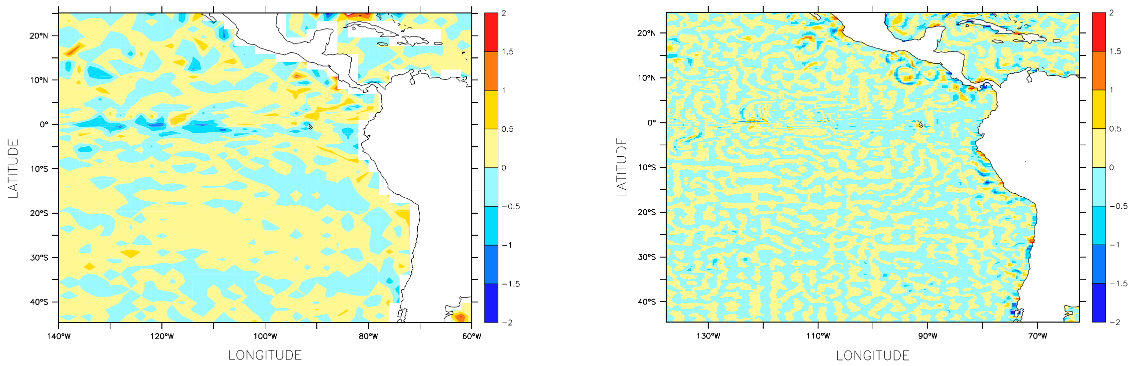
4.3.2 Diagnostiques de la correction introduite par l'assimilation variationnelle 3D-VAR

Dans notre analyse des résultats, on va regarder l'impact de l'assimilation des données MERSEA dans différentes couches du Pacifique Est. Pour se faire, on va évaluer l'incrément $\delta T = T_a - T_b$ qui représente l'écart entre l'analyse T_a et l'ébauche T_b. Il peut être aussi interprété comme une correction apportée par MERSEA à l'ébauche .

D'autre part, on va investiguer l'écart entre MERSEA et l'analyse (état de l'océan après l'assimilation) $T^{Hr} - \mathbf{H}(T_a)$, ce diagnostic nous permet de mettre en évidence l'information que le système n'a pas pu extraire de MERSEA ou autrement dit, l'information sur les petites échelles que le système a filtrée et qui ne nous intéresse pas à basse résolution.

Dans le but de mieux montrer ces comportements du système sur toute la profondeur, nous allons analyser l'impact de l'assimilation des données MERSEA dans le modèle ORCA2 dans différentes couches de l'océan Pacifique Est :

1. **Dans la couche de surface :**
   Nous avons représenté sur la figure 4.3(a) l'incrément dans la couche de surface(~5m). Nous



(a) L'incrément δT à 5m en °C.

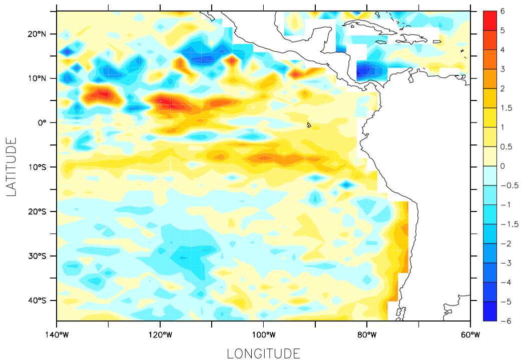
(b)$T^{Hr} - \mathbf{H}(T_a)$ à 5m °C.

FIG. 4.3 – Distribution spatiale de l'incrément et de MERSEA-analyse dans la couche de surface du pacifique Est.

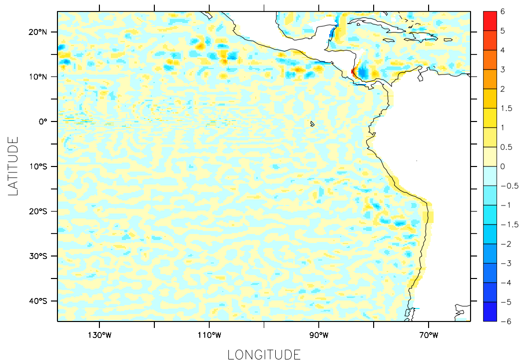
constatons que la correction apportée par l'assimilation des données MERSEA à l'ébauche prend une valeur maximale de l'ordre de 1°C à 2°C à l'équateur et prés des côtes, ce qui justifie for-

tement que le système a bien extrait de l'information de MERSEA dans ces zones connues par une erreur significative dans l'ébauche(chapitre 2). La correction à l'équateur apparaît sous forme d'onde correspondant à un phasage des ondes d'instabilité tropicales présentes dans ORCA2 sur celles de MERSEA. Ailleurs, l'incrément qui ne dépasse pas en général $0.5°$C reste en parfaite cohérence avec le fait qu'au départ de l'assimilation l'erreur entre MERSEA et l'ébauche n'était pas importante vu le fort rappel à la SST utilisé dans ORCA2 et MERSEA.
D'autre part, l'écart entre MERSEA et l'analyse $T^{Hr} - \mathbf{H}(T_a)$ inférieur à $0.5°$C (figure 4.3(b)) en valeur absolue, confirme que l'analyse T_a a bien pris toute l'information contenue dans MERSEA dans cette couche de l'océan, exception faite pour certaines zones où le filtrage des petites échelles est significatif ($\mid T^{Hr} - \mathbf{H}(T_a) \mid > 0.5°$C).

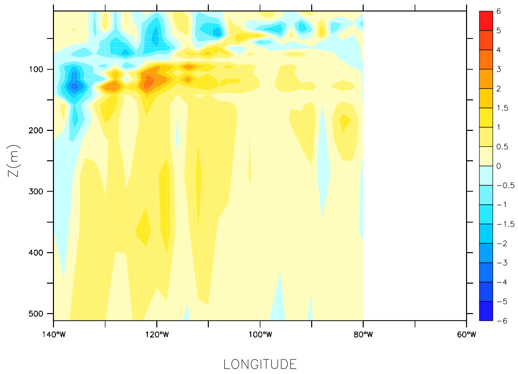
2. **Dans la thermocline :**
Si l'on regarde l'incrément de température dans cette partie de l'océan (figure 4.4(a)), on note que cet écart prend des valeurs maximales négatives à $5°$N et positives à $10°$N. En fait, l'assimilation des données MERSEA a tendance à corriger l'erreur contenue dans l'ébauche en réchauffant dans l'endroit où le modèle sous-estime la température de MERSEA et en refroidissant dans l'endroit où il surestime. La coupe de l'incrément à l'équateur(figure 4.4(c)) entre la surface et 500m de pro-



(a) L'incrément δT à 100m en °C.



(b)$T^{Hr} - \mathbf{H}(T_a)$ à 100m en °C.



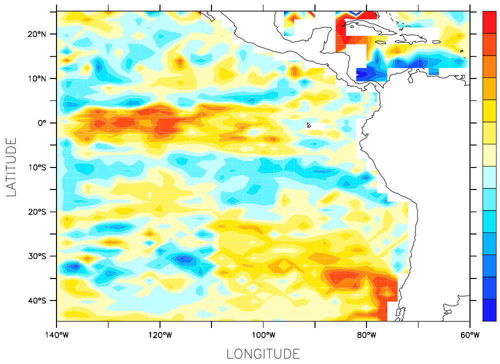
(c)Coupe de l'incrément δT à l'équateur en °C.

FIG. 4.4 – Distribution spatiale de l'incrément et de MERSEA-analyse au niveau de la thermocline dans le pacifique Est.

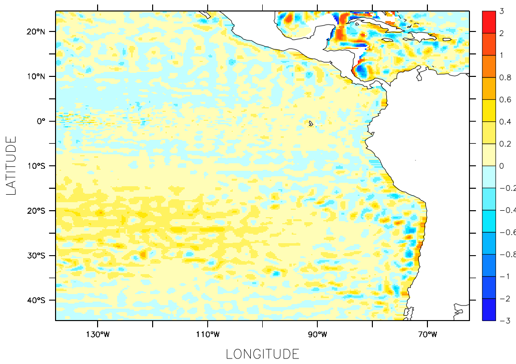
fondeur, montre que la grande correction introduite par le système est restreinte à la zone de la thermocline où le modèle présente un biais significatif par rapport à MERSEA, ce qui reste en parfaite cohérence avec l'étude faite sur l'erreur de représentativité dans le chapitre 2.
Si l'on s'intéresse maintenant à l'écart de l'analyse par rapport à MERSEA (figure 4.4(b)), $T^{Hr} - \mathbf{H}(T_a)$ prend des valeurs faibles, généralement inférieures à $0.5°$C, sauf dans les zones où les petites échelles de l'analyse ont été filtrées, comme sur la figure 4.4(b) entre $10°$N et $20°$N où l'écart

MERSEA-analyse peut atteindre une valeur maximale de 3°C.

3. **Sous la thermocline :**
Sur la figure 4.5(a), nous avons représenté la distribution spatiale de l'écart entre l'analyse et l'ébauche à 360m. A cette profondeur la zone équatoriale semble nettement améliorée ainsi que la zone prés des côtes (35°S) où la valeur maximale de l'incrément peut atteindre respectivement $1.5°C$ et $3°C$. D'autre part, la correction introduite par le système à ce niveau reste moins importante que celle apportée dans la thermocline, ce qui est très correct vu que l'écart entre les données MERSEA assimilées et l'ébauche est très faible généralement en dessous de la thermocline.
De plus, nous remarquons que l'analyse a extrait toute l'information contenue dans MERSEA. En effet, l'écart MERSEA-analyse (figure 4.5(b)) après l'assimilation est très faible, ne dépasse pas $0.5°C$. Ceci s'explique par le fait que dans cette zone en profondeur les phénomènes de petites échelles sont très rares et par conséquent le filtrage par le système est quasiment absent (excepté près des côtes).



(a) L'incrément δT à 360m en °C.



(b)$T^{Hr} - \mathbf{H}(T_a)$ à 360m en °C.

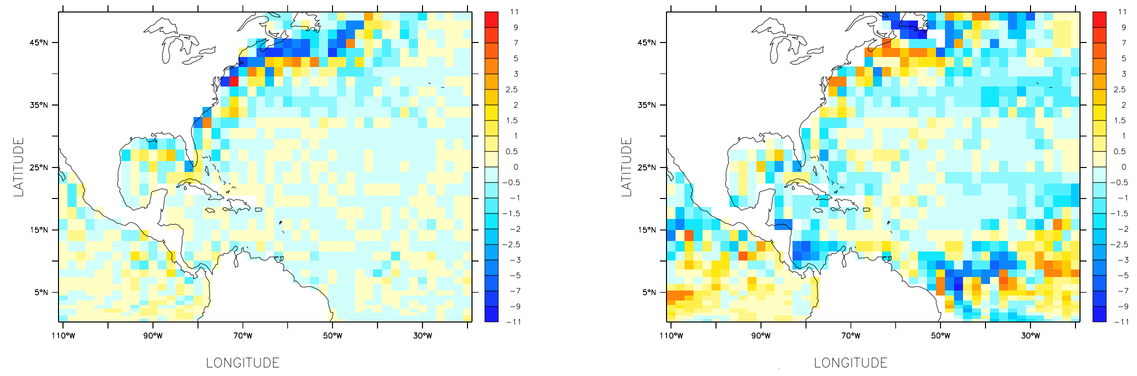
FIG. 4.5 – Distribution spatiale de l'incrément et de MERSEA-analyse sous la thermocline du pacifique Est.

4.4 Assimilation 3D-VAR de MERSEA dans le Gulf Stream

Dans le but de mieux vérifier si le système d'assimilation variationnelle 3D-VAR corrige la grande structure thermique de l'océan tout en supprimant les petites échelles, nous allons discuter les résultats de l'expérience EXP2 réalisée sur le domaine du Gulf Stream où l'amplitude des phénomènes des petites échelles est beaucoup plus importante.

4.4.1 Discussion de la correction des grandes structures

Les figures 4.6(a) et 4.6(b) illustrent respectivement l'incrément dans la couche de surface ($\sim$5m) et au niveau de la thermocline ($\sim$100m) entre ($0°$, $50°N$) et ($20°W$, $110°W$). Dans ces deux figures, les fortes valeurs de l'incrément sont cohérentes avec la structure du Gulf Stream, ce qui traduit le rôle positif joué par l'assimilation 3D-VAR dans l'extraction de l'information de MERSEA vers l'analyse. Cet impact positif se présente sous la forme d'une importante correction introduite sur l'ébauche pour faire apparaîte l'important front thermique du Gulf Stream présent dans MERSEA. Sur le reste du domaine à 3m (figure 4.6(a)), l'incrément montre des valeurs inférieures à $2°C$. Au niveau 100m (figure 4.6(b)), on aperçoit une correction beaucoup plus importante entre ($0°$, $15°N$) et ($20°W$, $70°W$), ceci est associé à la présence des forts tourbillons (Rétroflexion du brésil) à cet endroit dans MERSEA et qui ne sont pas représentés de façon similaire dans ORCA2 (résolution).



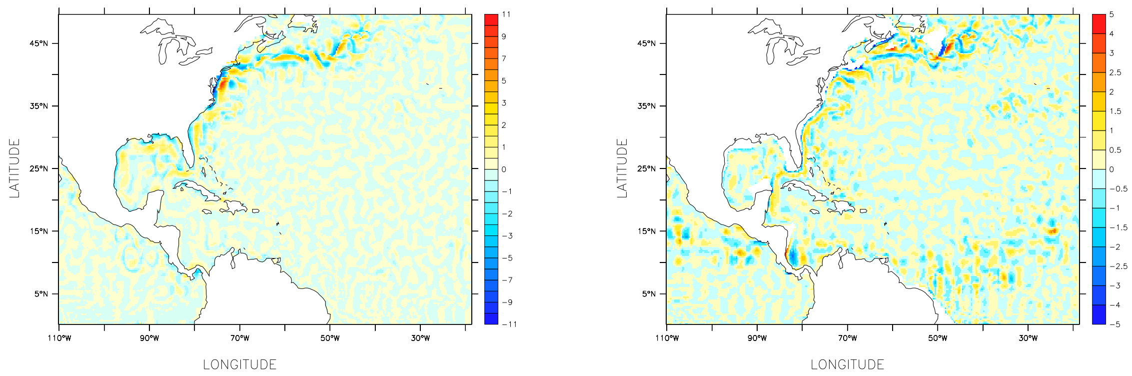
(a) L'incrément δT à 5m en °C.

(b) L'incrément δT à 100m en °C.

FIG. 4.6 – Distribution spatiale de l'incrément dans le domaine du Gulf Stream (EXP2).

4.4.2 Discussion du filtrage des petites échelles

Nous avons montré que le système d'assimilation 3D-VAR des données MERSEA dans ORCA2 est capable d'extraire la grande structure de la dynamique du Gulf Stream. Nous allons maintenant regarder la capacité de ce système à filtrer les forts signaux mésoéchelle (tourbillons) présents dans cette zone. Pour ce faire, nous avons calculé l'écart MERSEA-analyse qui représente l'information que le système a filtré et qui traduit les petites échelles.
Les figures 4.7(a) et 4.7(b) montrent respectivement l'écart $T^{Hr} - \mathbf{H}(T_a)$ dans le domaine du Gulf Stream à 3m et à 100m. Nous constatons que cet écart est généralement faible sur tout le domaine sauf dans la zone où la dynamique de mésoéchelle est importante. Ces valeurs significatives de l'écart MERSEA-analyse restreintes généralement au Gulf Stream mettent en évidence que le système d'assimilation 3D-VAR a bien filtré la signature des phénomènes des petites échelles de l'analyse. Dans la zone (($0°$, $50°N$),($20°W$, $110°W$)), on remarque aussi des valeurs significatives de $T^{Hr} - \mathbf{H}(T_a)$ (figure 4.7(b)) associées à la présence des tourbillons dans cette zone et probablement au fait que la résolution verticale de ORCA2 à ce niveau est plus grande que celle de MERSEA.



(a) $T^{Hr} - \mathbf{H}(T_a)$ à 5m en °C.

(b) $T^{Hr} - \mathbf{H}(T_a)$ à 100m en °C.

FIG. 4.7 – Distribution spatiale de l'écart MERSEA-analyse dans le domaine du Gulf Stream (EXP2).

4.5 Conclusion

Les trois expériences discutées dans ce chapitre ont permis de mettre en évidence que l'assimilation variationnelle 3D-VAR des données MERSEA a un impact positif sur l'état initial du modèle basse résolution ORCA2. Les corrections introduites sur l'ébauche en termes d'incrément sont convaincantes et le lissage du champs de température analysé est notable.

L'analyse de l'incrément dans trois couches de l'océan du Pacifique Est a montré que le système d'assimilation a extrait plus d'information de MERSEA dans les zones caractérisées par une erreur de représentativité importante de ORCA2 en particulier au niveau de la thermocline. Sans oublier les ajustements introduits sur l'ébauche dans la couche de surface et en dessous de la thermocline pour la ramener vers MERSEA.

L'étude du comportement du système dans la zone de forte composante mésoéchelle (Gulf Stream) a permis de monter, qu'en plus de la correction grande échelle apportée par les données MERSEA, le système d'assimilation a aussi filtré les petites échelles de l'analyse basse résolution.

En réponse à la question posée au début de ce chapitre, l'assimilation des données MERSEA a permis de construire un état initial du modèle ORCA2 cohérent avec la grande échelle de MERSEA tout en supprimant les petites échelles.

Chapitre 5

Tests de sensibilité

Après avoir montré les capacités de l'assimilation 3D-VAR des données MERSEA à produire un état de l'océan à basse résolution, des tests de sensibilité à certains choix ont été réalisées sur des domaines limités. Dans ce chapitre nous allons présenter cinq expériences de sensibilité basées sur la analyse MERSEA du premier février 1992. Une première description de ces expériences est résumée dans le tableau 5.1.

Nom d'expérience	**Description**
EXPTEST1	Consiste à tester la sensibilité du système d'assimilation au nombre des itérations internes du 3D-VAR.
EXPTEST2	Consiste à tester la sensibilité de l'analyse T_a à l'échantillonnage des données MERSEA.
EXPTEST3	consiste à tester la sensibilité du système d'assimilation à l'ébauche.
EXPTEST4	consiste à ajuster le poids des points MERSEA dans le système d'assimilation en fonction de l'erreur de représentativité.
EXPTEST5	consiste à tester la sensibilité du système d'assimilation à la limitation du domaine.

TAB. 5.1 – Expériences de sensibilité de l'assimilation 3D-VAR des données MERSEA

5.1 Sensibilité au nombre des itérations (EXPTEST1)

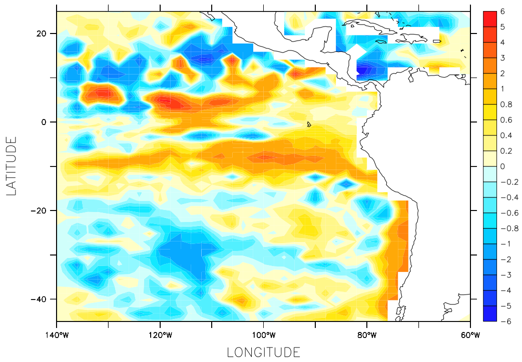
5.1.1 Description

Dans le but de tester la sensibilité de notre système d'assimilation 3D-VAR à la convergence lors de la minimisation de la fonction coût, trois simulations avec des nombres d'itérations différents(20, 40 et 60 itérations) ont été mises en oeuvre sur le domaine du pacifique Est. En fait, regarder uniquement le gradient de la fonction coût (Chapitre 4) ne suffirait pas pour déterminer le nombre d'itérations optimal. L'idée est de construire l'analyse pour ces trois simulations, puis regarder l'information apportée par le système d'une simulation à l'autre suivant le nombre des itérations. Dans cette expérience, nous avons calculé les écarts : T_a(20 itérations)$-T_b$, T_a(40 itérations)$-T_a$(20 itérations) et T_a(60 itérations)$-T_a$(40 itérations) qui nous permettent de visualiser l'information ajoutée à l'analyse après 20 itérations.

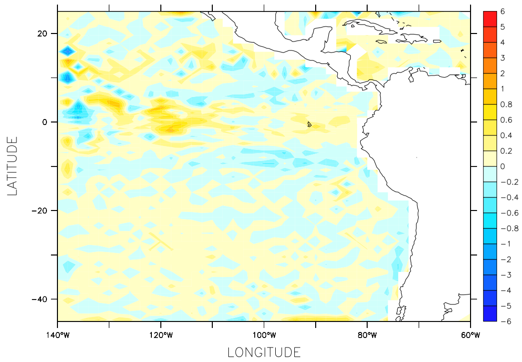
5.1.2 Résultats

Dans notre analyse des résultats, nous nous sommes intéressés uniquement à la température au niveau de la thermocline ($\sim$100m) pour les trois simulations(20, 40 et 60 itérations). La figure 5.1(a) illustre l'écart T_a(20 itérations)$-T_b$ au niveau de la thermocline du pacifique Est, on constate que la correction apportée à l'ébauche par le système d'assimilation après 20 itérations prend des valeurs importantes avec un maximum de 7°C. Ceci montre que le système d'assimilation est capable d'extraire un maximum d'information de MERSEA après très peu d'itérations. En ajoutant 20 itérations (figure 5.1(b)), on remarque une amélioration de l'analyse ne dépasse pas 2°C restreinte généralement à la zone prés de

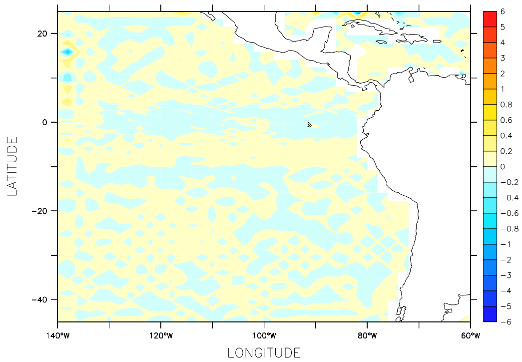
l'équateur.
Sur la figure 5.1(c), nous avons représenté l'écart entre l'analyse à 60 itérations et à 40 itérations. Les valeurs de ces différences sont très petites (inférieurs à 0.4°C) et montrent que l'analyse est très proche de l'état optimal. Par suite, 40 itérations apparaît très satisfaisantes pour extraire un maximum d'information de MERSEA et obtenir une bonne analyse de ORCA2 à basse résolution.



(a) T_a(20 iterations)-T_b en °C.



(b)T_a(40 iterations)-T_a(20 iterations) en °C.



(c)T_a(60 iterations)-T_a(40 iterations) en °C.

FIG. 5.1 – Distribution spatiale de l'information apportée par le système d'assimilation après chaque 20 itérations dans le domaine du pacifique Est à 100m.

5.2 Sensibilité à l'échantillonnage (EXPTEST2)

5.2.1 Description

Cette expérience consiste à investiguer la sensibilité du système d'assimilation variationnelle 3D-VAR à l'échantillonnage des données MERSEA. En fait, il apparaît utile d'échantillonner les données MERSEA vues la taille du système et les problèmes de mémoire rencontrés (chapitre 4). Ceci revient à échantillonner la mésoéchelle. L'idée est de faire trois simulations avec trois pas d'échantillonnage différents, et de comparer les analyses résultantes de l'assimilation 3D-VAR avec l'analyse produite lors de l'expérience EXP2 où on utilise toutes les données MERSEA (chapitre 4). Les trois simulations sont réalisées sur le domaine du Gulf Stream, leurs pas d'échantillonnage sont résumés dans le tableau 5.2.

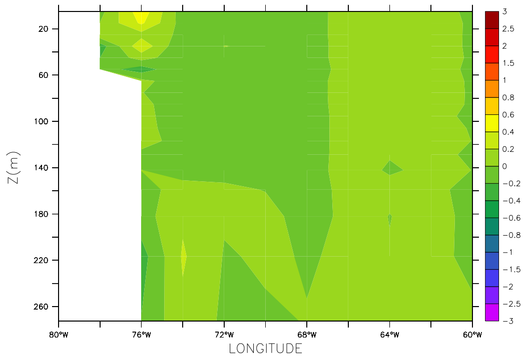
Simulations	Pas d'échantillonnage
EXPTEST2.1	2 suivant la latitude et la longitude (soit 1/4 des données MERSEA)
EXPTEST2.2	4 suivant la latitude et la longitude (soit 1/16 des données MERSEA)
EXPTEST2.3	8 suivant la latitude et la longitude (soit 1/64 des données MERSEA)

TAB. 5.2 – Description des trois simulations réalisées dans l'expérience EXPTEST2

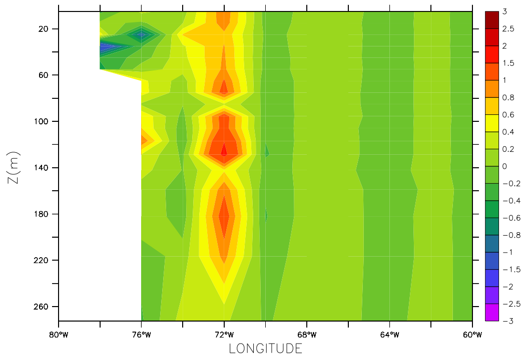
5.2.2 Résultats

Nous avons représenté sur la figure 5.2(a) une coupe à 35°N de l'écart entre l'analyse obtenue lors de EXP2 et celui de EXPTEST2.1 (tableau 5.2), on remarque que cet écart est généralement inférieur à 0.2°C sauf au niveau de la couche de surface (76°W) où il peut atteindre une valeur de 0.4°C à 0.6°C, ce qui justifie que l'information extraite par le système en échantillonnant par pas de 2 est pratiquement la même que celle extraite lors de EXP2, où toutes les données MERSEA ont été intégrées dans le système d'assimilation. Cette différence faible entre EXP2 et EXPTEST2.1 met en évidence que la corrélation entre deux points MERSEA contigus est forte.

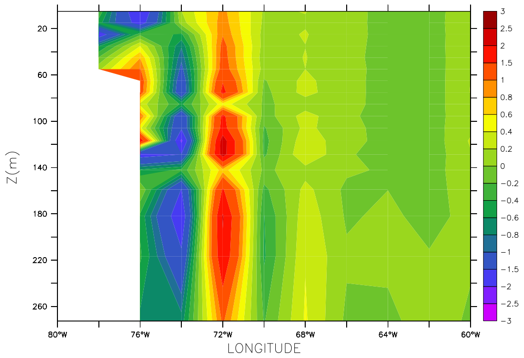
En augmentant le pas d'échantillonnage à 4 (figure 5.2(b)), on constate que l'écart $T_a(EXP2) - T_a$



(a) T_a(EXP2)-T_a(EXPTEST2.1) en °C.



(b) T_a(EXP2)-T_a(EXPTEST2.2) en °C.



(c) T_a(EXP2)-T_a(EXPTEST2.3).

FIG. 5.2 – comparaison des analyses de température des trois simulations (EXPTEST2.1, EXPTEST2.2 et EXPTEST2.3) à l'analyse obtenue dans l'expérience EXP2.

(EXPTEST2.2) devient significatif dans la zone de forte mésoéchelle avec une valeur maximale de 2°C, ce qui montre que le signal contenu dans l'analyse T_a de EXPTEST2.2 commence à perdre plus ou moins sa structure entre 70°W et 76°W par rapport à EXP2. En effet, dans EXPTEST2.2, la distance entre deux points MERSEA assimilés dépasse légèrement la taille des structures du Gulf Stream simulées par EXP2.

Ceci est amplifie par EXPTEST2.3 (figure 5.2(c)), où nous avons assimilé les données MERSEA avec un pas équivalent à la résolution du modèle ORCA2 ($2°$). La figure 5.2(c) montre que l'erreur par rapport à EXP2 devient très significative au milieu du Gulf Stream. Ceci met en évidence que avec ce pas d'échantillonnage (un point sur huit), le système converge vers une structure de grande échelle différente de celle de EXP2 et donc incorrecte. D'autre part, à l'extérieur de ces zones de forte mésoéchelle, l'effet d'échantillonnage reste largement négligeable.

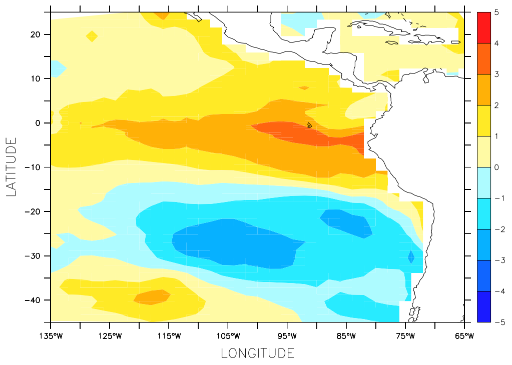
5.3 Sensibilité à l'ébauche (EXPTEST3)

5.3.1 Description

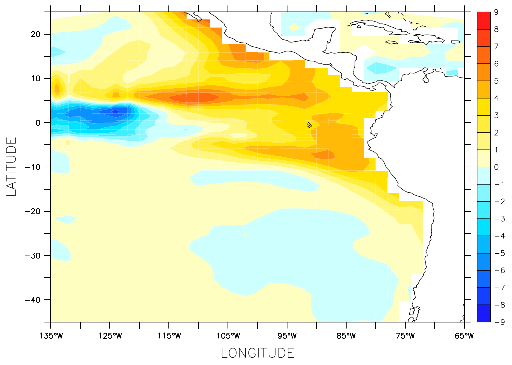
Cette expérience a pour but d'investiguer l'effet de l'ébauche dans l'assimilation Variationnelle 3D-VAR des données MERSEA. En fait, l'ébauche intervient au démarrage de l'algorithme de minimisation et définit la direction dans laquelle la minimisation est effectuée. L'idée consiste à assimiler les données MERSEA du 01/02/1992 en utilisant une ébauche du 01/02/1998 qui contient une signature extrême du phénomène *El niño*. Puis regarder, si le système d'assimilation arrive à extraire suffisamment d'information de MERSEA pour corriger cette grande erreur introduite par l'intermédiaire de l'ébauche au démarrage de l'algorithme de minimisation. Et afin de comparer avec l'expérience EXP1 où on utilise la bonne ébauche du 01/02/1992, EXPTEST3 a été réalisée sur le domaine du pacifique Est.

5.3.2 Résultats

Avant d'entamer l'analyse des résultats, nous avons représenté sur les figures 5.3(a) et 5.3(b) la différence de l'ébauche du 01/02/1998 par rapport à celle du 01/02/1992 à 5m et à 100m. La signature du phénomène *El niño* apparaît nettement au niveau de la couche de surface comme au niveau de la thermocline sous forme d'une anomalie chaude à l'Est et une anomalie froide à l'ouest.



(a) T_b(01/02/1998)-T_b(01/02/1992) à 5m.

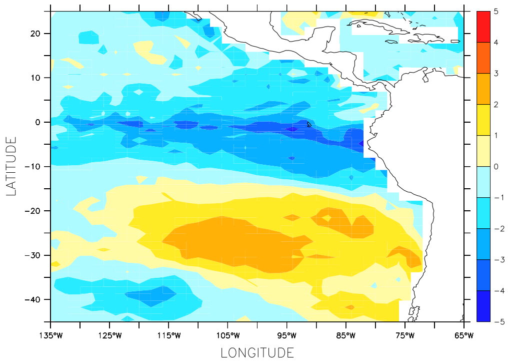


(b)T_b(01/02/1998)-T_b(01/02/1992) à 100m.

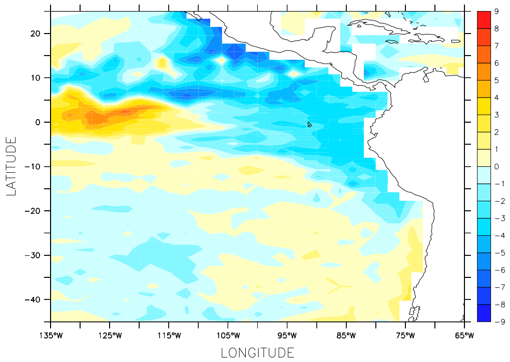
FIG. 5.3 – Anomalie de l'ébauche du 01/02/1998 par rapport à l'ébauche du 01/02/1992 en °C.

Nous avons en suite regardé l'incrément résultant d'EXPTEST3(figures 5.4(a) et 5.4(b)), nous constatons que le système d'assimilation a réussi à contraindre l'erreur introduite par l'intermédiaire de l'ébauche du 01/02/1998 en refroidissant les zones chaudes et en réchauffant les zones froides de façon à atténuer complètement l'effet d'*El niño*.

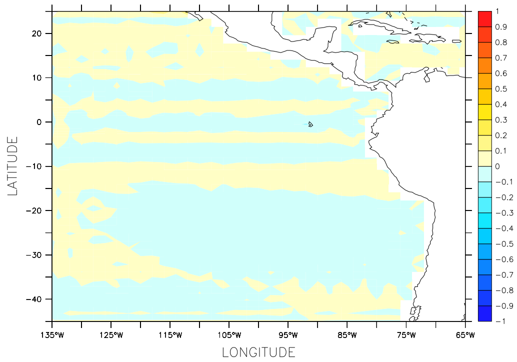
Pour voir maintenant la sensibilité de l'analyse T_a du modèle basse résolution ORCA2 à cette erreur, nous avons calculé l'écart de l'analyse construite lors de EXPTEST3 par rapport à celle de EXP1(figures 5.4(c) et 5.4(d)). L'analyse montre une sensibilité très négligeable au niveau de la couche de surface où son écart par rapport à EXP1 est inférieur à $0.1°$C (figure 5.4(c)) sur tout le domaine du pacifique Est. Au niveau de la thermocline, on constate un écart relativement significatif dans certaines zones, avec une valeur maximale de $1°$C. En général, ce résultat reste très satisfaisant vue que malgré l'anomalie extrême prise dans l'ébauche, le système d'assimilation a efficacement réussi à la contraindre, à comparer à $0.4°$C dans EXPTEST1.



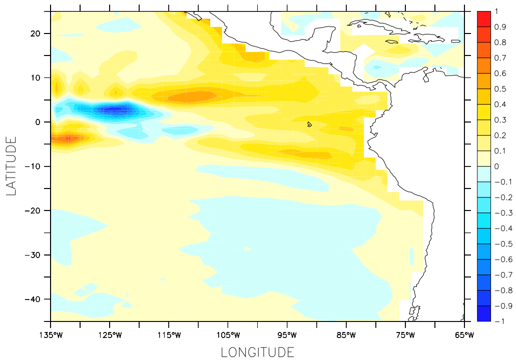
(a) L'incrément δT à 5m dans EXPTEST3.



(b)L'incrément δT à 100m dans EXPTEST3.



(c) T_a(EXPTEST3)-T_a(EXP1) à 5m.



(d)T_a(EXPTEST3)-T_a(EXP1) à 100m.

FIG. 5.4 – Comparaison entre les expériences EXPTEST3 et EXP2.

5.4 Ajustement des poids des points MERSEA dans l'assimilation 3D-VAR(EXPTEST4)

5.4.1 Description

Dans le chapitre 4, nous avons vu que l'erreur de représentativité du modèle ORCA2 devient beaucoup plus importante dans les zones de forte composante mésoéchelle, et en particulier dans les courants de bords Ouest. Le but de cette expérience est de diminuer le poids des données MERSEA dans le système d'assimilation à l'intérieur de ces zones, et regarder l'effet sur l'amplitude de la correction et sur l'efficacité du système à filtrer les petites échelles. La technique consiste à multiplier arbitrairement les poids MERSEA par une fonction décroissante de l'erreur de représentativité. Dans notre étude, on définit cette fonction par :

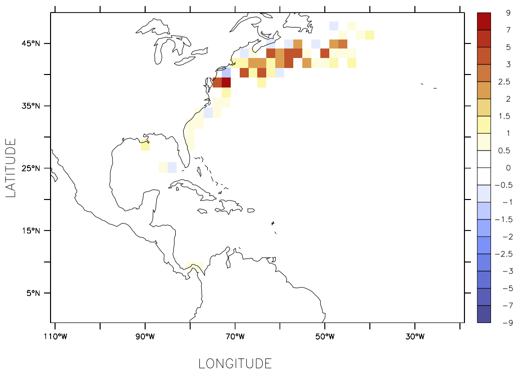
$$F(< rr^T >_{ii}) = \frac{1}{1+\frac{<rr^T>_{ii}}{<rr^T>_m}} \tag{5.1}$$

Avec $< rr^T >_{ii}$ est la variance d'erreur de représentativité (équation (3.7)) dans chaque point de grille MERSEA et $< rr^T >_m$ est la moyenne des variances des erreurs de représentativité sur toute la grille MERSEA.

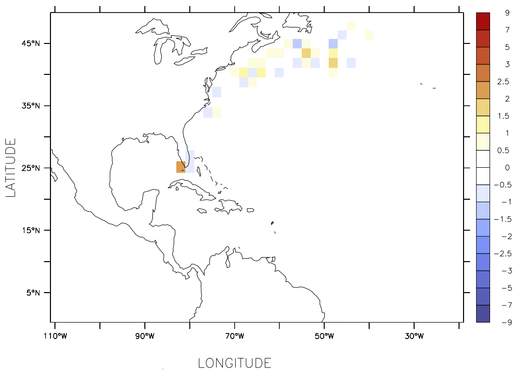
Cette expérience a été réalisée sur le domaine du Gulf Stream où une comparaison avec le résultat de EXP2 (chapitre 4) a été effectuée.

5.4.2 Résultats

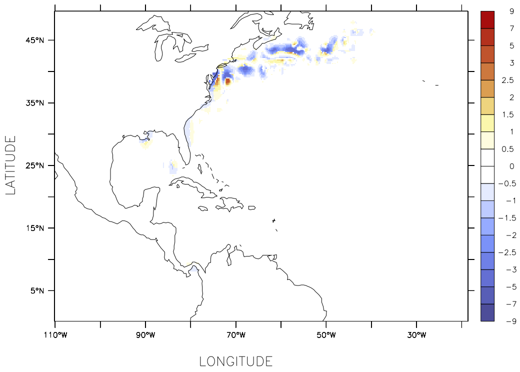
Pour montrer l'impact de cette technique de diminution des poids sur le système d'assimilation, nous allons étudier l'écart $d_1 =\mid \delta T \mid$(EXP2) - $\mid \delta T \mid$(EXPTEST4). Cet écart montre la différence en valeur absolue entre l'incrément dans EXP2 et l'incrément dans EXPTEST4 : plus d_1 est grand et positif localement plus l'analyse reste plus proche de l'ébauche dans EXPTEST4 que dans EXP2, donc plus de filtrage des petites échelles dans EXPTEST4 que dans EXP2.
D'autre part, nous avons eu recours à l'écart de la distance de l'analyse à MERSEA dans EXP2 par rapport à celle dans EXPTEST4 ($d_2 =\mid T^{Hr} - \mathbf{H}(T_a) \mid$(EXP2) - $\mid T^{Hr} - \mathbf{H}(T_a) \mid$(EXPTEST4)) : plus d_2 est grand et négatif localement plus l'analyse est plus loin de MERSEA dans EXPTEST4 que dans EXP2, donc plus de filtrage des petites échelles dans EXPTEST4 que dans EXP2. Ces diagnostics nous permettent de vérifier l'efficacité de cette méthode à mieux supprimer de l'analyse toute information de petite échelle contenue dans les données MERSEA.



(a) $d_1 =\mid \delta T \mid$(EXP2) - $\mid \delta T \mid$(EXPTEST4) à 5m .



(b) $d_1 =\mid \delta T \mid$(EXP2) - $\mid \delta T \mid$(EXPTEST4) à 260m.



(c) $d_2 =\mid T^{Hr} - \mathbf{H}(T_a) \mid$(EXP2) -
$\mid T^{Hr} - \mathbf{H}(T_a) \mid$(EXPTEST4) à 5m.

FIG. 5.5 – Comparaison entre les expériences EXPTEST4 et EXP2 .

Nous avons représenté sur la figure 5.5(a), l'écart d_1 dans la couche de surface. On constate que cet écart prend des valeurs nettement significatives et très locales. Si on compare sa localisation géographique avec celle de l'erreur de représentativité présentée dans le chapitre 3, les fortes valeurs de cette erreur apparaîssent au même endroit que celles de d_1. Ceci montre l'impact positif de la technique de diminution des poids, en effet en multipliant les poids des points MERSEA par la fonction $F(< rr^T >_{ii})$

dans l'expérience EXPTEST4, la distance de l'analyse par rapport à l'ébauche devient plus petite localement, c'est à dire dans EXPTEST4 le système arrive à mieux filtrer l'information locale contenue dans MERSEA que dans l'expérience EXP2.
Cette idée se confirme sur la figure 5.5(c) qui représente l'écart d_2 de la distance de l'analyse à MERSEA dans EXP2 par rapport à celle dans EXPTEST4. On constate que l'analyse est beaucoup plus proche localement de MERSEA dans EXP2 que dans EXPTEST4, ce qui reste très convaincant dans l'efficacité de la technique de diminution des poids à mieux filtrer la signature très locale des petites échelles. D'autre part, l'effet introduit par la diminution des poids en profondeur (>100m) reste moins important(figure 5.5(b)), vue que la structure thermique de l'océan devient beaucoup plus organisée.

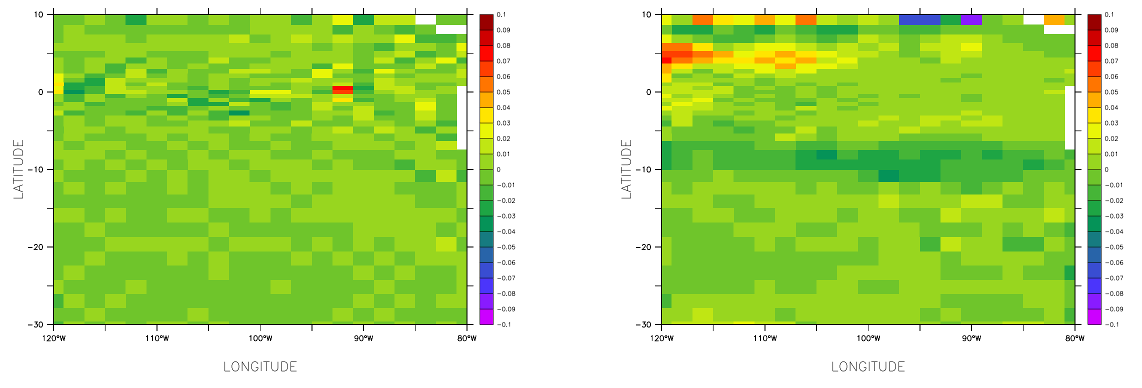
5.5 Sensibilité à la limitation du domaine (EXPTEST5)

5.5.1 Description

Nous avons vu précédemment que la grande taille des données MERSEA qui dépasse les moyens de calcul disponible au CERFACS, nous a amené à effectuer des expériences sur des domaines limités. Le but de EXPTEST4 est de tester la sensibilité du système d'assimilation 3D-VAR à cette limitation du domaine. La méthode consiste à effectuer deux simulations, une première sur un domaine large et une deuxième sur un domaine plus petit à l'intérieur du premier. L'idée est d'évaluer l'écart entre les deux analyses résultantes sur le domaine le plus petit, en fait, l'ordre de grandeur de cet écart nous donne une information sur l'erreur introduite dans l'analyse par l'effet de la limitation du domaine.
Dans cette expérience, nous avons effectué une simulation sur un domaine du pacifique Est ((80°W, 120°W), (10°N, 30°S)) à l'intérieur de celui utilisé lors de l'expérience EXP1(chapitre 4), afin de comparer avec cette dernière.

5.5.2 Résultats

La figure 5.6(a) illustre l'écart entre l'analyse obtenue dans l'expérience EXP1 et celle obtenue dans EXPTEST4 à 5m, on note que l'erreur entre ces deux analyses prend des valeurs très faibles, ne dépassant pas 0.07°C en valeur absolue. Par conséquent, l'effet de la limitation du domaine sur le résultat de l'assimilation variationnelle 3D-VAR des données MERSEA reste très négligeable, et en grande partie dû uniquement aux effet numériques du système. Ceci se confirme aussi au niveau de la thermocline (figure 5.6(b)) où le maximum de cette erreur est inférieur à 0.08°C sur tout le domaine ((80°W, 120°W), (10°N, 30°S)). Cette étude nous a montré que la sensibilté à la limitation du domaine est trés faible, ce



(a) T_a(EXP1)-T_a(EXPTEST5) à 5m en °C.　(b))T_a(EXP1)-T_a(EXPTEST5) à 100m en °C.

FIG. 5.6 – Comparaison entre l'analyse Obtenue dans EXP1 et celle obenue dans EXPTEST5.

qui justifié la fiabilité de l'expérience EXP3 (annexe 2) qui consiste à construire une analyse globale à partir des analyses sur plusieurs domaines limités.

5.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la sensibilité du système d'assimilation variationnelle 3D-VAR à cinq paramètres. Nous conclurons ci-dessous sur les principaux résultats obtenus pour chaque expérience :

- ***Sensibilité au nombre d'itérations :*** L'analyse des résultats de cette expérience a montré l'efficacité du processus de minimisation de la fonction coût à converger vers un bon état thermique de l'océan à basse résolution. La comparaison des analyses construites avec différents nombres d'itérations a permet de fixer 40 itérations comme nombre optimal pour extraire un maximum d'information des données MERSEA.

- ***Sensibilité à l'échantillonnage :*** Dans cette expérience, le but était d'investiguer l'effet que pourrait avoir l'échantillonnage des données MERSEA sur le résultat du système d'assimilation dans la zone du Golf Stream. L'étude des résultats a montré que l'analyse construite avec un pas d'échantillonnage égal à deux (soit 1/4 de données MERSEA) reste en bon accord avec celle construite en utilisant toutes les données MERSEA, Ce qui justifié la forte corrélation entre deux points MERSEA contigus. D'autre part, en augmentant le pas d'échantillonnage, nous avons constaté que l'erreur introduite par l'échantillonnage devient nettement significative dés que le pas s'approche de la résolution du modèle ORCA2, soit avec un pas égal à huit (1/64 de données MERSEA).

- ***Sensibilité à l'ébauche :*** Dans cette expérience, une anomalie extrême du phénomène $El\ niño$ du 01/02/1998 a été introduite dans le système d'assimilation par l'intermédiaire de l'ébauche. L'étude des résultats a permis de mettre en évidence que l'assimilation des données MERSEA du 01/02/1992 été capable de contraindre efficacement cette anomalie, pour converger vers un état de l'océan à basse résolution très proche de celle obtenue en utilisant la bonne ébauche ($01/02/1992$). La précision par rapport à EXP1 été inférieur à $0.2°$C dans la couche de surface et inférieur à $1°$C au niveau de la thermocline.

- ***Ajustement des poids des données MERSEA dans le système d'assimilation :*** Cette expérience a été réalisée dans le but de regarder l'impact de diminution des poids des données MERSEA sur l'analyse T_a dans la zone du Gulf Stream. En étudiant la distance de l'analyse à l'ébauche et à MERSEA dans cette expérience où les poids des données MERSEA ont été ajusté suivant l'erreur de représentativité, nous avons pu montrer que le fait de diminuer les poids des données MERSEA dans les zones de forte composante mésoéchelle, permet de rendre le système plus efficace dans le filtrage de la signature thermique des petites échelles.

- ***Sensibilité à la limitation du domaine :*** Le but de cette expérience était de voir l'effet de la limitation du domaine sur le système d'assimilation. Le résultat est très convaincant et a montré la non sensibilité de l'analyse résultante de l'assimilation des données MERSEA à cet effet. L'erreur dans l'analyse est généralement inférieur à $0.08°$C, ce qui peut être dû uniquement à des effets numériques.

Chapitre 6

Application de l'opérateur d'observation adjoint

Dans ce chapitre, nous allons utiliser l'opérateur d'observation adjoint pour effectuer une interpolation des données de haute résolution MERSEA sur la grille du modèle basse résolution ORCA2. Ceci permet au système d'assimilation 3D-VAR de rester indépendant de l'ébauche en démarrant l'algorithme de minimisation "Congrad" à partir d'une simple interpolation des données de haute résolution MERSEA.
Le but était d'adapter la version adjointe $\boldsymbol{H}^T$ de l'opérateur d'observation $\boldsymbol{H}$ (chapitre 2) à des données de haute résolution MERSEA issues d'une grille ORCA0.25 non régulière avec une bathymétrie et des lignes des côtes différentes de celle du modèle ORCA2.

6.1 Technique de l'opérateur $\boldsymbol{H}^T$

Nous avons décrit dans le chapitre 2 la technique d'interpolation polynomiale utilisée dans l'opérateur d'observation $\boldsymbol{H}$. La version adjointe $\boldsymbol{H}^T$ de cet opérateur est basée sur le même type d'interpolation (Polynomial), mais en effectuant le passage inverse c'est à dire de l'espace de haute résolution MERSEA vers l'espace de basse résolution ORCA2.
Supposons qu'on cherche la valeur dans un point de grille ORCA2 (x, y) à partir de quatre points MERSEA (x_1,y_1), (x_2,y_2), (x_3,y_3), et (x_4,y_4), cette valeur s'écrit :

$$\tilde{\boldsymbol{x}}^{Lr}(x,y) = \sum_{i=1}^{4} \boldsymbol{x}^{Hr}(x_i,y_i)P^{(i)}(x,y) \tag{6.1}$$

Avec $\boldsymbol{x}^{Hr}(x_i, y_i)$ est la valeur du point MERSEA (x_i,y_i) et $P^{(i)}(x,y)$ est le poids associé, calculé en utilisant la même technique que dans le chapitre 2.
Dans la pratique, le développement du code informatique de l'opérateur d'observation adjoint $\boldsymbol{H}^T$ à partir du code de l'opérateur $\boldsymbol{H}$, utilise la technique générale d'adjoint basée sur la transposition de chaque ligne de code.

6.2 Description

Dans notre étude, nous avons utilisé $\boldsymbol{H}^T$ et les deux matrices diagonales $\boldsymbol{W}_H$ et $\boldsymbol{W}_L$ développées dans le chapitre 4, pour construire par interpolation un état de l'océan à basse résolution. La formule utilisée est la suivante :

$$\boldsymbol{x_g}^{Lr} = \boldsymbol{W_L}^{-1}\boldsymbol{H}^T\boldsymbol{W}_H\boldsymbol{x}^{Hr} \tag{6.2}$$

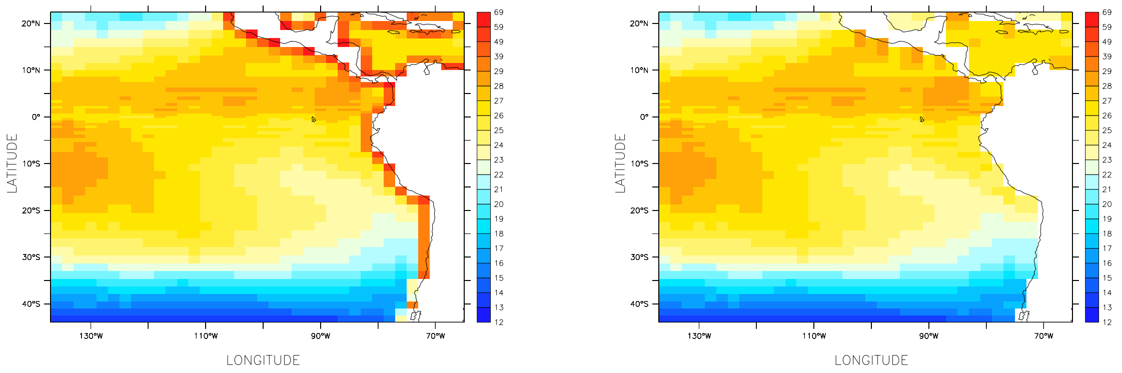
Rappelons que $\boldsymbol{W}_H$ est la matrice diagonale contenant les éléments de volume de la grille ORCA0.25 et $\boldsymbol{W}_L$ est la matrice diagonale contenant les éléments de volume de la grille ORCA2. De ce fait, la formule (6.2) revient à une multiplication de chaque point i MERSEA $\boldsymbol{x_i}^{Hr}$ par son poids $(\boldsymbol{W}_H)_{ii}$, transformation

par $\boldsymbol{H}^T$ de tout le champs vers l'espace de basse résolution, puis normalisation de chaque point j obtenu à basse résolution par son poids $(\boldsymbol{W}_L)_{jj}$. Et enfin, on obtient le champs complet interpolé sur la grille ORCA2.
Cet état à basse résolution peut servir pour le démarrage de l'algorithme de minimisation, ainsi l'équation (4.11) devient :

$$J(\boldsymbol{v}^{Lr}) = \frac{1}{2}(\boldsymbol{HUv}^{Lr} - \boldsymbol{x}^{Hr} + \boldsymbol{Hx_g}^{Lr})^T \mathbf{W}_H (\boldsymbol{HUv}^{Lr} - \boldsymbol{x}^{Hr} + \boldsymbol{Hx_g}^{Lr}) \tag{6.3}$$

6.3 Discussion des résultats

Dans le but de tester la technique de l'opérateur d'observation adjoint décrite précédemment, nous avons procédé à une expérience sur le domaine du pacifique Est. Cette expérience consiste à construire un état de l'océan à basse résolution sur la grille ORCA2, en interpolant toutes les données MERSEA sur le domaine du Pacifique Est.
La figure (6.1(a)) illustre le champs de température obtenu à basse résolution après interpolation des données de haute résolution MERSEA. On constate des valeurs aberrantes restreintes généralement à des pixels près des côtes. En effet, les lignes de côtes dans la grille MERSEA (grille ORCA0.25) sont différentes de celles dans la grille ORCA2, c'est à dire très près des côtes, il peut y avoir des points d'océan dans MERSEA qui sont considérés comme des points de terre dans ORCA2, l'inverse est aussi possible. Pour résoudre ce problème, nous avons procédé à une simple extrapolation des pixels sur les côtes. La



(a) Avant extrapolation sur les côtes. (b) Après extrapolation sur les côtes.

FIG. 6.1 – Champs de température MERSEA de haute résolution en °C transporté sur la grille de basse résolution ORCA2 ($\boldsymbol{x_g}^{Lr}$).

méthode consiste à remplacer chaque pixel aberrant par le pixel le plus proche. Le champs de température obtenu après cette correction est représenté sur la figure (6.1(b)). On remarque, un effet positif de l'extrapolation qui a permis de rendre le champs de température beaucoup plus réaliste pour être utilisé par la suite à la place de l'ébauche dans le démarrage de l'algorithme de minimisation.

6.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu que l'utilisation de l'opérateur d'observation adjoint et les matrices des facteurs d'échelle de ORCA2 et MERSEA (ORCA0.25) nous a permis de construire par interpolation un état de l'océan à basse résolution pour le modèle ORCA2. L'extrapolation a été efficace pour corriger les pixels aberrants sur les côtes. Cet état à basse résolution peut être efficace pour remplacer l'ébauche dans le démarrage de l'algorithme de minimisation, et par la suite de construire un système d'assimilation indépendant de l'ébauche. Cette solution est tout à fait envisageable vue la faible sensibilité à l'ébauche constatée dans le chapitre 5.

Conclusion et perspectives

Dans le cadre de cette étude, nous avons implémenté la technique d'assimilation variationnelle 3D-VAR de données de température de haute résolution MERSEA-1/4° dans le modèle de circulation générale océanique ORCA2, dans le but de construire un état initial de basse résolution (2°) pour les modèles couplés océan-atmosphère de prévision saisonnière. Durant ce travail, plusieurs points importants ont été étudiés. A savoir, l'erreur de représentativité du modèle basse résolution par rapport à la haute résolution, l'impact de l'assimilation de MERSEA1/4° dans différentes couches de l'océan et la sensibilité à divers paramètres de la technique d'assimilation utilisée.

Dans un premiers temps, nous avons procédé à la validation de l'opérateur d'observation et la bonne intégration des données MERSEA1/4° dans le modèle ORCA2 par l'intermédiaire d'expériences de comparaison entre la basse et la haute résolution. Ceci a permis l'étude de l'erreur de représentativité du modèle de basse résolution ORCA2 par rapport à la haute résolution MERSEA1/4° sur les premiers février de la période 1992-2001 (10 réalisations). Il en résulte que ORCA2 est généralement en accord avec MERSEA1/4° sauf dans les zones de forte composante mésoéchelle (courants de bords Ouest), où on note une erreur de représentativité accompagnée d'un biais significatif entre les deux modèles (ORCA2 et ORCA0.25). D'autre part, on note aussi un léger décalage dans le positionnement de la thermocline équatoriale par ORCA2 par rapport à MERSEA1/4°. En terme de variabilité, la comparaison entre l'écart type calculé sur les données MERSEA1/4° en chaque point de grille et l'écart type calculé sur les données ORCA2 transportées sur la grille de haute résolution a montré que MERSEA1/4° contient plus de variabilité interannuelle que ORCA2, particulièrement dans les courants de bords Ouest, les zones d'upwelling et les gyres subtropicaux.

Nous sommes ensuite passés à l'assimilation variationnelle 3D-VAR des données MERSEA1/4°. La méthode est basée sur une modélisation des matrices R et B à l'aide d'un concept purement géométrique basé sur les facteurs d'échelles. Et comme dans ce problème, on dispose de plus de données à assimiler que de variables à contrôler, le terme d'ébauche a été supprimé de la fonction coût et donc l'ébauche intervient uniquement pour le démarrage de l'algorithme de minimisation. Vu la taille importante du problème($1442 \times 1021 \times 46$), nous avons effectué des expériences sur des domaines limités.
Ainsi, deux expériences ont été réalisées, une sur le Pacifique Est et l'autre sur le domaine du Gulf Stream. Le résultat de la première expérience a montré l'impact positif de l'assimilation des données MERSEA1/4° dans différentes couches de l'océan, en mettant en évidence que le système est capable d'extraire un maximum d'information des données MERSEA1/4°. La deuxième expérience a montré la capacité du système d'assimilation variationnelle 3D-VAR à filtrer toute information de petite échelle (mésoéchelle) de l'analyse.

Dans la perspective d'étudier les performances du système d'assimilation des données MERSEA, nous avons procédé à cinq tests de sensibilité : sensibilité à l'ébauche, à l'échantillonnage, à la convergence, aux poids des données MERSEA et à la limitation du domaine. L'analyse des résultats de sensibilité à la convergence a permis de fixer 40 itérations comme nombre optimal pour extraire un maximum d'information des données MERSEA. L'erreur introduite sur l'analyse par l'effet de la limitation du domaine est d'origine numérique et elle est inférieur à 0.08°C. D'autre part, dans le test de sensibilité à l'ébauche, malgré l'utilisation d'une ébauche contenant une anomalie extrême du phénomène *El niño* du 01/02/1998, le système a réussi à converger vers un état de basse résolution quasiment égal à celui obtenu dans le cas d'utilisation de la bonne ébauche du 01/02/1992.
Dans le test de sensibilité à l'échantillonnage, l'analyse basse résolution obtenue en échantillonnant les données MERSEA par pas de deux suivant la latitude et la longitude (soit 1/4 de données MERSEA) reste en total accord avec celle construite en utilisant toutes les données MERSEA, ce qu'est justifié par

la forte corrélation entre deux points MERSEA voisins. En augmentant le pas d'échantillonnage, nous avons constaté que dans les zones de forte composante mésoéchelle, l'analyse commence à perdre une information nettement significative dès que le pas d'échantillonnage s'approche de la résolution du modèle ORCA2, soit avec un pas égal à huit (1/64 de données MERSEA). D'autre part, l'expérience de la sensibilité de l'analyse aux poids des points MERSEA a montré que le fait de diminuer ces poids en fonction de l'erreur de représentativité dans le système d'assimilation, permet de rendre le filtrage des petites échelles beaucoup plus efficace.

Dans le but de garder un système d'assimilation indépendant de l'ébauche ORCA2, nous avons utilisé l'opérateur d'observation adjoint et les matrices des facteurs d'échelle pour construire par interpolation un état de basse résolution pour le modèle ORCA2. Cet état peut servir dans le démarrage de l'algorithme de minimisation.

Les travaux présentés, durant cette étude, concernent uniquement la température de l'océan. La suite logique serait de procéder à l'assimilation d'autre variables MERSEA comme la salinité et les courants, en suivant la même méthodologie que celle appliquée ici à la température (pour le courant, le travail est plus compliqué, car la topographie/bathymétrie n'est pas la même, et le courant doit satisfaire des contraintes physique comme une divergence nulle, etc...). Mais avant, il serait intéressant d'évaluer un pas d'échantillonnage variable géographiquement des données MERSEA pour lequel la corrélation entre deux points successifs dans l'échantillonnage soit nulle. Ceci permettrait de mieux respecter l'hypothèse qui consiste à supposer que la matrice R est diagonale.

Nous pouvons aussi envisager l'étude de l'impact de ces états initiaux construits à partir des données MERSEA par méthode 3D-VAR sur la prévision saisonnière. Pour cela l'initialisation d'un modèle de prévision saisonnière (par exemple Arpège ou IFS) par ces états pourrait être très utile dans l'évaluation de l'effet introduit par l'assimilation des données MERSEA. Ceci consiste à tester l'impact de l'assimilation des données MERSEA sur la prévision saisonnière en mode forçé, en définissant des axes de recherche objectifs pour cette étude.

L'application de l'opérateur de balance pour retrouver la correction en courants et en salinité à partir de la correction introduite par les données MERSEA de température, pourrait être un axe d'approfondissement trés intéressant. Pour le faire, l'application de l'opérateur de balance $\boldsymbol{K}$ développé au CERFACS permet de retrouver les autres champs (salinité et courants), et par suite construire une réalisation complète de tous les variables.
A plus long terme, les outils développés ici peuvent être intéressents dans le cadre de la construction d'un système variationnel incrémental avec une boucle interne à basse résolution.

Table des figures

Liste des tableaux

Bibliographie

[1] **G. Madec, P. Delecluse, M. Imbard and C. Lévy**, *OPA 8.1 Ocean General Circulation Model Reference Manual.* Institut Pierre Simon Laplace, Notes du Pôle de Modélisation $N°11$, Décembre 1998.

[2] **A. Arakawa**, *Design of UCLA general circulation model. Numerical simulation of weather and climat.* Dept of Meterology, University of California, 1972. Rep. 7 116pp.

[3] **O. Leeuwenburgh**, *Validation of an EnKF system for OGCM initialisation assimilating tempreture, salinityal and surface height measurements* Royal Netherlands Meteorological Institute(KNMI), P.O. Box 201, 3730 AE, De Bilt, The Netherlands, May 2005

[4] **P. Courtier**, *Variational methods.* J. Meteorol. Soc. Japan, (75) :211-218, 1997.

[5] **Weaver, A. T., Vialard, J. and Anderson, D. L. T.**, *Three and four-dimensional variational assimilation with an ocean general circulation model of the tropical Pacific Ocean. Part 1 : formulation, internal diagnostics and consistency checks.* Mon. Wea. Rev., 131, 1360-1378, 2003.

[6] **Vialard, Weaver, A. T., Anderson, D. L. T. and P. Delecluse**, *Three and four-dimensional variational assimilation with a general circulation model of the tropical Pacific Ocean. Part 2 : physical validation.* Mon. Wea. Rev., 131, 1379-1395, 2003.

[7] **Ricci, S., Weaver, A. T., Vialard, J. and P. Rogel**, *Incorporating state-dependent temperature-salinity constraints in the background-error covariance of variational ocean data assimilation.* Mon. Wea. Rev., 133, 317-338., 2005.

[8] **Rogel, P., Weaver, A. T., Daget, N., Ricci, S. and E. Machu**, *Ensembles of global ocean analyses for seasonal climate prediction : impact of temprature assimilation.* Tellus A : Special Issue for the DEMETER project, in press, 57A, p375, 2005.

[9] **André, J. C., J-Y. Caneill, M. Déqué, P. Rogel, L. Terray, Y.M. Tourre**, *La prevision du Climat de l'Echelle Saisonnière à l'Echelle Décennale.* Comptes-Rendus Géoscience. Académie des Sciences, Elsevier Publisher, 334, 1115-1127, 2002

[10] **Weaver, A. T. and P. Courtier**, *Correlation modelling on the sphere using a generalized diffusion equation.* Q. J. R. Meteorol. Soc., 127, 1815-1842, 2001.

[11] **G. Desroziers**, *Assimilation de données.* Cours de l'ENM.

[12] **F. Bouttier**, *Assimilation de données.* Cours de Master OASC à l'université Paul Sabatier, Toulouse, Novembre 2004.

[13] **N. Daget**, *Location of observation points on a grid and Test of different interpolation schemes* Technical Report TR/CMGC/03/79, CERFACS/GLOBC, 2004

[14] **S. Durbiano**, *Vecteurs caractéristiques de modèles océaniques pour la réduction d'ordre en assimilation de données.* Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier, LMC , Grenoble , France, 2001.

[15] **S. Ricci**, *Assimilation variationnelle océanique : modélisation multivariée de la matrice de covariace d'erreur d'ébauche.* Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, CERFACS, Toulouse, France, 2004.

[16] **N. Ferry, E. Durand**, *MERSEA-1/4° 10 year control integration(forced run).* Marine EnviRonnement and Security for the Area- Itegrated Progect, Deliverable D11.3.4, version1, 2006.

[17] **E. Da Costa, J. F. Guérémy**, *Interpolation scheme/software and interpolted fields.* Marine EnviRonnement and Security for the Area- Itegrated Progect, Deliverable D11.3.4, 2006.

[18] **B. Chapnik, G. Desroziers, F. Rabier, O. Talagrand.**, *Diagnosis and tuning of observational error in quasi operational data assimilation setting.* CNRM, LMD, Q. J. R. Meteorol. Soc., 99,PP. 1-9999, 2005.

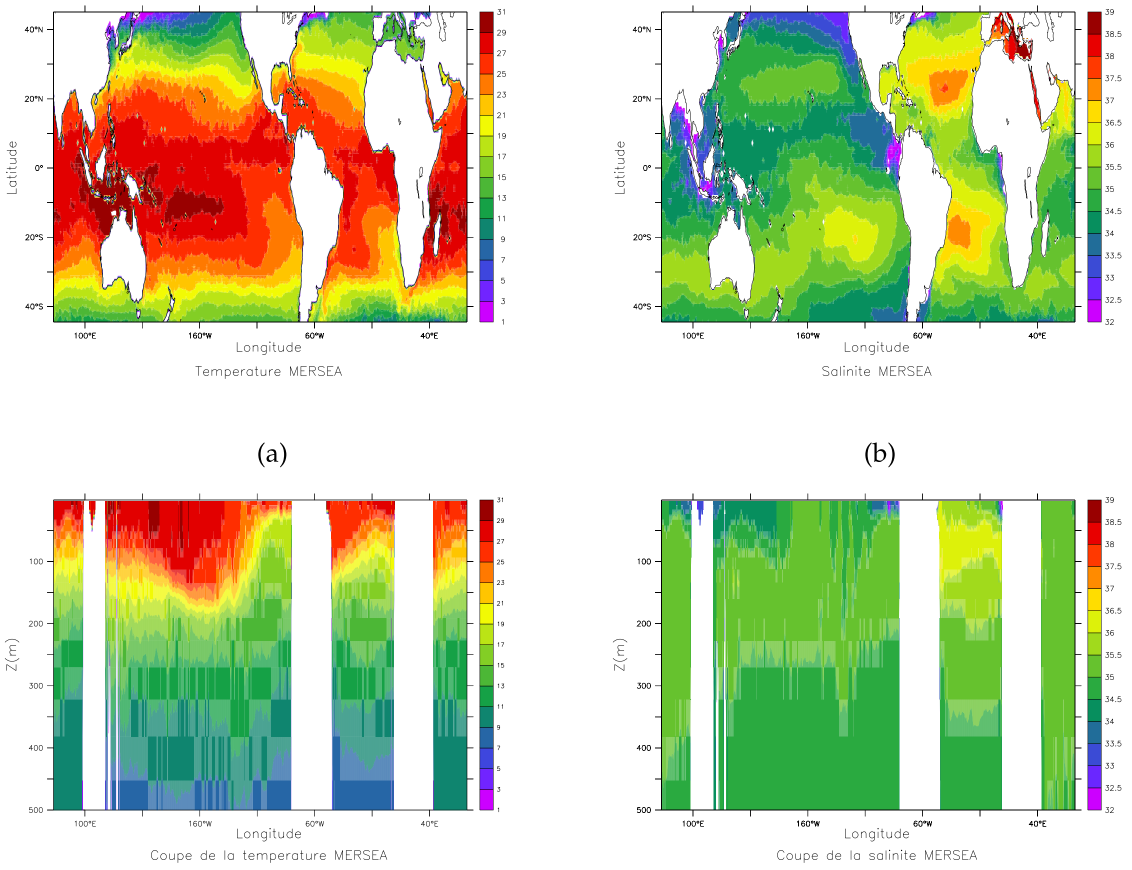
[19] **G. Desroziers, L. Berre, B. Chapnik and P. Polo**, *Diagnosis, of observation, background and analysis error statistics in observation space.* CNRM, LMD, Q. J. R. Meteorol. Soc., 999, pp. 1-9999, 2005.

[20] **M. Fisher.**, *Minimization Algorithms for Variational Data Assimilation.* Recent Developments in Numerical Methods for Atmospheric Modelling, pp364-385, 1998.

Annexe A

Température et Salinité MERSEA

Les figures 1.2(a) et 1.2(c) montrent un exemple de la température MERSEA1/4° au premier février 1992. Sur ces deux figures, nous remarquons des ondulations de petite échelle bien marquées le long des isothermes. En fait, la grande résolution spatiale du modèle ORCA0.25 ainsi que sa bonne paramétrisation physique font que les phénomènes sous maille sont bien représentés au cours de son évolution dans le temps. D'autre part, on retrouve les aspects généraux de la température sur le globe : le gradient



(a) (b)

(c) (d)

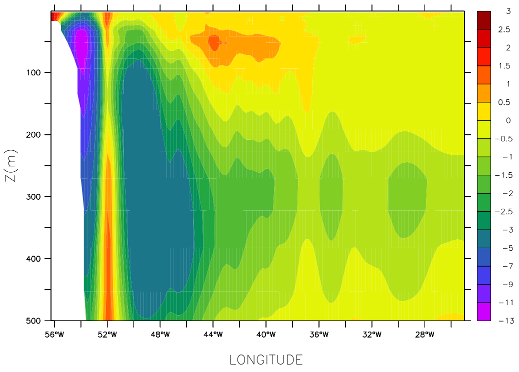
FIG. A.1 – L'analyse MERSEA1/4 du 1992-02-01 :(a)température à 3m, (b)salinité à 3m, (c) coupe verticale de la température à l'équateur , et (d) coupe verticale de la salinité à l'équateur

méridien négatif et les températures les plus chaudes se situent dans le Pacifique Ouest et les côtes Sud-Est Africaines. En profondeur, on retrouve la structure du fort gradient au niveau de la thermocline avec

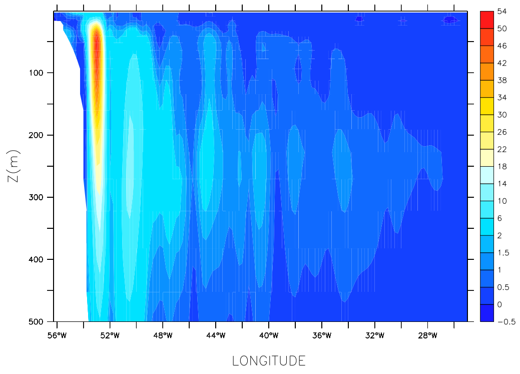
la remonté associée à l'upwelling dans le Pacifique Est.
Pour la salinité (figures 1.2(b) et 1.2(d)), on remarque que MERSEA1/4° représente trés correctement la perspective générale de la salinité sur le globe avec toujours une présence des phénomènes de petite échelle qui apparaissent clairement au niveau des isolignes de la salinité.

Annexe B

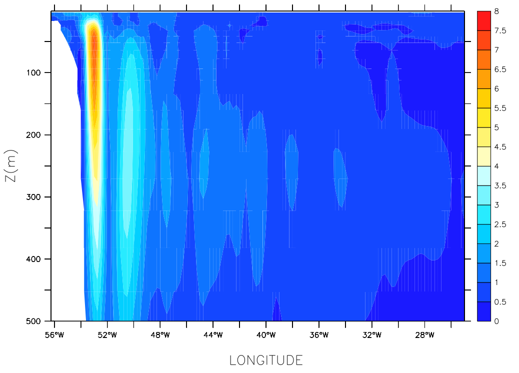
Comparaison entre MERSEA et ORCA2 à 37°S



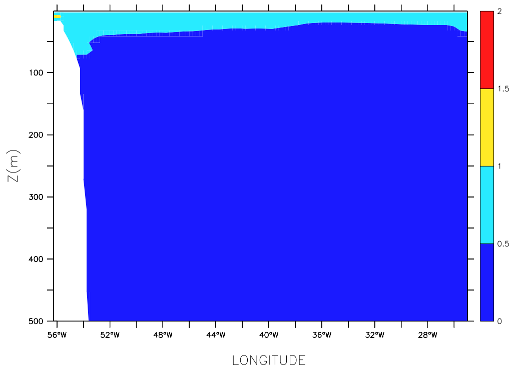
(a) Biais en °C.



(b) Erreur de représentativité en $°C^2$.



(c) Ecart type MERSEA en °C.

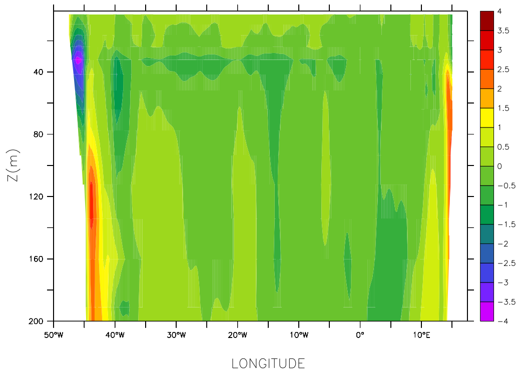


(d) Ecart type ORCA2 en °C.

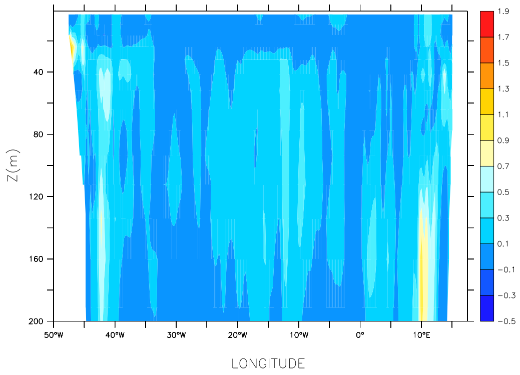
FIG. B.1 – Comparaison entre MERSEA et ORCA2 à 37°S.

Annexe C

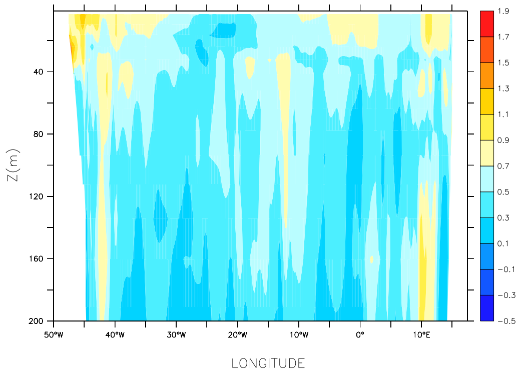
Comparaison entre MERSEA et ORCA2 le long de l'Atlantique à 25°S



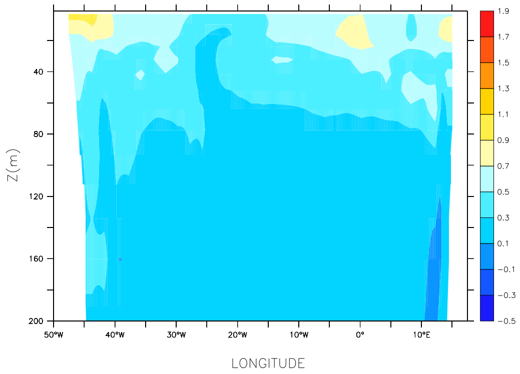
(a) Biais en °C.



(b) Erreur de représentativité en $^{\circ}C^{2}$.



(c) Ecart type MERSEA en °C.

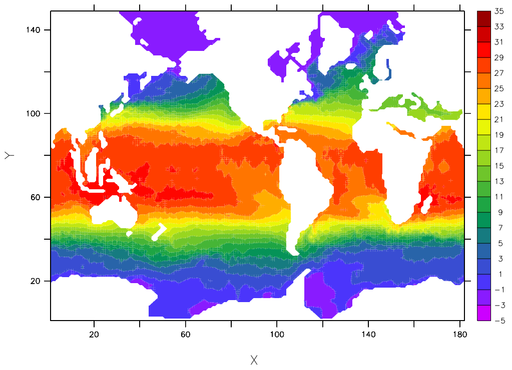


(d) Ecart type ORCA2 en °C.

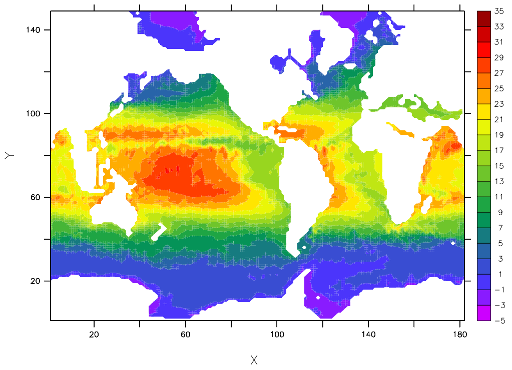
FIG. C.1 – Comparaison entre MERSEA et ORCA2 le long de l'Atlantique à 25°S.

Annexe D

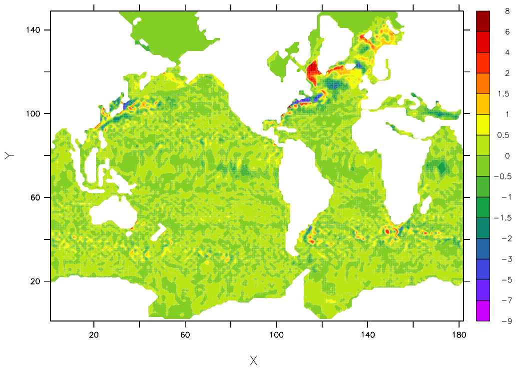
Construction d'une analyse complète sur le domaine global(EXP3)



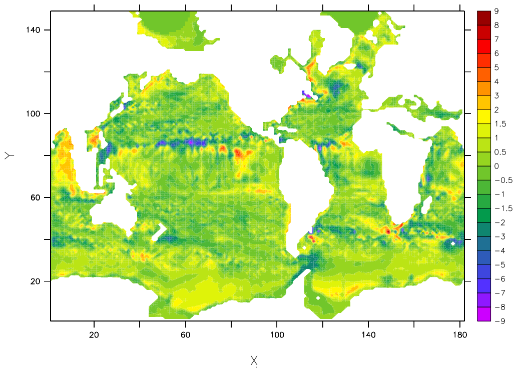
(a) L'analyse de température à 5m.



(b) L'analyse de température à 100m.



(c) L'incrément de température à 5m.



(d) L'incrément de température à 100m.

FIG. D.1 – Résultats de l'expérience EXP3 : l'analyse et l'incrément en °C.

Nous avons vu que la taille importante du problème nous a amené à effectuer des expériences sur des domaines limités. Dans cette expérience, nous avons divisé le domaine global en 12 domaines où les données MERSEA sont assimilées sur chaque domaine séparément. Une reconstruction de l'analyse complète sur le domaine global a été effectuée. L'analyse produite semble avoir de bonnes propriétés de continuité (pas de traces du découpage régional).