



HAL
open science

Impact of future and current altimetry and in situ networks on the oceanic analysis and forecasts

Simon Verrier

► **To cite this version:**

Simon Verrier. Impact of future and current altimetry and in situ networks on the oceanic analysis and forecasts. Ocean, Atmosphere. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2017. English. NNT : 2017TOU30096 . tel-01902791

HAL Id: tel-01902791

<https://theses.hal.science/tel-01902791>

Submitted on 23 Oct 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par : *l'Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)*

Présentée et soutenue le *Date de soutenance (20/03/2017)* par :
SIMON VERRIER

**Impact des missions altimétriques et des réseaux de mesure
in situ actuels et futurs sur l'analyse et la prévision
océanique**

JURY

| | | |
|----------------------|---------------------------------------|--------------------|
| ISABELLE DADOU | Professeur UPS, LEGOS, Toulouse | Présidente du Jury |
| SABRINA SPEICH | Directrice de recherche, ENS LMD | Rapporteur |
| JEAN-MICHEL BRANKART | Directeur de recherche, UJF LGGE | Rapporteur |
| FABRIZIO D'ORTENZIO | Directeur de recherche, UPMC LOV | Rapporteur |
| ROSEMARY MORROW | Directrice de recherche, UPS LEGOS | Examinatrice |

École doctorale et spécialité :

SDU2E : Océan, Atmosphère, Climat

Unité de Recherche :

Mercator Océan

Directeur(s) de Thèse :

Pierre-Yves LE TRAON (Directeur) et Élisabeth REMY (Co-Directrice)

Remerciements

Cette page vient finaliser ces presque trois ans et demi de travail que représente cette thèse. Ce document n'est pas le résultat d'un projet froid et impersonnel, beaucoup de personnes ont vécu avec moi, de près ou de loin, les évolutions, les échecs et les réussites de ces travaux. Je tiens ici à les remercier personnellement.

Avant tout je remercie mes directeurs de thèse. D'abord Elisabeth Rémy pour sa présence au quotidien et m'ayant permis de m'initier aux systèmes d'analyse et de prévision de Mercator Océan. Ensuite je remercie Pierre-Yves Le Traon pour sa présence et sa bienveillance, notamment en fin de thèse.

Je remercie aussi l'Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer, le Centre National d'Etude Spatial ainsi que Mercator Océan qui m'ont permis de réaliser cette thèse dans les meilleures conditions matérielles possible.

Je remercie les membres du jury pour leur relecture, les corrections et commentaires qu'ils ont pu formuler à propos de mes travaux. Je salue donc Madame Isabelle Dadou, présidente du jury qui a pu me voir évoluer depuis ma première année de Master à l'université Paul Sabatier, Monsieur Jean-Michel Brankart, Monsieur Fabrizio d'Ortenzio, Madame Sabrina Speich et enfin Madame Rosemary Morrow. Des remerciements tout particulier vont enfin cette dernière qui m'a permis d'entreprendre un "voyage" plus qu'inattendu jusqu'en Terre Adélie en me faisant participer au programme Survostral.

Cette thèse n'aurait certainement pas vu le jour sans les conversations que j'ai pu avoir avec Claire Doubremelle, Sylvain Coquillat et Didier Reboux. Merci à eux pour leurs avis éclairés et leurs conseils avisés.

Je n'aurai jamais pu arriver au bout de ce travail sans les nombreuses personnes travaillant à Mercator Océan. Il va m'être difficile de citer tout le monde mais sachez que ces années passées avec vous m'ont énormément apportées professionnellement et personnellement. Je remercie Pierre qui a su trouver les mots justes lors de conversations souvent bien tardives dans des locaux désertés. Je tiens à remercier en particulier Mathieu, Carine et Bertrand qui nous permettent d'avoir des outils informatiques en parfait état de marche sans lesquels nous ne ferions pas grand-chose. Ensuite je remercie ceux qui m'ont aidé techniquement et scientifiquement dans mes travaux, dans le désordre : Romain, Olivier, Charles-Emmanuel, Jean-Michel, Mounir, Charly, Clément, Giovanni, Matthieu. Je remercie aussi ceux qui ont partagé repas, pauses, soirées ou encore sessions d'escalade au cours de ces années de thèse : Julien, Elodie, Victor, Coralie, Jo, Charles, Cedric, Fabrice, Florent, Julien. David et Diane, tout simplement merci, vous même vous savez.

Pour Elo Gut, la cheffe du bureau, quoi qu'on en dise, merci pour ta gentillesse et ton écoute. C'est sûrement grâce à toi qu'on a pu supporter avec tant de philosophie le plus grand punk à chat de Bretagne Occidentale.

Celui là même qui a négocié depuis un bon moment maintenant un paragraphe

unique et entièrement réservé à sa personne (son ego n'a de taille égale que celle de son camion), sous le simple prétexte qu'il m'a sorti de nombreuses embûches au cours de ces trois ans et demi. Ça ne représente pas grand-chose mais merci Mathieu, le "Hams", le Général. Tu m'as vraiment aidé à terminer cette thèse, je ne suis pas sûr qu'un crédit à vie en bières puisse un jour couvrir cette dette morale, on verra bien avec le temps.

Mes remerciements vont aussi à Marine et aux membres de l'équipage de l'Astrolabe, ainsi qu'une nouvelle fois à Rosemary. Grâce à eux j'ai pu vivre un peu de ce que sont "les mers du Sud", les creux sans fond, les albatros et entrevoir l'Antarctique et ses territoires hostiles.

Pour finir, quelques remerciement plus personnels. Les jeunes et moins jeunes du groupe du CAF, Camille, Marie, Max, Jéjé, Simon, Nico, Paul et bien sûr notre maître au tous, Romain ainsi que le chef d'orchestre, l'inoxydable et inarrêtable Bibi. Merci pour ce que vous m'avez apporté sur l'escalade, la montagne et le reste. Toujours au CAF merci à Isa, Rémi et Antoine, j'espère qu'on aura rapidement l'occasion de grimper ensemble de nouveau.

Merci aux copains de Toulouse, de Grenoble, de Dijon et d'ailleurs pour les journées en falaise, les misères en montagne, les bières et le reste. Gauthier, Zoé, Xavier, Kevin, Aurel, Violette, Chef Matthieu et Mathilde, Antoine et tout les autres. Merci Fredo d'avoir la peau dure et d'être toujours prêt pour une sale journée. Merci à Perrine qui, depuis le temps, n'y croyait plus, mais tout arrive.

Merci à ma famille, Sarah et Antoine les cousins, Louis et Baptiste les frangins. C'est jamais simple mais au final c'est jamais compliqué. Merci à mes parents bien sûr, peut-être ceux qui y ont toujours cru. Merci à ma belle famille. Enfin et bien sûr merci à Ségo, celle qui ne lâche rien et qui supporte tout.

Voilà, je pense avoir fait le tour de mes remerciements, il y a sûrement des oubliés et je m'en excuse. Pour les curieux, prenez au moins la peine au moins de lire l'introduction, ça peut éventuellement vous intéresser aussi.

Table des matières

| | |
|--|-----------|
| Table des matières | v |
| 1 Introduction | 1 |
| 2 Les systèmes d'analyse et de prévision océanique utilisés à Mercator | |
| Océan : Modèle, Observations et Système d'Assimilation de données | 9 |
| 2.1 Introduction | 11 |
| 2.2 Le modèle NEMO et équations | 12 |
| 2.2.1 Le modèle NEMO | 12 |
| 2.2.2 Les équations primitives | 13 |
| 2.2.3 Discrétisation spatiale | 16 |
| 2.2.4 Forçages | 17 |
| 2.3 Observation de l'océan | 18 |
| 2.3.1 L'altimétrie | 18 |
| 2.3.2 Les erreurs liées à la mesure et les corrections apportées | 21 |
| 2.3.3 Les différentes missions altimétriques | 22 |
| 2.3.4 Autres mesures satellitaires | 22 |
| 2.3.5 Les mesures in situ issues des profileurs Argo | 24 |
| 2.3.6 Autres types de mesures in situ | 25 |
| 2.4 Le système d'assimilation de données de Mercator Ocean | 26 |
| 2.4.1 Le Singular Evolutive Ensemble Kalman filter | 26 |
| 2.4.2 Durée d'un cycle et Incremental Analysis Update (IAU) | 29 |
| 2.4.3 Retour sur l'opérateur d'observation \mathbf{H} | 29 |
| 2.4.4 Matrices de covariance d'erreurs d'observation, de prévision et adaptativité | 30 |
| 2.4.5 La correction de biais | 31 |
| 2.4.6 Mise en place pratique au sein des systèmes Mercator | 32 |
| 2.5 Conclusion | 33 |
| 3 Mise en place et présentation des expériences d'OSSEs | 35 |
| 3.1 Introduction | 37 |
| 3.2 Observations altimétriques | 38 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 3.3 | Observations de température et de salinité | 41 |
| 3.4 | Les simulations libres | 44 |
| 3.4.1 | Le Nature Run | 44 |
| 3.4.2 | Le run libre au 1/4° | 44 |
| 3.4.3 | Le run libre au 1/12° | 44 |
| 3.4.4 | Étude dynamique comparée des simulation libres | 45 |
| 3.5 | Les expériences d'assimilation | 49 |
| 3.5.1 | OSSEs altimétriques | 49 |
| 3.5.2 | OSSEs combinées : altimétrie et in situ | 52 |
| 3.6 | Tests de sensibilité de SAM-2 | 53 |
| 3.6.1 | Mise en place des expériences | 54 |
| 3.6.2 | Étude de la correction multivariée | 54 |
| 3.6.3 | Étude de l'impact des modes et de la taille de la bulle d'analyse | 57 |
| 4 | Impacts des observations altimétriques et des profils in situ dans les systèmes au 1/4° | 63 |
| 4.1 | Assessing the impact of multiple missions and Argo in a global eddy permitting data assimilation system | 65 |
| 4.1.1 | Introduction (fr) | 65 |
| 4.1.2 | Conclusion (fr) | 66 |
| 4.1.3 | Abstract | 67 |
| 4.1.4 | Introduction | 68 |
| 4.1.5 | OSSE methodology | 69 |
| 4.1.6 | Altimetry OSSEs results | 72 |
| 4.1.7 | OSSE with Argo and altimetry | 86 |
| 4.1.8 | Conclusion | 90 |
| 4.2 | Impacts globaux et régionaux de l'assimilation du jeu de profils augmenté | 91 |
| 4.2.1 | Impacts globaux | 91 |
| 4.2.2 | Impact dans le Gulf Stream | 95 |
| 4.3 | Évaluations des prévisions via l'utilisation de forecast skill dans le système au 1/4° | 101 |
| 4.3.1 | Calcul des Forecast Skill | 101 |
| 4.3.2 | Étude des scores de FS | 102 |
| 5 | Impact des observations altimétriques de type SAR dans les systèmes de prévisions 1/4° et 1/12° | 107 |
| 5.1 | Introduction | 109 |
| 5.2 | Impact SAR/LRM dans un système au 1/4° | 110 |
| 5.2.1 | Impact de la donnée SAR sur la température | 110 |
| 5.2.2 | Impact de l'erreur de représentativité | 112 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 5.3 | Assessing the impact of SAR altimetry for global ocean analysis and forecasting | 115 |
| 5.3.1 | Introduction (fr) | 115 |
| 5.3.2 | Conclusion (fr) | 116 |
| 5.3.3 | Observing System Simulation Experiments | 116 |
| 5.3.4 | Abstract | 116 |
| 5.3.5 | Introduction | 116 |
| 5.3.6 | Observing System Simulation Experiments | 117 |
| 5.3.7 | Main results | 118 |
| 5.3.8 | Conclusion | 121 |
| 5.4 | Impact de la donnée SAR sur les forecast skills dans les systèmes au $1/4^\circ$ et au $1/12^\circ$ | 122 |
| 6 | Conclusion | 125 |
| | Liste des figures | 139 |
| | Liste des tableaux | 143 |

Chapitre 1

Introduction

L'océanographie opérationnelle propose depuis 25 ans de répondre aux enjeux climatiques, économiques et sociétaux nécessitant de décrire et prévoir l'évolution de l'état de l'océan. Basée sur les connaissances issues de la recherche océanographique, cette discipline ne pouvait voir le jour sans l'existence et le développement de plusieurs éléments essentiels : des modèles numériques réalistes de l'océan, des méthodes d'assimilation de données performantes, des moyens de calculs puissants et enfin un système d'observation global et en temps réel de l'océan. Ce dernier est principalement composé d'instruments embarqués sur des satellites (altimètres, radiomètres) (e.g. Le Traon et al., 2015) fournissant une vision globale et à haute résolution de la surface des océans mais aussi d'un réseau d'instruments in-situ fournissant des informations complémentaires en profondeur (e.g. Legler et al., 2015).

Le développement de l'océanographie opérationnelle a été initialement porté par les différentes marines nationales. Les applications se sont ensuite généralisées à la sécurité maritime, au suivi des pollutions accidentelles, au transport maritime, au suivi de l'état de santé des océans, à la gestion des pêches et à la prévision saisonnière et météorologique. Cette liste non exhaustive montre l'étendue de l'impact que peut avoir l'océanographie opérationnelle et permet de comprendre les enjeux qui motivent la mise en place de centres opérationnels tels que Mercator Océan.

L'expérience internationale GODAE (Global Ocean Data Assimilation Experiment) a permis le démarrage de l'océanographie opérationnelle à la fin des années 1990 (Smith et Lefebvre, 1997 ; Le Traon et al., 2001). La France a contribué à GODAE via le démarrage de Mercator Océan, de Coriolis pour la composante in-situ et de la série Jason pour la composante spatiale. GODAE réunissait les principaux acteurs mondiaux de l'océanographie opérationnelle et avait pour but de démontrer qu'il y avait à développer un système mondial d'observation et de prévision de l'océan ainsi que sa faisabilité. Cette expérience a réuni neuf pays (États-Unis, Royaume Uni, France, Italie, Norvège, Japon, Australie, Chine et Canada) qui ont déployé un ensemble de systèmes de prévisions régionaux et globaux dédiés à des régions différentes et/ou présentant des configurations variées de systèmes d'assimilation de données. GODAE a largement contribué au développement de l'océanographie opérationnelle (Bell et al., 2009). GODAE en tant qu'expérience s'est terminée en 2008 et le programme international GOV (GODAE OceanView) a été suivi afin de pérenniser les besoins de coordination scientifique de l'océanographie opérationnelle internationale (Bell et al., 2009 ; Bell et al., 2015). GOV, via un ensemble de Task Teams a aussi pour objectif d'étendre les activités de coordination scientifique à la validation, à l'évaluation des systèmes d'observation, au côtier, aux écosystèmes et au couplage océan-atmosphère. Cela favorise ainsi les échanges entre les différents centres opérationnels et la communauté scientifique et préparer l'océanographie opérationnelle future. Parallèlement, le JCOMM-ET-OOFS (Joint Technical Commission for Oceanography and Marine Meteorology Expert Team for Operational Ocean Forecasting), un autre groupe plus technique et opérationnel ,

a pour objectif d'harmoniser et de standardiser les systèmes d'analyse et de prévision océanique.

Mercator Océan s'est progressivement développé dans ce contexte de forte coopération internationale et a pris une nouvelle dimension européenne via la coordination de 2009 à 2104 des projets européens MyOcean 1&2 puis MyOcean Follow. Durant ces six années, Mercator Océan a été le centre collecteur et distributeur des différents produits océanographiques régionaux et globaux issus des centres de prévision européens. Ces projets de R&D ont conduit à la mise en place depuis Avril 2015 du service marin du programme européen Copernicus. Le programme Copernicus a pour objectif d'assurer un suivi de la planète et de fournir des informations fiables relatives aux domaines de l'environnement et de la sécurité. Ce programme s'appuie sur une composante spatiale très ambitieuse (missions sentinelles), une composante in-situ et six services dédiés aux thématiques suivantes : Terre, Mer, Atmosphère, Changement Climatique, Gestion des Crises et Sécurité. Chacune de ces thématiques a été confiée à différents organismes experts dans leur domaine.

C'est ainsi que Mercator Océan en tant que leader de l'océanographie opérationnelle en Europe a été mandaté, depuis avril 2015 et ce, jusqu'en 2021, pour développer le Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS). Ce service donne aux utilisateurs un accès libre et gratuit à une base de données régulière et de qualité sur l'état des océans du globe pour l'océan physique, la glace de mer et la biogéochimie. Ces produits océaniques incluent des observations issues de centres de données (Thematic Assembly Centers ou TACs) et des réanalyses, analyses et prévision issues de centres de prévision (Monitoring and Forecasting Centers ou MFCs). Les zones couvertes incluent le global, l'Arctique, la Méditerranée, les zones des plateaux continentaux Nord-Ouest et Sud-Ouest et la Mer Noire.

Outre la coordination, Mercator Océan produit en interne certaines de ces données notamment un système de prévision global journalier au $1/12^\circ$ (PSY4V3R1) associé à un bulletin biogéochimique global hebdomadaire (BIOMER4V1R2) ou encore en coopération avec Puertos del Estado en Espagne un bulletin journalier régional pour la zone des plateaux continentaux Sud Ouest au $1/36^\circ$ de degré (IBI36QV4). La production des autres données est confiée aux autres acteurs de l'océanographie opérationnelle européenne et Mercator Océan est chargé de la mise à disposition des produits et du service aux utilisateurs.

Ces différents produits océanographiques sont obtenus grâce à l'utilisation conjointe de modèles numériques performants et contraints, grâce à l'assimilation de données, par un réseau très diversifié d'observations satellites et in situ. Un système de prévision opérationnel se doit d'utiliser des jeux d'observations suffisamment denses et actualisées pour pouvoir fournir les meilleures prévisions. C'est pourquoi sous l'impulsion de GO-DAE et de GOV sont apparus parallèlement aux centres de prévision opérationnels des centres de recueil et de traitement des observations. Ces centres sont tous dédiés à un

type particulier de données (Le Traon et al. 2009) dont l'altimétrie (niveau de la mer) et les données in-situ issues des profils Argo (température et salinité). Le rôle des centres est double : fournir un flux d'observations continu et de qualité en temps réel et en temps différé directement utilisable par les systèmes opérationnels (réanalyse, analyse et prévision) mais aussi mettre à disposition de la communauté océanographique des bases de données validées. Dans le cadre de CMEMS, l'ensemble de ces observations est accessible grâce aux Thematic Assembly Centers (TACs).

Les données concernées par nos travaux sont des données altimétriques et des profils in situ de température et de salinité issus des flotteurs Argo. L'altimétrie est un élément essentiel du système global d'observation des océans. En effet la couverture spatiale uniforme et mondiale des données ainsi que la période d'observation archivée (25 ans depuis les premières mesures de TOPEX/Poseidon) font que les observations du niveau de la mer sont les plus utilisées pour décrire et étudier les phénomènes océaniques. Le niveau de la mer est une mesure intégrée sur la verticale de la densité et son assimilation permet de contraindre fortement la structure 3D de l'océan (e.g. Le Traon, 2011). Le système Ssalto/Duacs (CMEMS Sea Level TAC) permet de distribuer aux centres Européens et mondiaux, et à une fréquence proche du temps réel, les données altimétriques issues des différentes missions en vol. Ces données sont traitées par CLS (Collecte Localisation Satellites, filiale du Centre National d'Etudes Spatiales, CNES) afin de filtrer les valeurs non physiques et incohérentes et sont transmises sous forme de points mesures le long des traces satellites. Outre leur utilisation opérationnelle, les observations brutes sont ensuite traitées plus finement afin d'enrichir la base de données et le recueil d'observations altimétriques pour être réemployées dans le calcul de réanalyses notamment. L'altimétrie fournit des observations essentielles pour l'observation des phénomènes de mésoéchelle (50-500km) (Le Traon et Morrow, 2001 ; Morrow et Le Traon 2012 ; Le Traon et al., 2015). Ces phénomènes (tourbillons) sont les vecteurs principaux d'énergie et de masse à travers l'océan. L'étude de la mésoéchelle océanique a vraiment commencé avec les lancements de TOPEX/Poseidon et de ERS-1 et depuis, de nombreuses études ont porté sur les informations contenue dans les jeux d'observations issus des différents altimètres afin d'obtenir des champs grillés de niveau de la mer (Ducet et al 2000, Traon and Dibarboure 2002, Pascual et al. 2006) ou encore d'étudier la dynamique intrinsèque de ces phénomènes (Le Traon et al. 2008 ; Scharfenberg and Stammer 2010). Bien décrire la circulation mésoéchelle est indispensable pour les applications de l'océanographie opérationnelle.

Le programme international Argo à, quant à lui, débuté à la fin des années 1990 dans le cadre d'un effort conjoint entre GODAE et le programme international CLIVAR (Climate Variability and Predictability Experiment). Déployés à titre expérimental en 2000, c'est en 2004, après une période de validation du système et des données, que les premiers profils sont intégrés aux systèmes de prévision opérationnels. La flotte de profileurs est dédiée à la mesure et à la description de la variabilité saisonnière, inter-

annuelle et climatique de l’océan (Roemmich et al 2001 ; Roemmich et al., 2008 ; Riser et al., 2016). Les données Argo sont aussi essentielles pour contraindre les systèmes d’analyse et de prévision océanique (e.g Oke et al., 2015, Turpin et al., 2016) et sont complémentaires des données des satellites altimétriques (e.g. Guinehut et al., 2012 ; Le Traon, 2013). Les profileurs Argo ont été employés, par ailleurs, pour l’étude de nombreuses autres phénomènes tels que la convection profonde en mer du Labrador (Yashayaev and Loder 2009) ou encore l’érosion saisonnière de la thermocline dans l’extension du Kuroshio (Cronin et al. 2013). Les données issues des profils Argo sont traitées et mises à disposition sur la plateforme européenne Coriolis (CMEMS in-situ TAC). Cette dernière est chargée de fournir aux centres opérationnels une base de données à jour et corrigée des observations in situ mesurées par les différents réseaux (e.g Argo, XBT, mouillages).

Les données issues des différents réseaux d’observations contiennent des informations que les systèmes d’analyses et de prévisions doivent être capables d’utiliser et de propager dans l’espace et le temps. L’apport des données dans ces systèmes doit être régulièrement évalués et la Task Team OSEVal de GODAE OceanView est en charge de la coordination internationale de ces activités. L’apport des observations est généralement analysé en procédant par ajout ou retrait d’un type d’observation et en analysant l’impact de cet ajout/retrait sur les prévisions et analyses océaniques. Ces expériences se classent en deux catégories proches mais aux concepts différents. Les premières, nommées *Observing System Evaluations* (OSEs), se basent sur un système opérationnel réel. L’impact d’un jeu d’observations sur l’analyse et la prévision est alors évalué en mettant en place une simulation identique à la simulation opérationnelle mais n’assimilant plus cette source de données. Cette expérience est alors comparée à la référence opérationnelle. De nombreuses OSEs ont été conduites en ayant pour but de caractériser l’impact de plusieurs altimètres et/ou de la flotte Argo dans des systèmes opérationnels (e.g. Lea et al., 2014 ; Oke et al., 2015 ; Turpin et al., 2015 ; Remy et al., 2016). Les secondes expériences se nomment *Observing System Simulation Experiments* (OSSEs). Contrairement aux OSEs, les OSSEs se basent sur des observations simulées à partir d’une simulation libre nommée Nature Run. Comme son nom l’indique, cette simulation va servir de référence absolue (elle se substitue à l’océan réel) à laquelle les autres expériences vont être comparées. Ces simulations sont construites à partir d’une configuration proche du système opérationnel. Ce protocole permet plusieurs types d’études permettant d’évaluer l’impact d’un système d’observation proche du système réel vis-à-vis d’une référence parfaitement connue (le Nature Run), d’étudier dans ce même contexte idéalisé les complémentarités entre plusieurs sources de données ou encore d’évaluer l’apport de nouveaux types de données (e.g. altimétrie à large fauchée SWOT).

Nous voyons que les OSEs permettent de dresser un état des lieux des capacités du système opérationnel à exploiter les informations contenues dans les jeux d’observations

et que les OSSEs permettent de tester différentes configurations du réseau d'observation actuel ou futur ou d'étudier dans un contexte parfaitement connu l'impact des réseaux existants. Dans ce dernier cas, il est possible de construire un protocole basé sur des binômes OSEs/OSSEs identiques entre elles à l'exception de la nature des données assimilées (réelles ou simulées) afin d'évaluer précisément la capacité des OSSEs à simuler le comportement de l'océan réel. Cette démarche de calibration des OSSEs, inspirée des méthodes appliquées aux études des systèmes opérationnels atmosphériques, a été conduite par Halliwell et al. (2013) dans une configuration régionale du modèle américain HYCOM centrée sur le Golfe du Mexique.

L'objectif principal de nos travaux est de quantifier l'impact des données altimétriques et in-situ existantes et futures dans les systèmes d'analyses et de prévisions mis en œuvre à Mercator Océan. Un objectif associé est d'améliorer la prise en compte et l'impact de ces observations dans les schémas d'assimilation de données. Notre approche est basée sur la mise en place d'OSSEs avec des protocoles d'assimilation de données très proches de ceux utilisés dans les systèmes opérationnels. Cela permet de quantifier plus précisément l'apport et l'impact de l'assimilation de données et apporte des informations très complémentaires aux diagnostics de validation opérationnels mis en place à Mercator Océan (e.g. Hernandez et al., 2015). En se basant sur des OSSEs et en utilisant un Nature Run à haute résolution au $1/12^\circ$ ayant une représentation fidèle de la mésoéchelle, nous étudions dans un premier temps la capacité d'une configuration de plus faible résolution ($1/4^\circ$) à reproduire ces échelles via l'assimilation de données altimétriques. Ces données varieront en nombre (utilisation de un à trois altimètres) et en précision (altimétrie SAR versus altimétrie conventionnelle). Afin d'évaluer la complémentarité du réseau Argo et de la constellation altimétrique dans les systèmes opérationnels de Mercator Océan, nous étudions l'impact de l'ajout puis de la densification de la flotte de profileurs Argo notamment dans les courants de bords ouest (Gulf Stream, Courant des Aiguilles, Kuroshio). L'impact de la précision des données altimétriques est étudié dans le cadre d'OSSEs au $1/12^\circ$ afin d'analyser la sensibilité des résultats à la résolution du modèle.

Le manuscrit est organisé de la façon suivante. Dans une première partie sont décrits les systèmes d'analyse et de prévision océanique utilisés à Mercator Océan et les différents types de données assimilées. Ensuite est détaillé le fonctionnement du système d'assimilation de données SAM-2 (Système d'Assimilation Mercator). Les différentes simulations mises en place pour cette étude sont décrites ainsi que certains tests effectués sur le système d'assimilation.

Deux parties distinctes viennent ensuite présenter les résultats. Dans un premier temps, l'impact du nombre d'altimètres utilisés, la complémentarité entre les données altimétriques et Argo et l'impact d'une densification de la flotte Argo dans les courants de bords ouest et à l'équateur. Autant que possible, ces résultats sont mis en regard d'études basées sur des OSEs. Dans un second temps nous développons les études

de l'impact de la précision de la donnée altimétrique (altimétrie conventionnelle et SAR) dans des configurations au $1/4^\circ$ et au $1/12^\circ$. Enfin, les principaux résultats et les perspectives de ces travaux sont donnés en conclusion.

Chapitre 2

Les systèmes d'analyse et de
prévision océanique utilisés à
Mercator Océan : Modèle,
Observations et Système
d'Assimilation de données

Sommaire

| | | |
|------------|---|-----------|
| 2.1 | Introduction | 11 |
| 2.2 | Le modèle NEMO et équations | 12 |
| 2.2.1 | Le modèle NEMO | 12 |
| 2.2.2 | Les équations primitives | 13 |
| 2.2.3 | Discretisation spatiale | 16 |
| 2.2.4 | Forçages | 17 |
| 2.3 | Observation de l’océan | 18 |
| 2.3.1 | L’altimétrie | 18 |
| 2.3.2 | Les erreurs liées à la mesure et les corrections apportées | 21 |
| 2.3.3 | Les différentes missions altimétriques | 22 |
| 2.3.4 | Autres mesures satellitaires | 22 |
| 2.3.5 | Les mesures in situ issues des profileurs Argo | 24 |
| 2.3.6 | Autres types de mesures in situ | 25 |
| 2.4 | Le système d’assimilation de données de Mercator Ocean | 26 |
| 2.4.1 | Le Singular Evolutive Ensemble Kalman filter | 26 |
| 2.4.2 | Durée d’un cycle et Incremental Analysis Update (IAU) | 29 |
| 2.4.3 | Retour sur l’opérateur d’observation H | 29 |
| 2.4.4 | Matrices de covariance d’erreurs d’observation, de prévision et adaptativité | 30 |
| 2.4.5 | La correction de biais | 31 |
| 2.4.6 | Mise en place pratique au sein des systèmes Mercator | 32 |
| 2.5 | Conclusion | 33 |

2.1 Introduction

Mercator Océan réalise des analyses et prévisions océaniques en se basant sur un système opérationnel. Un système opérationnel est composé de trois éléments clés : un modèle numérique d'océan, un jeu d'observation en temps réel et un système d'assimilation de données permettant de contraindre le modèle avec les observations. Ces trois éléments clés sont en constante évolution et ils seront décrits ici tels qu'ils ont été utilisés pour cette étude. Tout d'abord, le modèle NEMO implémenté dans les systèmes de Mercator Océan permet de réaliser des simulations à des résolutions variées, notamment au $1/4^\circ$ et au $1/12^\circ$ en ce qui concerne cette présente étude.

Ensuite, le système d'observation (satellite et in situ) en temps réel sera décrit. C'est un élément essentiel de notre étude car ce sont ces observations qui permettent de contraindre le modèle via l'assimilation de données. Le système d'assimilation de Mercator Ocean (SAM-2) sera finalement détaillé. Il joue également un rôle très important pour nos travaux dont les résultats seront directement dépendants de ses performances.

Enfin sera décrit le SAM-2 qui permet de contrôler le modèle d'océan avec les observations. L'assimilation de donnée est une discipline à part entière commune à toutes les problématiques de prévisions numériques. Ici il s'agira de la replacer dans le contexte de l'océanographie opérationnelle.

2.2 Le modèle NEMO et équations

Les modèles océaniques ont été développés récemment en comparaison des modèles atmosphériques. Ces deux familles traitant de problèmes similaires de dynamique des fluides géophysiques, les premiers modèles océaniques se sont logiquement inspirés de leur analogues atmosphériques. La diversité des modèles provient des choix de paramétrisations et de schémas numériques. Le modèle numérique est une composante essentielle au sein d'un système de prévision et d'analyse océanique : les prévisions et analyses dépendent grandement de la qualité du modèle à partir duquel elles sont calculées.

2.2.1 Le modèle NEMO

Le modèle NEMO ou *Nucleus for European Modelling of the Ocean* (Madec et al., 1998) est une plate-forme internationale dédiée à la recherche océanographique, aux études climatiques, la prévision saisonnière mais aussi à l'océanographie opérationnelle. L'évolution de NEMO est organisée et contrôlée par un consortium européen de six membres : le Centre National de recherche Spatiale (CNRS, France), Mercator Océan (France), le *Natural Environment Research Council* (NERC, UK), le Met Office (UK), le *Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici* (CMCC, Italie), l'*Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia* (INGV, Italie). Le but de ce consortium est de proposer une démarche adaptée afin de maintenir le système NEMO à la pointe du développement dans l'optique d'une utilisation opérationnelle et dans un cadre de recherche. NEMO se sépare en 3 composantes océaniques principales :

- L'océan "bleu" : consacré à la dynamique océanique (NEMO-OPA, OPA pour Océan PARallélisé)
- L'océan "blanc" : consacré à la glace de mer (NEMO-LIM)
- L'océan "vert" : consacré à la biogéochimie (NEMO-TOP, sur la base du modèle PISCES)

Seule la partie dynamique (NEMO-OPA) a été utilisée pour cette étude.

La plate-forme NEMO permet une grande liberté de choix du point de vue des paramétrisations, ce qui en fait un outil très flexible pour diverses configurations. La documentation, *Nemo Ocean engine* (Madec et al., 2016) décrit le modèle dans son intégralité, des équations primitives générales du système aux options de paramétrisations.

Mercator Océan est partie intégrante du développement du système NEMO et a basé l'ensemble de ses systèmes opérationnels de prévision et d'analyse océanique sur cette plate-forme. Les équations primitives ainsi que le système de grille utilisé sont décrits ci-dessous.

2.2.2 Les équations primitives

Les variables prognostiques de NEMO sont le champ 3D de vitesses (\mathbf{U}, \mathbf{V}) la température (T), la salinité (S), et la hauteur de mer (SSH). Les équations de Navier-Stokes permettent une bonne description du fluide océanique moyennant certaines hypothèses préalables :

1. Approximation sphérique de la Terre : les surfaces de géopotential sont définies afin que la gravité soit parallèle au rayon de la Terre.
2. Hypothèse de couche mince : la profondeur de l'océan est négligeable devant le rayon de la Terre.
3. Hypothèse de fermeture turbulente : les flux turbulents sont exprimés en termes de grandes échelles.
4. Hypothèse de Boussinesq : les variations de densité sont négligées excepté dans le calcul de la force de flottabilité.
5. Hypothèse hydrostatique : elle traduit un équilibre entre le gradient vertical de pression et la flottabilité. En effet les grandeurs océaniques caractéristiques amènent à négliger la composante verticale des termes de Coriolis, d'accélération et d'advection dans l'équation de quantité de mouvement.
6. Hypothèse d'incompressibilité : la divergence du champ de vitesse tridimensionnel est nulle.

Sous ces hypothèses on obtient le système d'équations suivant :

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} = - \left[(\nabla \times \mathbf{U}) \times \mathbf{U} + \frac{1}{2} \nabla U^2 \right]_h - f \mathbf{k} \times \mathbf{U}_h - \frac{1}{\rho_0} \nabla_h p + \mathbf{D}^U \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \cdot (T\mathbf{U}) + D^T \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -\nabla \cdot (S\mathbf{U}) + D^S \quad (2.5)$$

$$\rho = \rho(T, S, p) \quad (2.6)$$

- $\mathbf{U} = \mathbf{U}_h + w\mathbf{k} = (u, v, w)$: vecteur vitesse [$m.s^{-1}$]
avec \mathbf{U}_h la vitesse horizontale et $w\mathbf{k}$ la vitesse verticale et
- \mathbf{k} : vecteur unitaire vertical ascendant

- T : température potentielle [$^{\circ}C$]
- S : salinité [psu]
- ρ : densité [$kg.m^{-3}$]
- p : pression [bar]
- z : coordonnée verticale ascendante
- f : paramètre de Coriolis fonction de la latitude ϕ , $f = 2\Omega \sin \phi$

2.2.2.1 Paramétrisation des effets sous-maillles

Les équations primitives précédentes décrivent le comportement de l'océan en tant que fluide géophysique à des échelles de temps et d'espace dépendant du choix du pas de discrétisation et de la taille des mailles de la grille. Aussi certains phénomènes océaniques ne peuvent être correctement décrits par les équations d'où l'importance de les prendre en compte via une paramétrisation. Les termes D^u , D^S , D^T des équations 2.1, 2.2 et 2.3 représentent donc ces phénomènes sous mailles à l'intérieur de l'écoulement. Ils sont exprimés à grande échelle par rapport à la taille des phénomènes concernés afin de fermer le système d'équations et sont donc résolus par le modèle. La non paramétrisation de ces phénomènes engendrerait une accumulation de l'énergie aux petites échelles du modèle pour cause de non dissipation turbulente, ce qui à terme se répercuterait sur les plus grandes échelles. La force de gravité engendre une forte anisotropie des écoulements, aussi la turbulence est paramétrée suivant l'horizontale d'une part et la verticale d'autre part.

2.2.2.2 Conditions aux limites

Le domaine océanique est délimité par le plancher océanique (jusqu'à la ligne de côte) ainsi que par l'interface océan-atmosphère (éventuellement océan-glace). Ces deux frontières se définissent comme des surfaces à travers lesquelles l'océan échange des flux de chaleur, de masse d'eau et de quantité de mouvement. Les différents flux à travers ces deux interfaces sont décrits ci-dessous :

Interface océan-fond :

Par "fond" s'entend toute terre immergée.

- Flux de quantité de mouvement : Il s'agit ici d'une perte de quantité de mouvement. En effet, la quantité de mouvement du fluide se dissipe par frottement au fond. C'est un terme négatif linéaire directement proportionnel à la vitesse horizontale de la couche de fond (dernier niveau vertical de la colonne d'eau modélisée avant le fond océanique).
- Flux de chaleur : L'unique source de chaleur provenant du fond est la géothermie, or ce terme est considéré comme négligeable vis à vis des échelles océaniques globales.

- Flux de masse : La seule source des flux de masses continentaux est l'apport en eau douce par les fleuves et les calottes glaciaires. Il s'agit donc d'un terme positif noté F .

Interface océan-atmosphère :

De par la nature dynamique de cette limite, les échanges de flux sont plus complexes à décrire que pour le fond.

- Flux de quantité de mouvement : De même que pour le fond, les quantités de mouvement de surface s'échangent via la friction. C'est donc un terme proportionnel à la vitesse relative de l'atmosphère par rapport à l'océan.
- Flux de chaleur : L'interface océan atmosphère est le lieu de nombreux phénomènes conduisant à des échanges de flux de chaleur. On détermine trois types de flux de chaleur : le flux latent, le flux radiatif et le flux conductif (ou sensible). Le flux de chaleur latente est lié à l'évaporation et à la condensation. L'évaporation puise de la chaleur au sein du fluide afin de réaliser le changement d'état liquide-gaz (endothermie). Les conditions pour amener la vapeur d'eau atmosphérique à se condenser étant difficiles à réunir le flux de chaleur latente (évaporation - condensation) est généralement négatif. Le flux radiatif se compose d'un terme de perte de chaleur par rayonnement infra-rouge et d'un terme de gain de chaleur lié au rayonnement solaire ultra-violet. Le terme de perte représente le flux net d'infra-rouge aussi moins il y a de nuages plus les pertes sont fortes. Le second terme est positif et se dissipe par absorption à travers la première dizaine de mètre de la surface océanique (contrairement aux autres flux de chaleur). Enfin, la différence de température à l'interface océan-atmosphère engendre un flux de chaleur sensible qui sera positif ou négatif en fonction des température respectives de l'océan et de l'atmosphère.
- Flux de masse : Les échanges de masse avec l'atmosphère se font via deux procédés : l'évaporation/condensation décrite ci-dessus (notée E) et les précipitations apportant de l'eau douce à la surface océanique (notée P).

2.2.2.3 Hauteur de la surface de mer

Les flux de masses permettent de décrire l'évolution de la hauteur de mer (η) en fonction de la vitesse verticale de surface et des termes de sources et puis de masses. Son expression se donne comme suit :

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = w - (E - P - F) \quad (2.7)$$

ω , la vitesse verticale s'obtient par l'intégration sur la colonne d'eau de la divergence horizontale. Le second terme représente le terme "Évaporation Moins Précipitation" ou

plus classiquement EMP avec E pour Évaporation/Condensation, P pour précipitation et F pour les apports par les fleuves.

2.2.3 Discrétisation spatiale

2.2.3.1 La grille Arakawa C

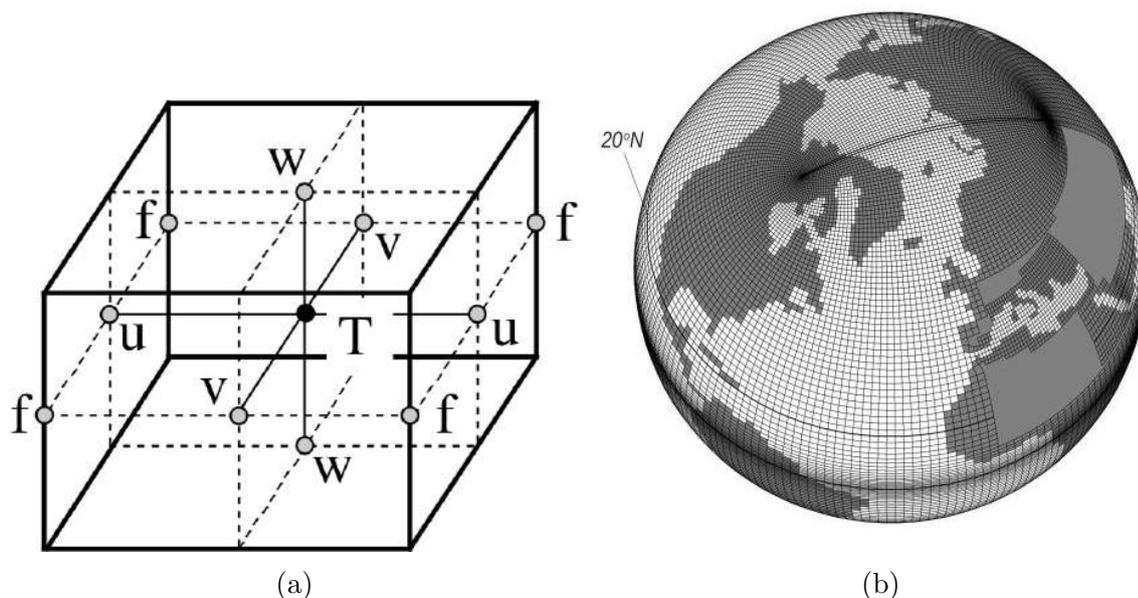


FIGURE 2.1 – (a) Positionnement des points de calcul des différentes variables. T se situe au centre de la maille. C’est le point scalaire où sont calculées la température, la salinité, la densité, la pression et la divergence horizontale. (u,v,w) indiquent les points vectoriels de vitesse et f les points de vorticité planétaire et relative. (b) Position de la bipolarité Nord de la grille ORCA.

La discrétisation numérique des équations primitives se fait sur la grille C (Fig. 2.1a) de la classification d’Arakawa.

Grille horizontale :

Les expériences mises en place pour cette étude ont été construites à partir de deux résolutions horizontale de grilles (voir Section 3.5). Une partie des expériences a été réalisée sur une grille ORCA025 (Fig. 2.1a), c’est à dire avec une résolution de $1/4^\circ$ soit environ 27,8 km à l’équateur, et se réduisant avec la latitude. La seconde partie des expériences a été calculée sur une grille ORCA12, à savoir une grille au $1/12^\circ$ de résolution soit environ 9,3 km à l’équateur. D’un point de vue du nombre de points de grille horizontaux, les simulations au $1/4^\circ$ comptent 1442x1021 éléments de grille et les simulations au $1/12^\circ$ comptent 4322x3059 éléments de grille.

Système de coordonnées verticales :

La profondeur du fond océanique ne coïncide pas nécessairement avec la profondeur des mailles du modèle numérique. Il existe certaines mailles chevauchant le fond océanique. Il convient alors de faire une approximation permettant de tronquer ces mailles pour pouvoir les utiliser dans le calcul. Cette méthode est dite de coordonnée-z à pas partiel. De cette manière, dans l'océan ouvert, les niveaux de calcul demeurent constants jusqu'à l'avant dernier niveau de la colonne d'eau, alors qu'ils diffèrent sur le dernier point de grille qui est en contact avec le fond océanique. Les grilles utilisées ici sont des grilles à 50 niveaux verticaux, le dernier ($k=50$) représentant le plancher océanique. Le premier niveau (en surface) est d'1 m d'épaisseur et le dernier (au fond) de 450 m. Il y a en tout 22 niveaux entre 0 et 100 mètres de profondeur.

2.2.4 Forçages

Les flux à l'interface océan-atmosphère sont calculés à partir de fichiers de forçages de l'ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) avec un pas de temps de 3h. Ces fichiers contiennent les grandeurs atmosphériques nécessaires au calcul des flux à l'interface océan-atmosphère (quantité de mouvement, chaleur, masse) via la formulation bulk CORE (Large et Yeager , 2004).

2.3 Observation de l’océan

La description d’un milieu dynamique tel que l’océan impose de pouvoir l’observer via un réseau le plus dense et le plus répétitif possible afin d’avoir une vision synoptique de ce milieu. Contrairement à l’atmosphère qui autorise des sondages verticaux via la télédétection, l’océan est un milieu ne permettant que l’observation de sa surface depuis l’espace. Le rôle des observations in situ en complément des observations spatiales est donc très important.

La surface océanique est observée via des satellites en orbite autour de la Terre. Ces derniers nous renseignent sur la hauteur de mer, la hauteur des vagues, la température de surface, la salinité de surface ou encore la couleur de l’eau. L’observation de la hauteur de mer via les satellites se nomme altimétrie spatiale; elle est employée de manière efficace depuis le milieu des années 80. La mesure altimétrique a révélé son importance dans l’observation de la mesoéchelle océanique (50-500 km) qui domine la circulation océanique. Morrow et Le Traon (2012) précisent les améliorations apportées par l’altimétrie dans l’observation de ces échelles dynamiques au cours des dernières années.

L’observation in situ s’appuie sur différents types de réseaux et d’instruments. Les flotteurs profilants Argo sont aujourd’hui une composante majeure de l’observation in situ. C’est le premier réseau global temps réel in situ des océans. Cette technologie basée sur une flotte d’instruments autonomes a été mise en place à l’échelle globale en 2004. Aujourd’hui, 3800 instruments observent quotidiennement les couches océaniques de 0 à 2000 m de profondeur. Ce réseau est dédié à l’observation des échelles climatiques saisonnières et décennales de l’océan (Roemmich et al., 2009). Les échelles concernées par la flotte de profileurs dérivants Argo et l’altimétrie spatiale sont donc complémentaires et la combinaison de ces deux jeux de données permet d’améliorer la description des champs de température et de salinité à haute résolution (e.g Guinehut et al. 2012).

Dans cette section, nous détaillerons l’altimétrie satellitale et le réseau Argo qui sont les deux systèmes d’observation de l’océan global utilisés pour cette étude. Ces deux systèmes jouent un rôle majeur pour l’océanographie opérationnelle.

2.3.1 L’altimétrie

Le principe de la mesure altimétrique

L’altimètre est un instrument embarqué sur des satellites permettant de mesurer la distance H (Fig. 2.2) le séparant de la surface de l’océan. En connaissant la position du satellite vis à vis d’une référence (ellipsoïde, qui idéalise la forme générale de la Terre) on peut en déduire la hauteur de mer ou SSH (Sea Surface Height) par rapport à cette référence.

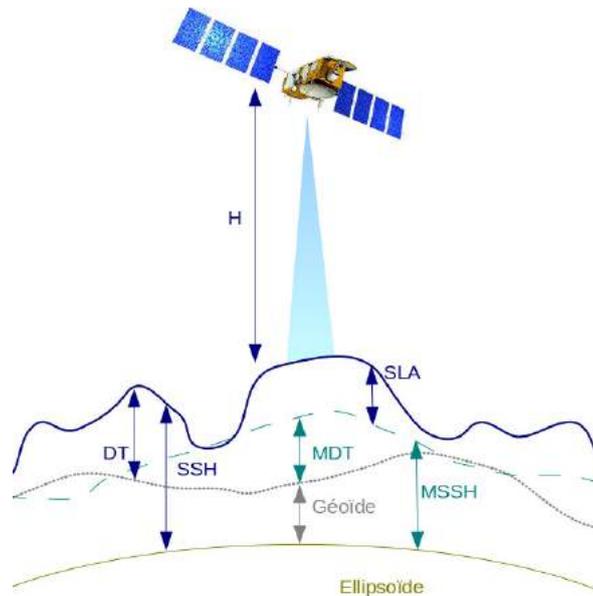


FIGURE 2.2 – Principe de la mesure altimétrique.

La hauteur de mer ou SSH

La SSH s'obtient en soustrayant la distance H à la hauteur du satellite par rapport à l'ellipsoïde de référence. Cette grandeur n'est pas exploitable directement du point de vue océanographique; elle recouvre en effet deux grandeurs liées à des phénomènes différents :

- La hauteur du géoïde par rapport à l'ellipsoïde de référence. Cette hauteur définit l'équipotentiel du champ de gravité, c'est-à-dire que le long de cette surface la gravité est constante. Cela signifie aussi que cette surface représente l'état de l'océan au repos, hors forçages et perturbations dynamiques. Le géoïde varie avec la quantité de matière présente à la verticale d'un point. Il n'est pas précisément connu mais grâce aux satellites GRACE et GOCE de très gros progrès ont été réalisés. Les géoïdes sont actuellement connus avec une précision de quelques centimètres pour les échelles supérieures à 100-220 km.
- La Topographie Dynamique ou DT (Dynamic Topography), est la signature des phénomènes liés à la circulation océanique c'est-à-dire la dynamique propre de l'océan mais aussi des forçages qui lui sont appliqués. La DT est très variable dans l'espace et dans le temps. Sa moyenne temporelle est appelée MDT (Mean Dynamic Topography). La moyenne de la SSH (MSSH) est ainsi égale à la somme du géoïde et de la MDT, le géoïde pouvant ainsi être approximé à une constante sur les échelles considérées.

La SLA (Sea Level Anomaly) est la différence entre la SSH et la MSSH. C'est une grandeur qui permet de s'affranchir de la méconnaissance du géoïde et qui pour ce dernier évolue de manière très lente au cours du temps.

Mise en œuvre de la mesure altimétrique

La mesure de la distance H (voir Fig. 2.2) est effectuée via l'émission d'une onde radio en direction de la surface de l'océan. Après réflexion, l'onde est captée de nouveau par le satellite. Le temps de parcours fournit une première indication de la distance entre l'altimètre et l'océan. Cette distance est ajustée par diverses corrections liées à la non homogénéité du milieu dans lequel se propage le signal. La position et l'altitude du satellite sont connues via l'utilisation du réseau terrestre du système de localisation Français DORIS (*Doppler Orbitography by Radiopositioning Integrated on Satellite*).

L'altimètre au nadir est le premier type d'altimètre à avoir été embarqué sur les satellites. Le terme "nadir" indique que la mesure est faite à la verticale de l'instrument de mesure. Depuis le lancement de Cryosat2 en avril 2010, il existe deux types d'altimètre au nadir, l'instrument LRM (*Low Resolution Mode*) et l'instrument SAR (*Synthetic Aperture Radar*).

Ces instruments fonctionnent par émissions d'impulsions d'onde de fréquences allant de 35 Ghz (bande Ka) à 3,2 Ghz (bande C). La fréquence la plus utilisée est de 13,6 Ghz (bande Ku). Le choix de la bande est un compromis entre précision de la mesure, puissance du signal, sensibilité aux sources d'erreurs ou encore en lien avec des réglementations internationales. Pour l'altimètre Poseïdon-3, les bandes Ku et C sont utilisées alternativement. Les impulsions émises à la fréquence de 2060 Hz fournissent une information du niveau de la mer tout les 5-10 mètres environ, cette information n'étant pas utilisable telle quelle, les impulsions sont moyennées afin de fournir une mesure tout les 7 kilomètres environ. Ces instruments ont une erreur de mesure dépendante de l'échelle observée (Faugere et al., 2006), cette erreur de mesure varie aussi en fonction des bandes utilisées mais on admet alors une erreur globale de 3cm pour ces instruments.

Les instruments SAR sont des outils récents de mesure altimétrique. Grâce à l'utilisation de l'effet Doppler, l'observation finale de SSH en un point est une combinaison de plusieurs mesures réalisées en ce point mais à des temps et des angles de mesure différents. Dans le cas de Cryosat2, une observation correspond à l'analyse de 220 mesures en ce point. De même que les altimètres LRM, les altimètres SAR ont une erreur de mesure dépendante de l'échelle du phénomène observé. Cependant l'utilisation de l'effet Doppler permet d'atteindre des erreurs d'observation d'environ 1 cm (Gomminger et al., 2013, Dibarboure et al., 2014; Boy et al., 2017).

Ce type d'instrument est amené à se généraliser à bord des satellites d'observation. Sentinel-3 lancé en 2016 en est équipé et Sentinel-6, qui continuera la série d'observation de la lignée Jason, possédera lui aussi un mode de mesure SAR. C'est dans l'objectif de se préparer à l'arrivée de ces instruments que s'inscrit en partie cette étude.

L'altimétrie à large fauchée

Les altimètres à large fauchée (SWOT - *Surface Water Ocean Topography*), sont des-

tinés à apporter une information 2D de la hauteur de mer par rapport aux données le long de la trace des altimètres au nadir. Ils ne seront pas utilisés dans les études présentées ici mais il apparaît important de les mentionner de par la précision des données qu'ils vont apporter à l'océanographie.

Ces instruments se basent sur deux antennes et mesurent des segments perpendiculaires à la trace du satellite, ce qui permet d'augmenter considérablement la résolution spatiale des données. L'enjeu de l'océanographie opérationnelle vis-à-vis de ces instruments est d'anticiper l'arrivée de ces satellites afin d'exploiter au mieux ce nouveau type de données.

2.3.2 Les erreurs liées à la mesure et les corrections apportées

Le signal servant à la mesure altimétrique est émis à grande distance de l'objet observé et est amené à traverser deux fois (aller et retour) l'atmosphère terrestre. L'océan lui-même n'est pas inerte et certains phénomènes peuvent être une source de bruit de mesure de la SSH. Les différentes corrections apportées aux données brutes avant leur utilisation sont résumées ici succinctement. Dans le cadre de cette étude, les données sont simulées et il n'y a donc pas lieu de considérer de telles corrections. Toutefois, il apparaît important de les mentionner.

Les premières erreurs sont liées à l'ionosphère et l'atmosphère traversées par le signal de l'altimètre. La correction ionosphérique est liée à la présence entre 50 et 2000 km d'altitude d'électrons issus de l'ionisation de la haute atmosphère. Cette erreur de quelques centimètres est estimée à partir de modèles de ionosphère ou en utilisant un autre instrument fonctionnant sur une autre bande de fréquence. La deuxième source d'erreur est due à la présence d'eau dans la troposphère qui ralentit le signal émis et reçu par l'altimètre. Cette erreur de troposphère humide est estimée via l'utilisation d'un radiomètre à micro-ondes. De même que l'eau atmosphérique, la variabilité spatiale d'azote et d'oxygène ajoute une source d'erreur au signal. La correction en troposphère sèche est estimée à l'aide de modèles météorologiques.

L'irrégularité de la surface océanique disperse le signal lors de la réflexion. Cette dispersion est analysée par l'altimètre lors de la réception du signal et permet d'estimer ce biais électromagnétique.

Enfin les marées étant un signal que l'on ne souhaite pas assimiler, elles doivent être corrigées en utilisant des modèles de marée océaniques (eux-mêmes contraints par les observations altimétriques). C'est le cas également de certains signaux haute fréquence comme la réponse de l'océan au forçage de pression atmosphérique et de vent que l'on corrige à partir de modèles barotropes. Notons que pour ces derniers signaux qui sont reproduits de façon réaliste dans les modèles mis en œuvre par Mercator Ocean, il est probable qu'à terme il ne soit plus nécessaire de les corriger avant assimilation de données.

2.3.3 Les différentes missions altimétriques

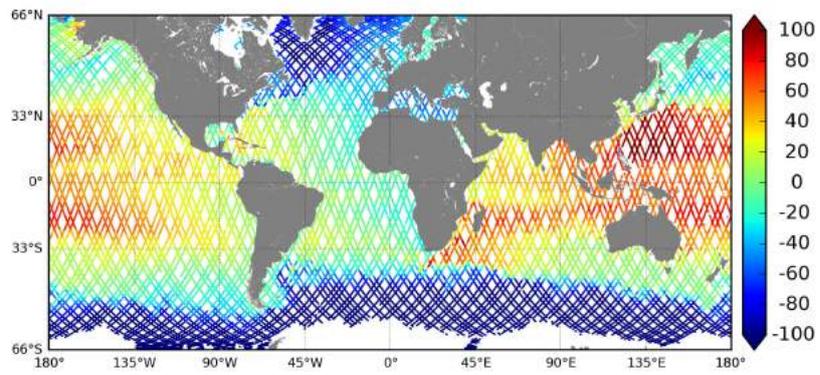
Les missions historiques qui ont marqué l'altimétrie spatiale débutent avec le satellite américains Seasat en 1978, premier satellite ayant embarqué un altimètre à son bord et ayant fourni des données exploitables. En 1985, l'US Navy lance son second satellite dédié à l'observation de l'océan, GEOSAT (GEOdetic SATellite). Le premier satellite européen nommé ERS-1 est mis en opération en 1991. S'en suivent alors une série de plusieurs satellites munis d'altimètres, l'objectif étant l'observation de l'océan à partir de différentes orbites mais aussi la combinaison de plusieurs jeux de données afin de permettre des mesures de plus grande précision. Dans cette étude, les données altimétriques sont issues de trois satellites. Les deux premiers, Jason1 (2001-2013) et Jason2 (2008-présent) embarquent respectivement les altimètres Poséidon-2 et Poséidon-3 basés sur une émission bi-fréquence (Ku,C : 13,575 et 5,3 GHz). Les orbites de ces deux satellites sont semblables (66° par rapport à l'équateur) mais décalées dans le temps, elles sont dites répétitives à 10 jours, c'est à dire qu'un même point est observé tout les 10 jours.(Fig. 2.3a 2.3b)

Le troisième satellite se nomme Envisat (2002-2012) qui embarque l'altimètre RA-2 émettant en bi-fréquence (Ku,S : 13,575 et 3,2 GHz). Son orbite de $98,55^\circ$ est répétitive à 35 jours. La figure 2 montre la similitude des traces sur 7 jours entre Jason1 et Jason2 ainsi que la différence notable avec Envisat. On comprend alors l'intérêt de combiner ces différentes sources de données afin d'obtenir une meilleure description de l'état de l'océan. L'avenir de l'altimétrie satellitaire est représenté par les satellites à large fauchée tels que SWOT (*Surface Water Ocean Topography*). Ce satellite dédié à l'hydrologie (eaux terrestres) et à l'océanographie est un satellite à large fauchée dont le lancement est programmé pour un lancement en 2021.

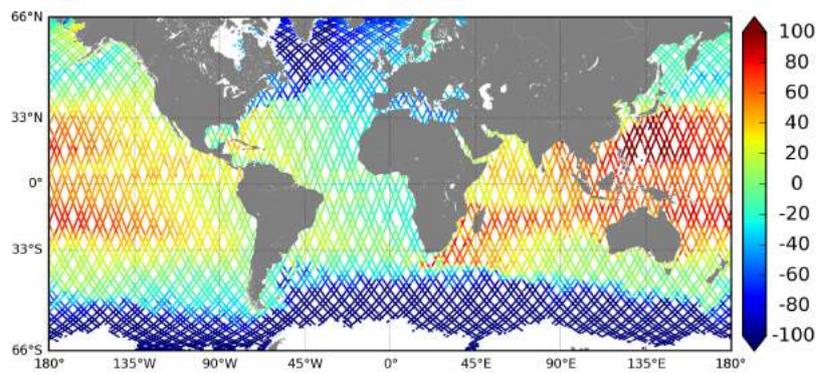
Bien que déjà embarqués à bord de certains satellites (Cryosat2, Sentinel 3), les altimètres SAR apportent une donnée plus précise que la technologie LRM, et permettront à terme de meilleures analyses et prévision de l'océan. Les nouveaux instruments SAR seront embarqués sur le satellite Jason-CS/Sentinel-6 prévu pour 2020.

2.3.4 Autres mesures satellitaires

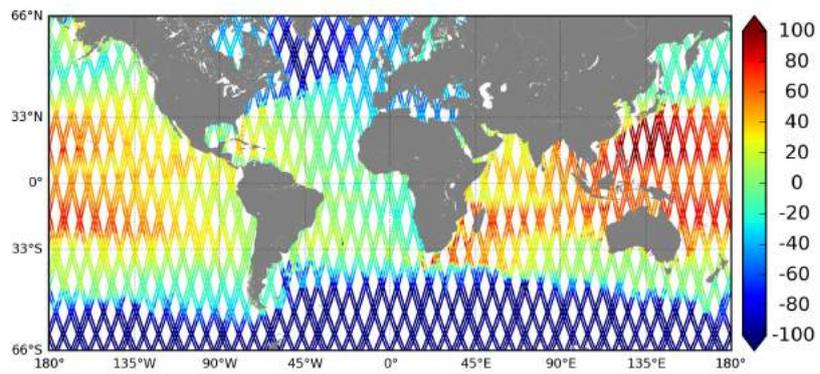
Les satellites permettent aussi de mesurer d'autres variables océaniques très importantes pour l'analyse et la prévision océanique (voir Le Traon et al.,2015, pour une revue récente). Ces grandeurs, telles que la température de surface (SST - Sea Surface Temperature) mesurée par radiométrie infra-rouge et micro-onde, la salinité de surface (SSS – Sea Surface Salinity) mesurée par radiométrie et micro-ondes, la couleur de l'eau (proxy de la chlorophylle contenue dans le phytoplancton) utile pour les études de biogéochimie marine ou encore la vitesse des vents de surface sont aussi utilisés dans les systèmes d'analyse et de prévision océanique.



(a)



(b)



(c)

FIGURE 2.3 – Traces de Jason1 (a) Jason2 (b) et Envisat (c) sur une semaine

2.3.5 Les mesures in situ issues des profileurs Argo

Depuis l'année 2000, la Commission Océanographique Intergouvernementale de l'Unesco (COI) et l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) pilotent le programme Argo qui consiste à maintenir un réseau de flotteurs/profileurs autonomes à la surface du globe. Chaque année les 30 états participants au programme mettent en fonctionnement 800 à 900 instruments aux quatre coins du globe. A l'heure actuelle (2016) sont recensés (Fig. 2.4) environ 3800 flotteurs Argo, 20 Deep-Argo (voir ci-dessous pour les précisions) et 300 Bio-Argo.

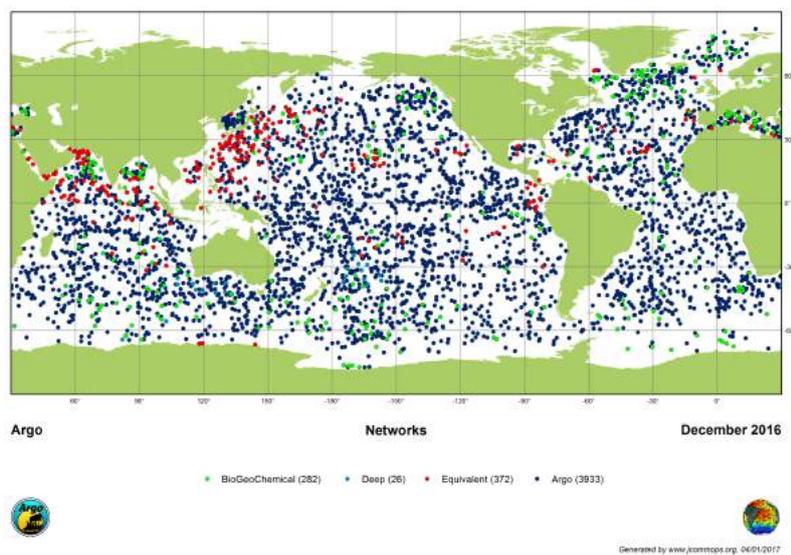


FIGURE 2.4 – Etat de la flotte Argo en Décembre 2016 (vert : Bio-Argo, bleu clair : Deep-Argo, bleu : Argo et rouge : Equivalent Argo).(Source : www.jcommops.org).

Depuis leur déploiement, les flotteurs Argo sont un élément essentiel du GOOS (*Global Ocean Observing System*) qui permet de suivre, comprendre et prévoir l'impact de l'océan sur le climat mondial. De par leurs mesures en profondeur, les flotteurs ont permis une meilleure estimation du contenu de chaleur des couches profondes, une plus grande compréhension de l'élévation du niveau des mers ou encore une analyse plus fine de la circulation dans les zones de convection profonde.

Variabiles observées

Il existe deux grands types de profileurs, les profileurs physiques, et les profileurs bio-géochimiques. Les premiers observent la température, salinité et pression, les nitrates, le flux solaire disponible tandis que les seconds mesurent l'oxygène, la fluorescence (proxy de la chlorophylle), les nitrates et le flux solaire disponible pour le phytoplancton (PAR - *Photosynthetically Active Radiation*) et d'autres paramètres biooptiques (Claustre et al., 2010 ; D'Ortenzio et al., 2014). Ces derniers sont des outils récents en océanographie.

Principe de mesure

Les profileurs sont des outils de mesure autonomes réalisant des profils verticaux à travers la colonne d'eau et ce jusqu'à 2000 m pour les flotteurs classiques et 4000 m ou 6000 m pour les derniers modèles afin d'aller explorer l'océan profond (Deep-Argo). Les instruments suivent dans leur grande majorité un cycle périodique de 10 jours (voir 2.5).

En premier lieu, l'instrument opère une plongée, grâce au contrôle mécanique de sa flottabilité, jusqu'à 1000 m de fond. S'en suit une dérive le long des courants de 8 à 10 jours, période au bout de laquelle le profileur plonge à 2000 m puis remonte à la surface. C'est lors de cette remontée que les instruments font les mesures en échantillonnant la colonne d'eau tous les mètres. Une fois la surface atteinte, l'instrument transmet les données par satellite aux centres d'assemblage de données qui réalisent alors un traitement et un contrôle de qualité de ces données.

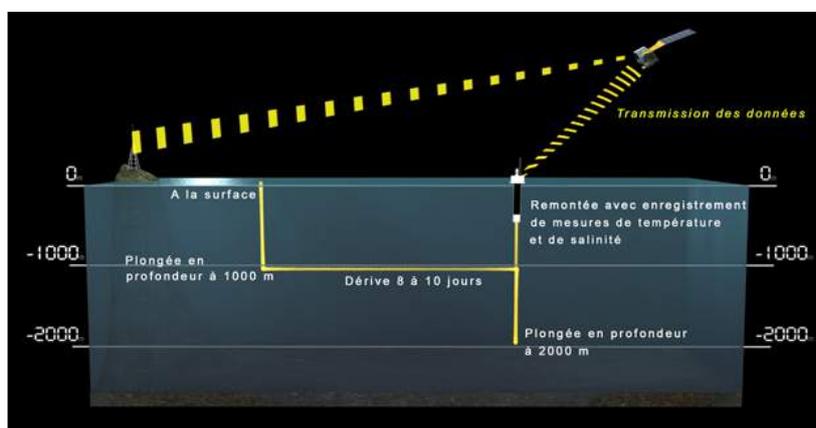


FIGURE 2.5 – Principe de la mesure de profils Argo. (Source : www.naos-equipex.fr).

2.3.6 Autres types de mesures in situ

En plus des flotteurs Argo, il existe de nombreux instruments in situ (Roemmich et al., 2001 ; Roemmich et al., 2008 ; Riser et al., 2016). On trouve notamment les mouillages et bouées fixes principalement employées aux tropiques et dédiés à l'étude et la prévision de phénomènes climatiques comme El Niño/La Niña. Ensuite, les gliders, ou planeurs sous-marins planent en suivant une trajectoire en dent de scie jusqu'à une destination pré-établie. Ils permettent de mesurer des grandeurs in situ du même type que les flotteurs Argo. Il existe ensuite des réseaux de marégraphes (e.g RONIM géré par le SHOM en France) fournissant en temps réel des données de niveau de la mer à la côte. Enfin les campagnes océanographiques (trajets non répétitifs) et certains navires marchands (trajets plus fréquents et réguliers) permettent de contribuer au réseau d'observation global.

2.4 Le système d’assimilation de données de Mercator Ocean

Le Système d’Assimilation Mercator (SAM-2) est le code numérique d’assimilation des données utilisé au sein des systèmes de prévisions et d’analyse de Mercator Océan.

Certains points théoriques sont détaillés ci-après afin de comprendre les choix fait au sein de SAM-2, notamment la théorie du filtre de Kalman sur laquelle s’appuie SAM-2.

L’assimilation de données est un problème aussi ancien que la prévision des phénomènes météorologiques et plus récemment, océanographiques. Du fait de la complexité de la dynamique des fluides géophysiques, il est impossible de décrire parfaitement l’évolution de ces phénomènes au cours du temps par les équations numériques. Ces imperfections engendrent des divergences entre les modèles numériques et la réalité. Il est donc important de contraindre le modèle à rester proche de la réalité via l’utilisation d’observations altimétriques et in situ. L’assimilation de données permet ainsi la mise en relation du phénomène à prévoir via le modèle numérique (voir Section 2.2), avec les observations faites au sein du milieu (voir Section 2.3) tout en tenant compte des erreurs respectives de ces deux éléments.

2.4.1 Le Singular Evolutive Ensemble Kalman filter

Le *Singular Evolutive Ensemble Kalman filter* (SEEK), décrit par Pham et al., (1998) est une application pratique du filtre de Kalman (Kalman, 1960). Ce dernier, de par sa complexité est difficilement applicable dans un cadre opérationnel. Le SEEK permet une utilisation de cette méthode appliquée aux grands systèmes non linéaires tels que l’atmosphère ou l’océan. A Mercator Océan, le filtre utilisé est lui même une évolution du SEEK qui permet une économie de temps de calcul.

2.4.1.1 Vecteurs d’état et d’observation

Le vecteur d’état d’un modèle numérique d’océan est le vecteur contenant la totalité des variables permettant de décrire complètement le système. Dans les configurations utilisées, ce vecteur contient la hauteur de mer (SSH), la température (T), la salinité (S) et les vitesses (U et V).

Le vecteur d’observation contient quant à lui l’ensemble des observations. Ces observations peuvent décrire soit des variables pronostiques (calculées par le modèle) soient des variables diagnostiques (calculée grâce aux variables précédentes) au sein du modèle.

Pour cette étude, les variables observées seront des traces altimétriques de niveau de la mer (SSH) et des profils verticaux de température (T) et de salinité (S).

2.4.1.2 Cas général du Filtre de Kalman

Dans le cadre de la prévision océanique et en reprenant les notations de Ide et al. (1997) on définit :

- x_t : Vecteur d'état de l'océan vrai, inconnu par nature
- y_o : Vecteur des observations de cet état vrai de l'océan, de dimension p et d'erreur $e_o = y_o - \mathbf{H}x_t$
- d : Vecteur des innovations, correspondant à l'écart entre les observations et la prévision, de dimension p , $d = y_o - \mathbf{H}x_f$
- x_a : Vecteur d'état de l'océan analysé, après l'assimilation de données de dimension n et d'erreur e_a
- x_f : Vecteur d'état de l'océan prévu à partir de l'analyse précédente de dimension n et d'erreur $e_f = x_f - x_t$
- \mathbf{H} : Opérateur d'observation permettant de passer de l'espace du modèle à celui des observations, de dimension $p.n$
- \mathbf{R} : Matrice de covariance d'erreur d'observation, de dimension p^2
- \mathbf{P}_a : Matrice de covariance d'erreur d'analyse, de dimension n^2
- \mathbf{P}_f : Matrice de covariance d'erreur de prévision, de dimension n^2
- $M_{i \rightarrow i+1}$: Opérateur modèle de prévision de la date i à $i + 1$
- $\mathbf{M}_{i \rightarrow i+1}$: Opérateur modèle linéarisé autour de i
- \mathbf{Q} : Matrice de covariance d'erreur du modèle, de dimension n^2

Algorithme du filtre de Kalman : Au temps i , l'algorithme de Kalman est une succession de calculs allant de la prévision à l'analyse de l'état de l'océan :

Prévision :

$$x_f(i+1) = \mathbf{M}_{i \rightarrow i+1} x_a(i) \quad (2.8)$$

$$\mathbf{P}_f(i+1) = \mathbf{M}_{i \rightarrow i+1} \mathbf{P}_a(i) \mathbf{M}_{i \rightarrow i+1}^T + \mathbf{Q}(i) \quad (2.9)$$

Calcul de la matrice de gain \mathbf{K} :

$$\mathbf{K}(i) = \mathbf{P}_f(i) \mathbf{H}^T(i) [\mathbf{H}(i) \mathbf{P}_f(i) \mathbf{H}^T(i) + \mathbf{R}(i)]^{-1} \quad (2.10)$$

Calcul de l'état analysé :

$$x_a(i) = x_f(i) + \mathbf{K}d(i) \quad (2.11)$$

Matrice de covariance d'analyse :

$$\mathbf{P}_a(i) = (\mathbf{I} - \mathbf{K}(i)\mathbf{H}(i))\mathbf{P}_f(i) \quad (2.12)$$

2.4.1.3 Le système d'assimilation SAM-2 utilisé à Mercator Océan

Le système d'assimilation de données SAM-2 utilisé à Mercator Océan est une variante du filtre SEEK mais pour lequel il a été décidé, afin d'économiser le temps de calcul, de ne plus propager la matrice \mathbf{P}_a dans le modèle pour calculer \mathbf{P}_f . Par ailleurs, une matrice de covariance d'erreur d'analyse ou de prévision est, nous l'avons vu, de dimension n^2 soit, pour ce qui est des simulations utilisant une grille au $1/4^\circ$, une matrice contenant plus de 10^{16} éléments. Appliquer le modèle à de tels tableaux a un coût numérique inenvisageable dans le cas de systèmes opérationnels, il a donc été fait le choix d'utiliser une base fixe de vecteur permettant une approximation rapide de la matrice \mathbf{P}_f nécessaire lors du calcul de \mathbf{K} . Cette méthode dite de réduction d'ordre a notamment été utilisé par Oke et al. (2008).

Cette base fixe de vecteurs appelés modes ou anomalies est calculée à partir d'une simulation libre. Ces anomalies sont la différence entre un état de l'océan moyenné sur une fenêtre de 40 jours et l'état de cette même simulation au jour du centre de la fenêtre. Cette méthode permet de collecter une grand quantité de modes permettant de définir la matrice. Les modes sont sélectionnés en fonction de la date à laquelle à lieu l'analyse afin que la matrice soit cohérente avec la variabilité climatique de l'océan.

En pratique on définit la matrice de covariance d'erreur de prévision \mathbf{P}_f telle que :

$$\mathbf{P}_f = \mathbf{S}_f \mathbf{S}_f^T \quad (2.13)$$

Où \mathbf{S}_f est une matrice de rang mr où r est le nombre d'anomalies sélectionnées. Cette matrice contient donc tous les modes retenus pour l'assimilation. En reprenant les formules précédentes, on obtient la nouvelle formulation de l'état analysé (les indices de date ont été retiré) :

$$x_a = x_f + \mathbf{S}_f \mathbf{S}_f^T \mathbf{H}^T [\mathbf{H} \mathbf{S}_f \mathbf{S}_f^T \mathbf{H}^T + \mathbf{R}]^{-1} [y_o - \mathbf{H} x_f] \quad (2.14)$$

Cette formulation apparaît alors sous la forme :

$$x_a = x_f + \gamma \mathbf{S}_f \quad (2.15)$$

avec :

$$\gamma = \mathbf{S}_f^T \mathbf{H}^T [\mathbf{H} \mathbf{S}_f \mathbf{S}_f^T \mathbf{H}^T + \mathbf{R}]^{-1} [y_o - \mathbf{H} x_f] \quad (2.16)$$

On comprend alors que l'enjeu de l'étape d'assimilation est de déterminer un vecteur de scalaire γ de dimension r . Les éléments de γ sont donc les coefficients d'une combinaison

linéaire des modes choisis pour le cycle d’analyse.

Cette correction est multivariée, c’est-à-dire que le système est capable de corriger des variables non observées. Une observation du niveau de la mer pourra ainsi se traduire par une correction de la température, salinité et des vitesses.

2.4.2 Durée d’un cycle et Incremental Analysis Update (IAU)

Les cycles d’analyse ont des durées de 7 jours. Lors de l’étape d’analyse une correction à apporter au modèle est calculée tous les 7 jours. Afin d’obtenir un état analysé le plus continu possible a été mis en place l’*Incremental Analysis Update* (IAU) (Bloom, 1996). C’est la stratégie adoptée pour pallier aux “sauts” d’analyse liés à l’utilisation d’une méthode d’analyse séquentielle.

Une fois la correction calculée, elle est appliquée linéairement chaque jour du cycle sous forme de termes correctifs dans les équations du modèle. On obtient alors un état continu de l’océan sans ressaut entre le dernier jour d’un cycle et le premier du cycle suivant. En revanche les états prévus restent discontinus (Fig. 2.6).

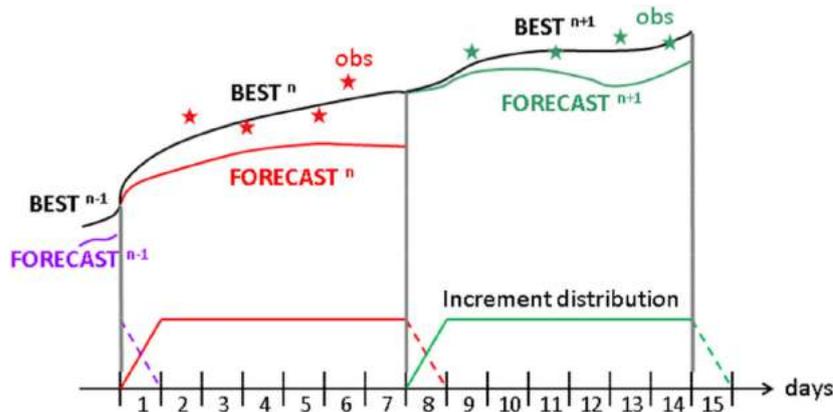


FIGURE 2.6 – Représentation schématique de l’IAU pour trois cycles consécutifs. BEST représente l’analyse. (Lellouche et al 2013).

2.4.3 Retour sur l’opérateur d’observation H

Comme l’indiquent les équations précédentes l’opérateur d’observation permet le calcul du vecteur d’innovation à partir duquel sera calculée l’analyse. Classiquement, dans les systèmes Mercator Océan, la donnée de niveau de la mer assimilée est une SLA (voir Section 2.3.1) corrigée des différentes sources d’erreurs possibles (Le Traon et al. 2001). Pour pouvoir calculer l’innovation, il faut alors retirer une topographie dynamique moyenne (MDT) au modèle.

Dans le cadre opérationnel, une MDT dérivée des observations et ajustée pour être compatible avec la dynamique du modèle (Lellouche et al., 2013) est utilisée.

Aussi il est important de souligner les différences entre le système opérationnel et l’adaptation qui en a été faite ici. Les observations altimétriques simulées sont des

observations moyennes sur 24h. De plus ce ne sont pas des observations de SLA mais de SSH. Ceci implique qu'il n'est plus nécessaire de retirer une MDT lors du calcul de l'équivalent modèle. L'opérateur d'observation est réduit à une interpolation spatiale bilinéaire de l'observation et au calcul de la moyenne journalière de la SSH du modèle. On se trouve alors dans une situation très différente du cas opérationnel où l'opérateur d'observation est beaucoup plus complexe. En effet, les données altimétriques assimilées en routine issues du système DUACS sont corrigées, en particulier, des signaux hautes fréquences correspondant à la réponse barotrope de l'océan à la dynamique rapide de l'atmosphère (vent et pression).

Concernant les pseudo-observations de profils de T et S, faites à partir de sorties numériques journalières, l'approximation est différente. Dans le cas de ces variables, l'opérateur d'observation est aussi très simple étant donné que T et S sont des variables des équations du modèle. L'opérateur d'observation correspond donc à une interpolation bilinéaire en espace sur l'horizontale aux points T de la grille du modèle et par une spline sur les points de la grille verticale du modèle.

2.4.4 Matrices de covariance d'erreurs d'observation, de prévision et adaptativité

2.4.4.1 Matrice de covariance d'erreur d'observation

Ces matrices d'erreurs doivent être renseignées dans le système afin d'effectuer l'assimilation, c'est pourquoi il est important de préciser les informations qu'elles contiennent (Lellouche et al., 2013). La matrice \mathbf{R} est la covariance de e_o soit, $\mathbf{R} = \langle e_o e_o^T \rangle$. Elle contient deux types d'erreur :

- L'erreur de mesure liée à l'instrumentation et aux post-traitements effectués sur les jeux d'observations. Dans le cas de cette étude, cette erreur est simulée et ajoutée aux observations. Elle rentre dans le système d'assimilation sous forme de carte d'écart type de cette erreur. Concernant les mesures altimétriques, cette erreur de mesures est spécifiée comme une constante égale à 1 cm ou à 3 cm suivant le type d'observations utilisées (SAR et LRM respectivement, voir Section 2.3.1). Pour la température, les variances d'erreurs sont spécifiées via une formule empirique fonction de la profondeur issue d'une paramétrisation du système opérationnel :

$$error_T(z) = 0.3 - \frac{0.2(z - 200)|z - 200|}{(z - 200)^2 + 400} \quad (2.17)$$

L'erreur de salinité est considérée constante à 0.1 psu en écart-type. Un système de pondération permet ensuite d'appliquer un coefficient multiplicatif à ces deux dernières variances d'erreur (en T et S) afin de tenir compte des observations indépendamment de la présence de corrélations entre elles sur la verticale. Cette

formulation simplifiée avait été mise en œuvre dans les premiers systèmes d’assimilation de Mercator Océan. Les systèmes actuels utilisent des cartes 3D d’erreurs en température et salinité.

- L’erreur de représentativité de SSH permet de prendre en compte les erreurs liées à l’incapacité du modèle à pouvoir représenter certaines échelles. Dans cette étude, les données “vraies” sont issues d’un océan numérique sur une grille au $1/12^\circ$ et assimilées dans un modèle au $1/4^\circ$. L’erreur de représentativité représente les erreurs commises par le modèle à $1/4^\circ$ vis-à-vis du modèle au $1/12^\circ$. Cette erreur est aussi fournie au système sous la forme d’une carte d’écart-type en mètres.

Lors des simulations au $1/4^\circ$ (voir Section 3.5) il a été nécessaire d’ajouter une carte d’erreur à la côte afin de limiter l’impact des observations près des rivages menant à une explosion en vitesses du modèle (Fig. 2.7).

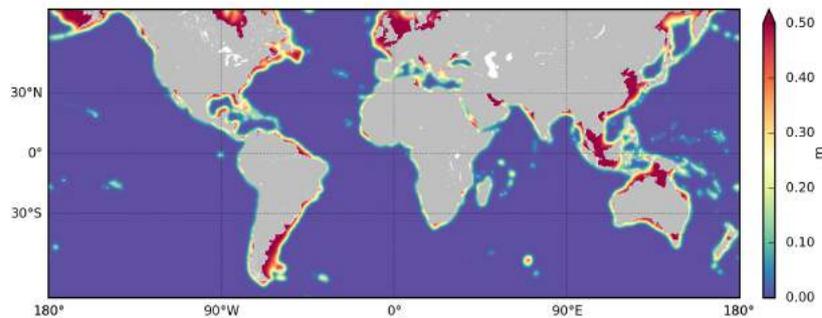


FIGURE 2.7 – Carte d’écart-type d’erreurs de SSH (en m) utilisée afin de définir la matrice à la côte dans les simulations au $1/4^\circ$.

2.4.4.2 Matrice d’erreur de prévision

La matrice \mathbf{P}_f décrite ci-dessus est susceptible d’évoluer en fonction des modes choisis lors des différents cycles. Cette matrice étant basée sur les anomalies, c’est une approximation d’une matrice plus réaliste mais coûteuse à déterminer. Cette matrice est donc une source potentielle d’erreurs dans l’assimilation.

2.4.4.3 Le schéma adaptatif

C’est un diagnostic formulé par Talagrand (1999) qui permet d’adapter dynamiquement la matrice \mathbf{P}_f à \mathbf{R} . Sans rentrer dans la formulation mathématique de ce calcul, il permet, avant l’analyse, d’évaluer un coefficient à appliquer à \mathbf{P}_f si son amplitude est estimée inadaptée à \mathbf{R} (Lellouche et al., 2013).

2.4.5 La correction de biais

Lorsque des données in situ (T et S) sont assimilées, une correction de grande échelle des dérives du modèle est appliquée aux champs profonds (Lellouche et al.,

2013). Cette correction est basée sur une approche 3D-Var qui utilise les innovations en T et S collectées sur les trois derniers mois disponibles. Cette correction est efficace surtout sous la thermocline et loin des gradients de densité. Elle est injectée dans le modèle sous la forme d'incrémentes en T, S et hauteur dynamique dans les équations du modèle.

2.4.6 Mise en place pratique au sein des systèmes Mercator

Les paragraphes suivants abordent rapidement les stratégies adoptées afin de réduire au maximum le temps de calcul d'un cycle tout en sacrifiant le moins possible d'informations apportées par les données.

2.4.6.1 Canevas réduits

Afin d'économiser du temps de calcul, l'assimilation n'est pas faite à chaque point de maille. En effet, en plein océan, seul un point sur 4 est utilisé, puis en se rapprochant de la côte, le maillage est affiné, d'abord en assimilant un point sur 2 et enfin très près de la côte sur tous les points de grille. Là où l'assimilation n'a pas été faite, les corrections à apporter au modèle sont déterminées par combinaison linéaire des corrections faites à proximité.

2.4.6.2 Corrélation spatiale et temporelle

Du fait de la dynamique océanique, il existe des échelles de corrélation spatiale et temporelles qui permettent de déterminer si une observation aura un impact significatif sur le modèle au point d'analyse en fonction de sa distance à ce point. C'est pourquoi, ici seules les observations de proximité sont conservées autour du point d'analyse. La distance au delà de laquelle une observation n'est pas considérée est déterminée via des cartes de corrélation zonale, méridionale et temporelle. Des bulles d'influence sont ainsi fabriquées et permettent la sélection des observations pour un point d'analyse. Le poids donné aux observations est une fonction décroissante de la distance. Une observation proche du point d'analyse aura un poids proche de 1 alors qu'une observation en périphérie de la bulle aura un poids proche de 0.

2.5 Conclusion

Tout d'abord, Le modèle NEMO-OPA a été choisi pour cette étude pour deux objectifs :

- C'est le modèle employé à Mercator Océan dans les systèmes de prévision et d'analyse. c'est donc ce modèle qui a été utilisé pour les expériences menées pour cette étude.
- Il a été choisi afin de créer une simulation "naturelle" ou Nature Run, essentielle dans les expériences d'études d'impacts de jeux d'observations futurs. Le rôle de cette simulation est décrit en Section 3.4.1 .

Ce choix a été bien sûr motivé par des raisons pratiques mais aussi pour la capacité de ce modèle a reproduire la mesoéchelle océanique. Il est employé avec deux résolutions spatiales, l'une au $1/4^\circ$ et la seconde au $1/12^\circ$.

Ensuite, chacun des jeux de données présentés précédemment sont dédiés à différents enjeux de l'océanographie opérationnelle :

- L'altimétrie : Que ce soit en mode SAR ou LRM, les données altimétriques permettent une description détaillée de la principale échelle dynamique océanique, la mésoéchelle. Nous comprenons alors l'importance de ces observations dans la prévision et l'analyse de ces phénomènes.
- Les profileurs Argo : Orientés vers des observations de phénomènes à plus large échelle, ces mesures permettent d'améliorer la description dynamique de l'océan mais aussi l'étude de phénomènes saisonniers et climatiques. Ils fournissent des informations très complémentaires à l'altimétrie satellitaire.

Enfin, bien que basé sur une méthode répandue dans le monde de l'assimilation de données (Filtre de Kalman), SAM-2 a nécessité des adaptations pratiques (e.g modes, réduction d'ordre, IAU) afin d'être employé dans le cadre d'analyses et de prévisions océaniques. Le système d'assimilation est le maillon qui permet de faire le lien entre le modèle et les données. Son importance est donc essentielle dans la transmission des informations observées afin d'obtenir des prévisions et analyses précises de l'état de l'océan. La correction multivariée permet d'obtenir un état corrigé de l'océan même si un unique type de donnée est assimilé (e.g hauteur de mer fournie par l'altimétrie). C'est ce que nous avons mis en lumière dans une série d'expériences courtes dans la Section 3.6.

Chapitre 3

Mise en place et présentation des expériences d'OSSEs

Sommaire

| | | |
|------------|---|-----------|
| 3.1 | Introduction | 37 |
| 3.2 | Observations altimétriques | 38 |
| 3.3 | Observations de température et de salinité | 41 |
| 3.4 | Les simulations libres | 44 |
| 3.4.1 | Le Nature Run | 44 |
| 3.4.2 | Le run libre au 1/4° | 44 |
| 3.4.3 | Le run libre au 1/12° | 44 |
| 3.4.4 | Étude dynamique comparée des simulation libres | 45 |
| 3.5 | Les expériences d’assimilation | 49 |
| 3.5.1 | OSSEs altimétriques | 49 |
| 3.5.2 | OSSEs combinées : altimétrie et in situ | 52 |
| 3.6 | Tests de sensibilité de SAM-2 | 53 |
| 3.6.1 | Mise en place des expériences | 54 |
| 3.6.2 | Étude de la correction multivariée | 54 |
| 3.6.3 | Étude de l’impact des modes et de la taille de la bulle d’analyse | 57 |

3.1 Introduction

Les OSSEs se déroulent dans un cadre très théorique. En effet, dans notre cas, les jeux d'observations sont synthétisés à partir d'un océan numérique nommé Nature Run. L'intérêt est d'utiliser des jeux de données proches des jeux utilisés dans le cas réel. C'est pourquoi sont décrites ici les techniques employées afin de recréer des observations proches de la réalité.

Dans un premier temps seront expliqués les jeux de données ainsi recréés de même que leur erreurs respectives. Ensuite nous étudierons les différentes simulations libres ayant servi de référence. Nous développerons enfin les expériences d'assimilation à proprement parlé ainsi que les adaptations faites dans le système d'assimilation afin que ce dernier soit cohérent avec les observations assimilées.

Une dernière partie exposera des résultats préliminaires issus de courtes expériences. Ces expériences ont mis en lumière le fonctionnement du système d'assimilation (SAM-2) et sa sensibilité à la modification de certains paramètres. L'idée de ces expériences est aussi de faire une validation rapide du système d'assimilation de données avant son utilisation dans le cadre théorique des OSSEs.

3.2 Observations altimétriques

Ci-dessous est décrite la méthode de simulation des observations et de leurs erreurs afin d’obtenir deux jeux de données, l’un de type LRM et l’autre de type SAR.

Plutôt que de simuler les positions des observations altimétriques à partir des caractéristiques de différents satellites, nous avons choisi d’utiliser les positions des observations des satellites Jason2, Envisat et Jason1. Cette méthode a l’avantage d’être plus facile à mettre en place mais si certaines observations manquent dans les jeux de données réels, elles seront absentes des jeux d’observations simulés.

Les données altimétriques sont extraites à partir des moyennes journalières du Nature Run aux points d’observations réels issus des fichiers d’observations utilisés en entrée des systèmes opérationnels. Les observations sont faites tous les 7 kilomètres le long de la trace. Les points de mesure n’étant pas situés à l’exacte position des points de grille, il est nécessaire d’interpoler les quatre points de grille les plus proches de l’observation grâce à une méthode bilinéaire en espace.

Les observations extraites via la méthode expliquée précédemment ne sont pas réalistes dans le sens où elles contiennent la valeur exacte du Nature Run. Comme détaillé dans la Section 2.3.2, il existe différentes sources d’erreurs pour les observations altimétriques qu’il convient de prendre en compte ici.

Deux jeux de données, l’un LRM et l’autre SAR, doivent être simulés. Ces jeux se distinguent l’un de l’autre par la précision des données qu’ils contiennent, aussi les erreurs d’observation sont différentes.

La modélisation de ces erreurs se fait par ajout d’un bruit blanc gaussien aux jeux de données simulés.

Le choix de ces distributions normales de l’erreur correspond aux résultats expérimentaux issus des études des deux types de capteurs. Gomminger et al. (2013), montrent un bruit résiduel de 1 cm pour l’instrument SAR de Cryosat2. Concernant les observations type LRM, Thibaut et al. (2013) montrent un bruit blanc résiduel de 3 cm lors d’un échantillonnage le long de la trace à 1 Hz soit 6-7 km. En accord avec la bibliographie, un bruit blanc gaussien d’écart-type 1 cm est donc ajouté pour les observations simulant des données SAR, et 3 cm pour les données LRM. Les histogrammes des erreurs ajoutées aux données simulées pour les observations de type SAR et LRM ainsi que les lois normales théoriques associées sont présentées en Fig. 3.1.

La Fig. 3.2 montre l’impact des deux bruits blancs gaussiens appliqués aux observations sur l’échelle d’une semaine et dans une zone de l’Atlantique Nord.

Cette méthode de bruitage permet d’obtenir des jeux d’observations invariant d’une expérience à l’autre lorsqu’ils sont utilisés. C’est à dire que d’une simulation à l’autre, pour un type de données considéré (LRM ou SAR), les observations issues de chaque satellite seront les mêmes.

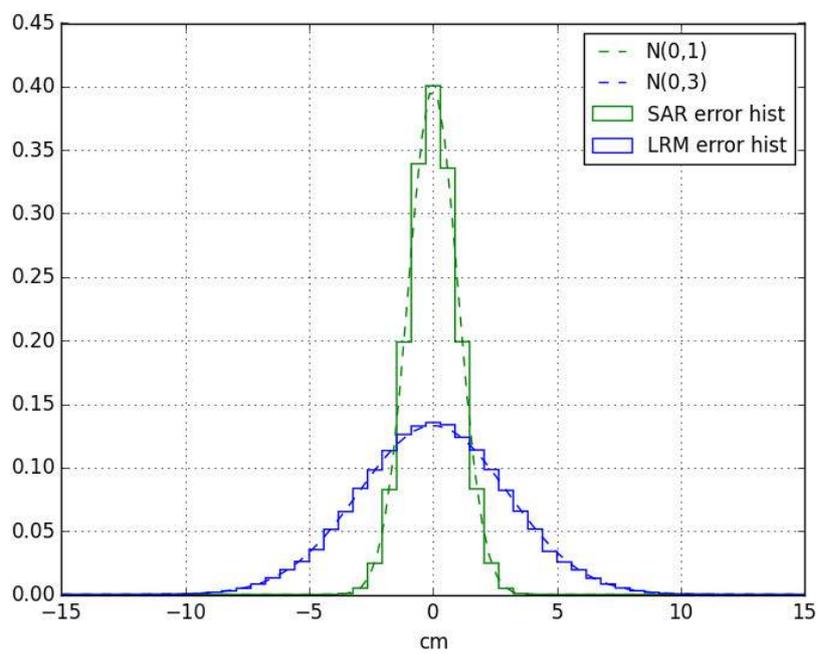
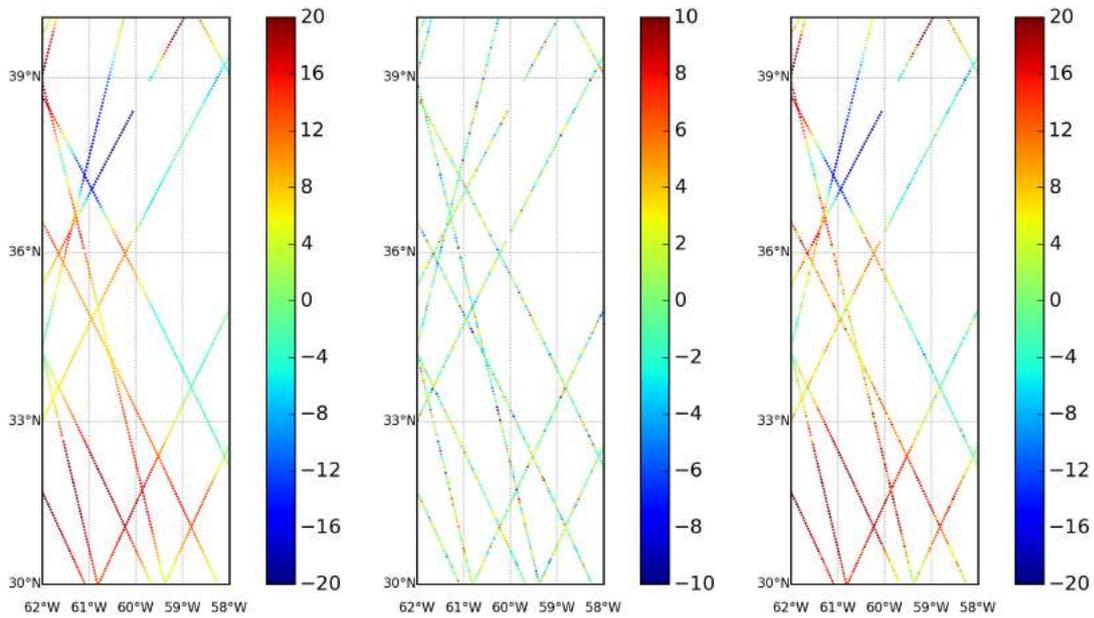
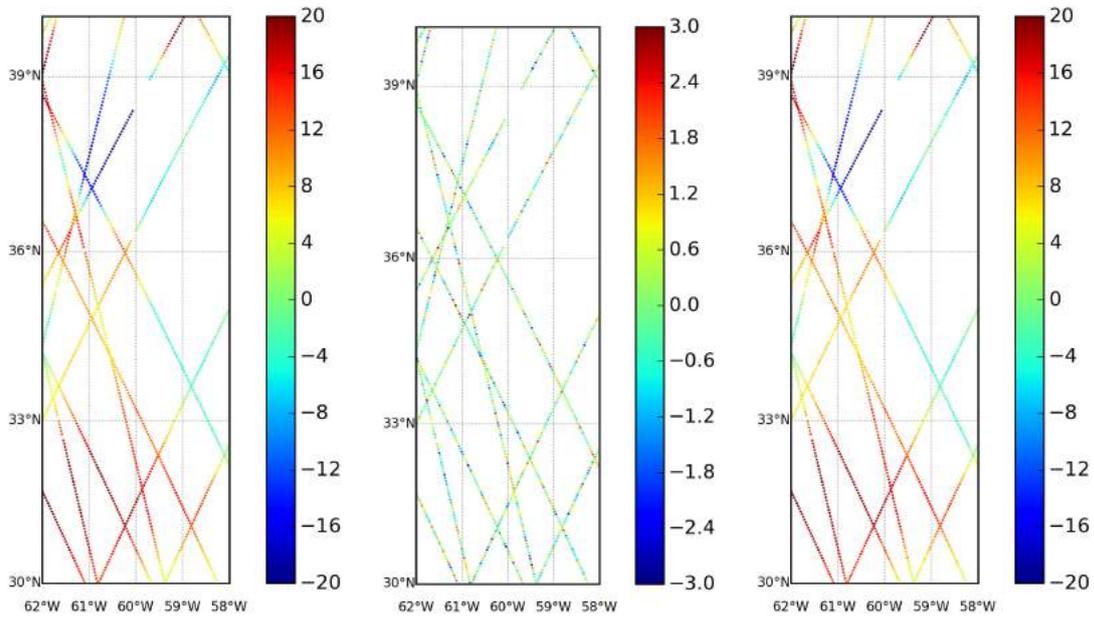


FIGURE 3.1 – Histogrammes des erreurs ajoutées aux données altimétriques simulées et lois normales théoriques associées pour Jason1.



(a) Observations sans bruit. (b) Bruit blanc gaussien ($\sigma=3$ cm). (c) Observations bruitées typées LRM.



(d) Observations sans bruit. (e) Bruit blanc gaussien ($\sigma=1$ cm). (f) Observations bruitées typées SAR.

FIGURE 3.2 – Bruitage des observations issues des trois altimètres pour la semaine du 8 au 14 Juillet 2009.

3.3 Observations de température et de salinité

Sur le même principe que pour les observations altimétriques, des profils verticaux de température et de salinité ont été simulés à partir des moyennes journalières du Nature Run. L'intérêt étant de caractériser l'apport de données de température et de salinité en profondeur au système d'assimilation comparé aux expériences où seule l'altimétrie est considérée. Le choix a été fait de ne pas recréer un jeu complet de flotteurs Argo. Les positions des profils sont issues de positions des profils du système réel. Cette méthode est rapide à mettre en place mais présente l'inconvénient de fournir un jeu de données non réaliste vis-à-vis du Nature Run.

En effet, dans le système réel, les trajectoires des profileurs sont contraintes par les structures dynamiques de l'océan, contrairement aux satellites. Ici ce déplacement dû à la dynamique océanique n'a pas été pris en compte et les positions des profils sont liées à la dynamique de l'océan réel et non pas à celle du Nature Run. A contrario, cela donne des positions réalistes vis-à-vis de l'océan "vrai" et des contraintes de déplacement.

L'un des objectifs de cette étude est d'observer l'impact qu'aurait l'augmentation du nombre de profils assimilés dans les courants de bord ouest ainsi qu'à l'équateur. Ce type de déploiement des profileurs Argo a été proposé par la *steering team* du programme international Argo et est décrit sur la plate-forme JCOMMOPS (*Joint technical Commission for Oceanography and Marine Meteorology in situ Observing Platform Support*) afin d'améliorer les prévisions océaniques et climatiques, comprendre les interactions océan-atmosphère et prédire la variabilité climatique saisonnière et décennale. Ces prescriptions se basent notamment sur les travaux de Qiu et al. (2012).

Afin d'augmenter le nombre de profils dans ces régions, cette étude se base sur la carte fournie par le JCOMMOPS (Fig. 3.3).

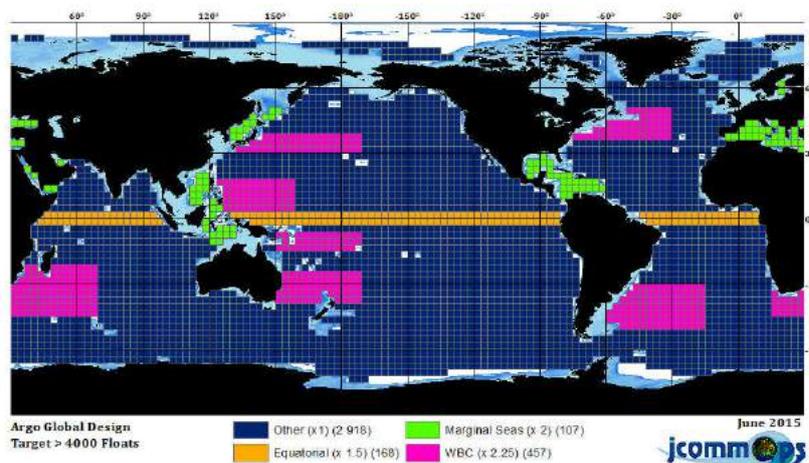


FIGURE 3.3 – Prescription de JCOMMOPS quant à l'augmentation du nombre de profils dans les courants de bord ouest ainsi qu'à l'équateur. (Source : www.jcommops.org).

Les coefficients multiplicateurs indiqués sur la carte n'ont pas été exactement respectés du fait de la méthode employée pour simuler les observations (voir Section 3.3).

Des jeux existants de positions de profils ont été utilisés afin de recréer des observations du Nature Run. Dans le cas où un jeu simple de flotteurs Argo est utilisé, les positions des flotteurs de l'année 2009 sont exploitées. Afin de pouvoir simuler une densité de profils verticaux multipliée par 2 dans les courants de bord ouest et à l'équateur, un second jeu de données déjà existant a été employé. Cette fois les positions des flotteurs de 2010 ont permis de recréer des observations uniquement dans les zones concernées. Les cartes en Fig 3.4 montrent les densités des deux jeux de données ainsi créés pour les années 2009 et 2010. La très forte densité initiale dans le Kuroshio (voir Fig. 3.4a) qui se retrouve alors très fortement augmentée dans le cas d'un double jeu de données (voir Fig. 3.4b).

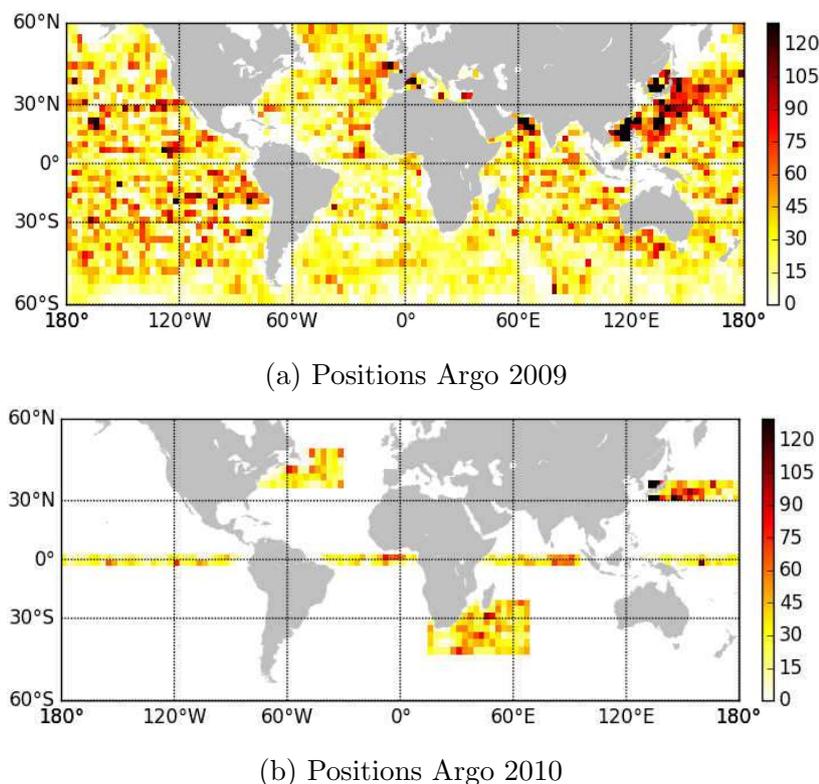


FIGURE 3.4 – Positions des profils Argo issues des positions réelles pour les années 2009 (sur l'ensemble du globe) et 2010 (uniquement dans les zones concernées par l'étude) sous forme de densité sur un an (nombre de profils verticaux) par boîtes de $3^\circ \times 3^\circ$.

De la même manière que pour les observations altimétriques, les données in situ simulées sont issues d'une interpolation horizontale bilinéaire du Nature Run au $1/12^\circ$ aux points d'observations.

La méthode utilisée pour bruite les données in situ diffère de la méthode employée pour les observations altimétriques. Un bruit blanc gaussien est toujours utilisé, par contre les erreurs sont rajoutées pendant l'assimilation, aussi les données ne sont pas invariantes d'une simulation à l'autre.

Pour la température la formule empirique spécifiant les variances d'erreur de température (voir Section 2.4.4.1) est utilisée afin d'obtenir une variabilité de l'erreur d'ob-

servation :

$$error_T(z) = 0.3 - \frac{0.2(z - 200)|z - 200|}{(z - 200)^2 + 400} \quad (3.1)$$

Cette erreur tend rapidement vers 0.1°C avec la profondeur et permet de simuler l'imprécision de mesure liée à la thermocline. Pour la salinité, les observations sont bruitées avec un écart-type de 0.1 psu.

La Fig. 3.5 montre les profils en température et salinité issus du Nature Run ainsi que les points d'observations simulées et bruitées par une erreur de mesure modélisée comme précédemment. Pour la température, une plus forte variabilité de la mesure est présente près de la surface par rapport aux valeurs profondes. Le profil de salinité possède logiquement une variabilité constante (écart-type de l'erreur de mesure à 0.1 psu sur la verticale).

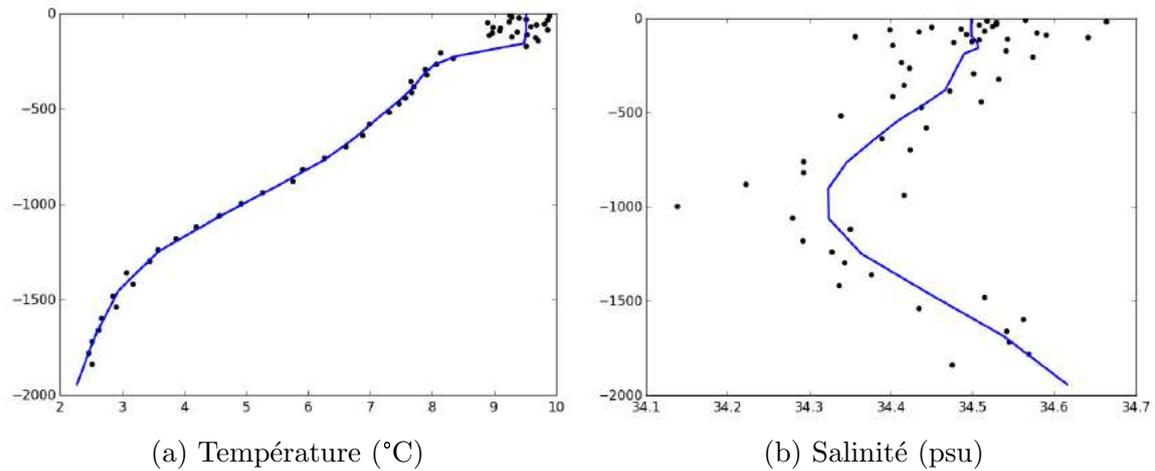


FIGURE 3.5 – Profils théoriques (courbes bleues) et observations simulées et bruitées (points noirs) pour un profil réalisé le 30 juillet 2009 par 147.66°W et $44,29^\circ\text{S}$.

3.4 Les simulations libres

L'utilisation de simulations libres dans le cadre des OSSEs permet de s'affranchir d'un éventuel impact de l'assimilation de données qui aurait influencé l'état du modèle. Ces expériences non contraintes servent à deux choses. Premièrement à fournir un état de référence (ou Nature Run) duquel sont simulées des observations. Cet état est un état idéal vers lequel les autres expériences devront tendre. Deux autres simulations libres sont employées, l'une au $1/4^\circ$ et la suivante au $1/12^\circ$. Ces deux simulations permettront de voir quel a été l'impact de l'assimilation sur la dynamique océanique, notamment pour les simulations au $1/4^\circ$ étant donné les différences de résolution avec le Nature Run. Les différentes simulations libres sont synthétisées dans la Table 3.1.

3.4.1 Le Nature Run

Le Nature Run (NR) est une simulation libre au $1/12^\circ$ (9.3 km à l'équateur). Ce NR sera, pour cette étude, l'équivalent de l'océan vrai dans les systèmes opérationnels. Cette simulation est donc la référence vers laquelle devront tendre nos autres expériences. Elle a été initialisée au 1er janvier 2003 et est forcée à 3h par les forçages opérationnels du Centre Européen (ECMWF).

3.4.2 Le run libre au $1/4^\circ$

Le FreeRun4 (FR4) est une simulation libre au même titre que le Nature Run mais à une résolution plus faible, c'est-à-dire au $1/4^\circ$ (environ 28 km à l'équateur). Cette dernière a été initialisée le 1^{er} janvier 1989. Elle a tourné jusqu'au 7 janvier 2009 forcée par Era-Interim puis par les forçages opérationnels de l'ECMWF sur le reste de 2009.

3.4.3 Le run libre au $1/12^\circ$

De la même manière que le FR4, le FreeRun12 (FR12) est une simulation libre mais sur une grille au $1/12^\circ$. Bien qu'utilisant la même configuration du modèle que le Nature Run, l'état initial de cette expérience est différent. Le FR12 a été initialisé au 11 Octobre 2006. Il est forcé par les forçages opérationnels du centre Européen.

| Simulations | Résolution | Initialisation | Forçages atmo. |
|--------------------|--------------|----------------|-----------------------------|
| Nature Run (NR) | $1/12^\circ$ | 1er Jan. 2003 | ECMWF-oper |
| Free Run 4 (FR4) | $1/4^\circ$ | 1er Jan. 1989 | ERA-interim puis ECMWF-oper |
| Free Run 12 (FR12) | $1/12^\circ$ | 11 Oct. 2006 | ECMWF-oper |

TABLEAU 3.1 – Les différentes simulations libres, leurs dates d'initialisation et les forçages atmosphériques utilisés.

3.4.4 Étude dynamique comparée des simulation libres

3.4.4.1 Dynamique globale

La dynamique océanique n'est pas homogène, ce qui implique l'existence de régions aux comportements différents. La résolution horizontale de la grille du modèle joue un grand rôle dans la restitution de l'énergie océanique et des phénomènes physiques associés. En effet plus une résolution est faible plus il est nécessaire de paramétrer les phénomènes dit sous-maille. De nombreuses études ont mis en évidence ce phénomène, Hurlburt et al.(2009) ont comparé des modèles libres sur les grilles ORCA025 ($1/4^\circ$) et ORCA12 ($1/12^\circ$) sur trois ans de simulations. La variabilité du niveau de la mer est nettement plus forte pour la simulation au $1/12^\circ$ avec 56.4 cm^2 en variance globale tandis qu'elle ne dépasse pas 45.7 cm^2 pour la simulation au $1/4^\circ$.

Un résultat similaire est obtenu pour la simulation FR4 avec 30.8 cm^2 , 40.3 cm^2 pour FR12 et 33 cm^2 pour NR. Ces résultats se retrouvent sur la Fig. 3.6 où une variabilité plus élevée pour FR12 par rapport à NR et FR4. Bien que les variances de FR4 et NR soient proches, les courants de bord ouest du NR sont plus énergétiques. Seuls les centres des gyres ne semblent pas impactés par l'augmentation de la résolution de la grille. En effet ces régions présentent une dynamique très calme où se développent des phénomènes de grandes échelles correctement simulés par les simulations malgré leur taille de grille différente.

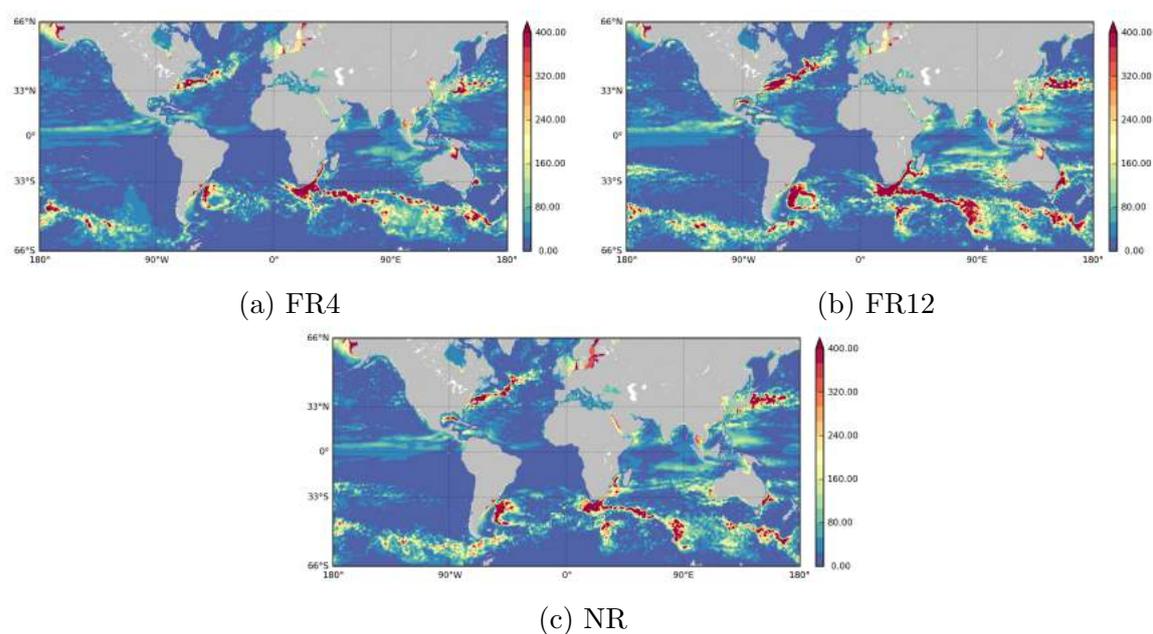


FIGURE 3.6 – Variances du niveau de la mer en cm^2 des simulations libres au cours de l'année 2009.

La résolution du modèle impacte donc principalement les régions où la dynamique océanique est la plus forte. Dans la suite, les dynamiques particulières des courants de bord ouest et de l'équateur sont rapidement analysées.

3.4.4.2 Dynamiques régionales

Courants de bord ouest

L'analyse se focalise ici sur la région du Gulf Stream, située au large des côtes Est de l'Amérique du Nord. Ce courant est l'un des plus connus parmi les courants de bord ouest. La suite de l'étude portera aussi sur le courant des Aiguilles au sud de l'Afrique du Sud ainsi que sur le courant Kuroshio, au large de l'archipel japonais.

Ces courants ne peuvent s'expliquer uniquement par les forçages atmosphériques (entraînement par le vent). Bien que ces derniers influent sur la dynamique d'un bassin océanique tel que celui de l'Atlantique Nord pour le Gulf Stream, les courants de bord ouest sont principalement le résultat de la variation de la force de Coriolis avec la latitude ainsi que la conservation de la vorticité potentielle de l'océan. Ces deux phénomènes engendrent une intensification des courants sur le bord ouest des bassins océaniques.

Chaque courant de bord ouest est particulier car intimement lié à la topographie côtière et la bathymétrie. Ils se présentent en deux parties distinctes, la première où ils suivent de manière relativement laminaire le talus continental tout en impactant les couches profondes en deçà de la thermocline, et la seconde où le courant se sépare du talus et devient alors turbulent, engendrant ainsi des tourbillons se propageant eux aussi profondément dans la colonne d'eau.

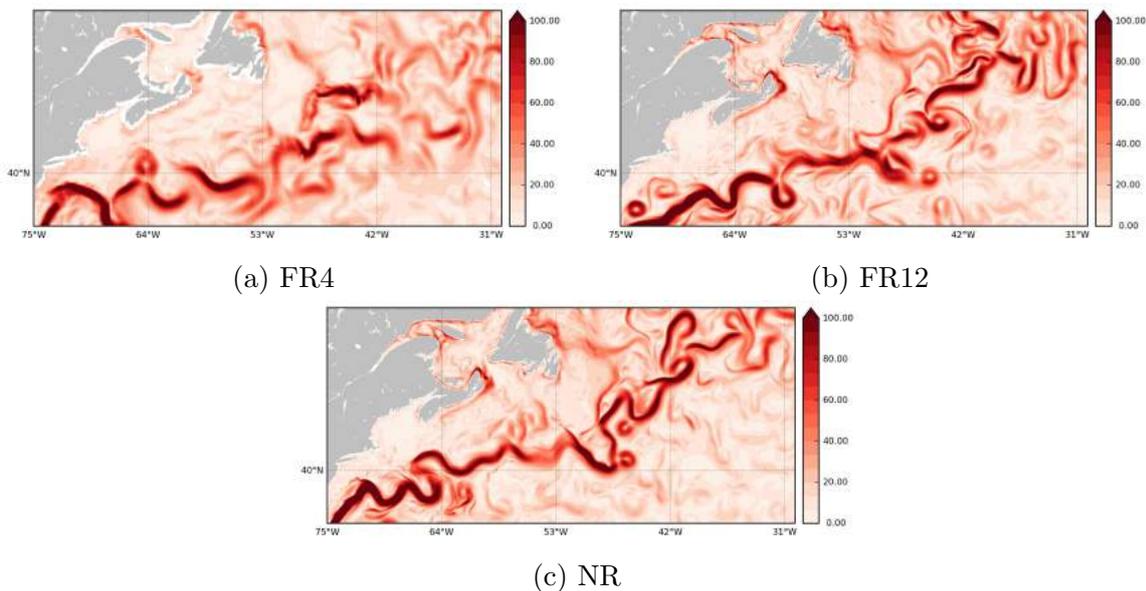


FIGURE 3.7 – Norme des vitesses en cm.s^{-1} dans le Gulf Stream à l'état initial des simulations (7 janvier 2009).

Les cartes de la Fig. 3.7 montrent les structures des champs de vitesses dans le courant de bord ouest du Gulf Stream pour les trois simulations libres concernées. L'effet de la taille de la maille est clairement visible, avec des structures plus fines dans les simulations au $1/12^\circ$. Ici, les intensités des vitesses sont respectées, cependant, au

début de la dérive nord Atlantique (à l'Est des 42°W), la simulation au 1/4° produit des vitesses plus faibles.

Bien que focalisées sur le Gulf Stream, ces cartes indiquent les différences entre les états initiaux des différentes simulations. Ces différences sont dues aux paramètres utilisés (e.g taille de la maille), aux forçages (Era-Interim pour Le FR4 et ECMWF-Oper pour NR et FR12) ainsi qu'aux dates d'initialisation de ces simulations. Il ne serait en effet pas cohérent de choisir des états initiaux proches les uns des autres, si cela avait été le cas, l'impact de l'assimilation de données aurait été potentiellement minimisé.

Équateur et tropiques

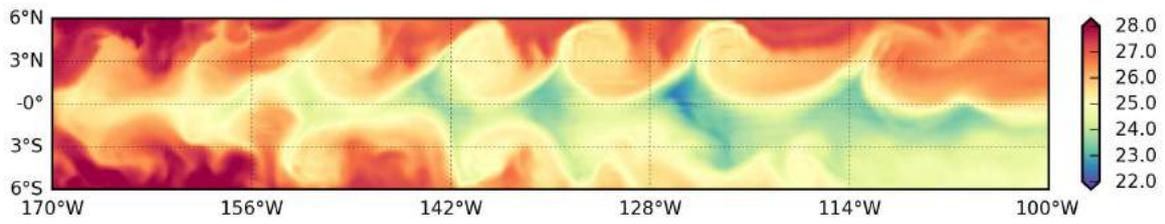
Contrairement aux courants de bord ouest, la dynamique équatoriale est principalement pilotée par les vents. En effet, schématiquement, cette région océanique correspond à la convergence des Alizés Nord et Sud entraînant par frottement un déplacement global vers l'ouest des masses d'eau.

La dynamique des ondes de type TIW (*Tropical Instability Waves*) est reproduite par les différentes simulations (Fig. 3.8). Ces ondes générées par le vent sont de faibles amplitudes mais sont toutefois observables par les satellites altimétriques.

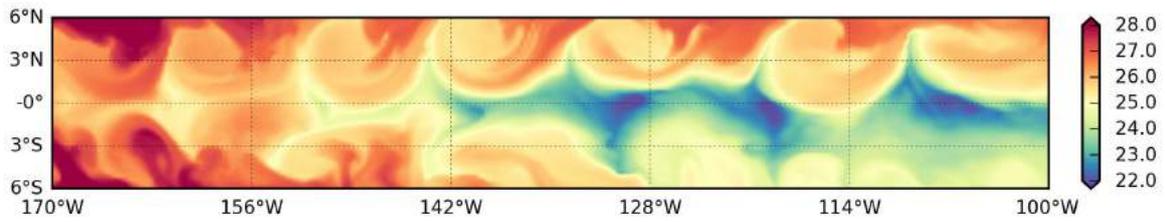
La Figure 3.8 montre des dynamiques beaucoup plus proches entre la simulation au 1/4° et les simulations au 1/12°. En effet les phénomènes mis en jeux ici sont d'échelles plus grandes que les événements observables dans les courants de bord ouest. Le modèle au 1/4° est alors capable de reproduire cette dynamique. La simulation FR4 présente toutefois des minima de température plus faibles que les simulations NR et FR12.

La dynamique équatoriale est le lieu de nombreux phénomènes pouvant aller jusqu'à impacter le climat mondial. Comme par exemple, dans le Pacifique, le phénomène ENSO (*El Niño Southern Oscillation*), pour lequel la compréhension de son déclenchement et de ses impacts exacts sont toujours des sujets de recherche d'actualité. Un tel événement peut engendrer de graves dégâts matériels et humains dans les pays voisins de la région Pacifique mais des anomalies climatiques ont été enregistrées partout sur le globe suite à ce phénomène.

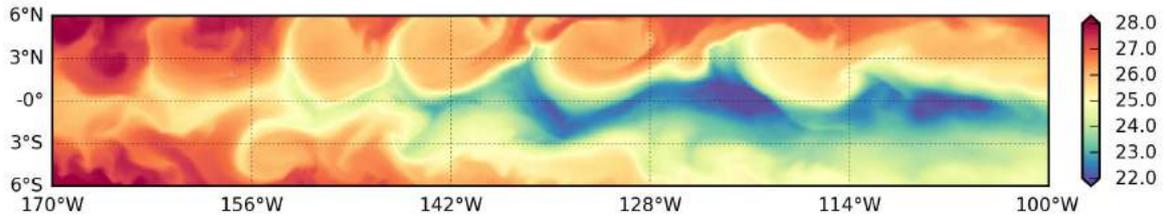
Comme cette étude n'est pas directement liée à ces phénomènes particuliers, il n'est pas nécessaire de s'attarder sur ces derniers. Cependant nous comprenons l'intérêt que revêt l'étude, l'observation et la prévision de cette bande équatoriale.



(a) FR4



(b) FR12



(c) NR

FIGURE 3.8 – États initiaux en température (°C) de la bande équatoriale Pacifique pour les trois simulation libres.

3.5 Les expériences d'assimilation

Les expériences présentées ici sont des OSSEs, autrement dit, des *Observing System Simulation Experiments*. Au même titre que les OSEs, (*Observing System Evaluations*), ce type de simulation permet d'étudier l'impact d'un réseau d'observations donné assimilé dans un système de prévision/analyse.

La différence fondamentale entre ces deux protocoles (OSE et OSSE), réside dans le fait que les OSEs se basent sur des jeux de données réels, alors que les OSSEs utilisent des observations fictives, réalisées à partir d'une simulation numérique de l'océan (ici le NR). Cette dernière est alors considérée comme étant l'état "vrai" de l'océan vers lequel les expériences devront tendre.

Les OSEs permettent l'étude d'un réseau d'observations déjà en place, alors que les OSSEs permettent de caractériser le comportement d'un système vis-à-vis de données issues d'instruments encore en cours de développement ou de validation.

Initialement développées dans le cadre de l'étude de l'atmosphère, ces protocoles ont été adaptés aux systèmes d'analyse et de prévision de l'océan. Ces expériences s'appliquent à tout type de données (données satellites, observations in situ, biogéochimie, ...) et font partie intégrante des outils de validation des centres de prévision. Guinehut et al (2004) traitent de l'impact d'un réseau d'observations composé de profils de température et de salinité, d'anomalie du niveau de la mer et de température du surface, Tranchant et al. (2008) traitant de l'assimilation de la Salinité de surface issue du satellite Aquarius. Benkiran et al. (2016) et Ubelman et al. (2009) évaluent les impacts des mesures du futur altimètre SWOT vis-à-vis des altimètres classiques, respectivement dans une région à haute résolution ($1/36^\circ$) et dans l'océan Atlantique Tropical ($1/4^\circ$).

La mise en place de telles expériences nécessite une forte rigueur quant aux choix du modèle, du système d'assimilation, des observations et du bruit à appliquer à ces dernières. Halliwell et al. (2013), via une série d'OSSE/OSE dans le golfe du Mexique, fournit les recommandations à suivre afin d'éviter les sur- ou sous-estimations qu'auront les différents jeux de données sur les analyses et prévisions.

Les parties suivantes traitent des différentes expériences mises en œuvre ici, les reliant entre elles mais aussi à la problématique à laquelle elles sont reliées.

3.5.1 OSSEs altimétriques

Ces expériences sont dédiées à des objectifs multiples. Ces simulations, permettent d'analyser la capacité d'un modèle au $1/4^\circ$ à reproduire une dynamique issue d'un modèle au $1/12^\circ$ en fonction du nombre d'altimètres utilisés. Elle permettent également d'évaluer l'influence de la précision de la donnée altimétrique assimilée sur l'analyse et la prévision océanique

En plus de ces simulations, d'autres expériences ont été réalisées afin de comprendre le fonctionnement du système d'assimilation et d'étudier certains paramètres dont notamment l'impact de l'erreur de représentativité.

Les différentes expériences d'assimilation sont synthétisées dans la Table 3.2.

3.5.1.1 Impact du nombre de satellites utilisés

Les données utilisées en entrée du système d'assimilation sont issues de trois traces satellites : Jason1, Jason2 et Envisat. Le jeu d'expériences présenté ici décrit trois simulations ayant pour but d'évaluer ce qu'un jeu de données plus dense va apporter à l'analyse et à la prévision océanique.

Ces trois simulations, nommées Sat1, Sat2 et Sat3 en fonction du nombre d'altimètres assimilés sont jumelles à FR4 présentée précédemment. C'est-à-dire que leurs états initiaux sont les mêmes et tirés d'une simulation libre. Les forçages sont eux aussi les mêmes à savoir qu'ils proviennent des fichiers opérationnels fournis par le centre européen de prévision.(ECMWF-Oper)

L'ordre d'assimilation des satellites a été guidé par le fait que les traces de Jason1 ne sont disponibles qu'à partir de mi Février 2009 à cause d'un repositionnement du satellite sur la même orbite que Jason2 mais avec 5 jours de décalage par rapport à ce dernier. Les satellites sont donc utilisés dans l'ordre suivant : Jason2, Envisat puis Jason1.

Pour ces expériences, les données sont issues du premier jeu de d'observations simulées avec une erreur de 3cm simulant une prise de mesure par un altimètre LRM. De plus, la matrice de covariance d'erreur d'observations spécifiée au système d'assimilation est fixée à 3cm sur sa diagonale afin d'être cohérente avec les observations.

3.5.1.2 Impact de la précision de la donnée

Expériences sur la grille ORCA025

Deux jeux de données altimétriques ont été créés. Le premier simulant des observations LRM avec une erreur de 3 cm, et un jeu de données plus précises (1 cm d'erreur) simulant des observations effectuées par les altimètres SAR. Il s'agit ici de comparer des simulations en tout point équivalentes à l'exception de l'erreur rajoutée aux données et de l'erreur d'observation spécifiée pour l'assimilation de données. La première simulation utile pour cette partie de l'étude est déjà décrite (voir Section 3.5.1.1), il s'agit en effet de Sat3, c'est-à-dire utilisant 3 satellites et avec des observations bruitées à 3 cm. Nous avons donc créé l'expérience Sat3_s dans laquelle sont assimilées des données typées SAR.

Ces erreurs différentes nécessitent une spécification différente de la matrice de covariance des erreurs d'observation (voir Section 2.4.4.1). En effet, il faut que cette dernière soit cohérente avec l'erreur des observations. Des matrices d'erreur diagonale égale à

3^2 cm^2 et 1^2 cm^2 sont spécifiées pour Sat3 et Sat3_s respectivement.

Les résultats issus de ces deux expériences ont impliqué un travail sur la spécification d'une erreur de représentativité liée aux incapacités d'un modèle au $1/4^\circ$ de reproduire des événements de petites échelles qui existent dans le Nature Run. C'est pourquoi une carte d'écart-type de l'erreur de représentativité (Fig. 3.9) a été calculée et ajoutée dans le système d'assimilation. Deux nouvelles expériences ont donc été menées à partir des simulations Sat3 et Sat3_s, à savoir, Sat3_r (3 cm d'erreur) et Sat3_sr (1 cm d'erreur).

Cette carte (Fig. 3.9) a été calculée à partir des champs de SSH du Nature Run. A chaque pas de temps, le champ a été lissé en moyennant autour de chaque maille les valeurs du champs inclus dans une boîte de 9×9 points de grille dont la maille considérée est celle se situant au centre. La taille de cette boîte au $1/12^\circ$ correspond à une boîte de 3×3 maille pour un modèle au $1/4^\circ$. Cette taille a été choisie en partant du principe qu'un signal peut être défini par un minimum de 3 points. Ainsi des signaux de petite échelle au $1/12^\circ$ seront lissés afin de se rapprocher de la variabilité d'un modèle au $1/4^\circ$. Pour finaliser le calcul de cette carte de représentativité, la RMS entre les champs bruts et les champs lissés a été calculée sur toute la période (1 an). La carte obtenue est visible en Fig. 3.9.

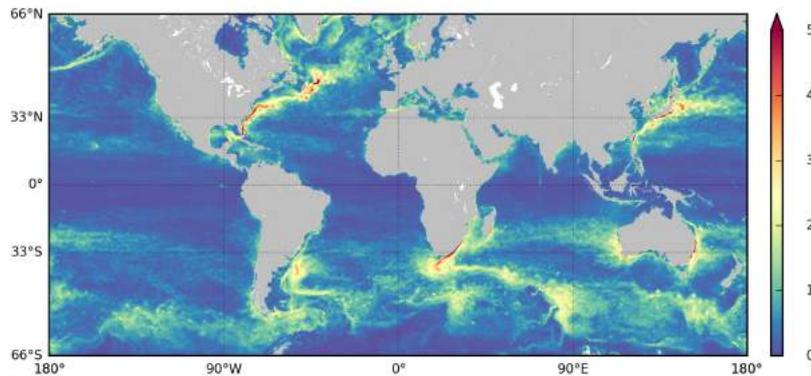


FIGURE 3.9 – Carte d'écart-type de l'erreur de représentativité de niveau de la mer en cm calculée à partir des champs du Nature Run.

Expériences sur la grille ORCA12

Les deux expériences (Sat3 et Sat3_s) sont faites avec la grille au $1/4^\circ$. La comparaison entre Sat3 et Sat3_s n'est pas satisfaisante du point de vue des résultats attendus (amélioration des analyses et prévision en utilisant des données SAR). Il est alors apparu nécessaire de reproduire ces expériences sur une grille plus fine, c'est-à-dire au $1/12^\circ$. A partir de l'état initial de FR12, deux nouvelles simulations ont été créées, assimilant chacune un des deux types de données (LRM et SAR) et pour les trois satellites considérés. De la même manière que pour les expériences aux $1/4^\circ$ par rapport à FR4, ces nouvelles expériences sont en tout point identiques (notamment les états initiaux et forçages) à FR12.

La simulation utilisant les données typées LRM (erreur 3cm) sera nommée CONV (pour altimétrie conventionnelle) et la simulation assimilant des données simulant des observations SAR (erreur 1cm) s'appellera SAR. De la même manière que pour les expériences au $1/4^\circ$, les matrices de covariance d'erreur d'observation ont été adaptées (matrices diagonales) afin qu'elles soient cohérentes avec les erreurs rajoutées aux données.

3.5.2 OSSEs combinées : altimétrie et in situ

Ces expériences seront dédiées à l'étude de l'impact d'un réseau d'observation composé de données altimétriques et de données in situ issues d'une flotte classique puis augmentée (voir Section 3.3) de profileurs Argo sur les champs profonds de température et de salinité. Ces expériences seront encore une fois mises en regard avec la simulation Sat3. Cette dernière a en effet été utilisée pour créer deux nouvelles expériences dans lesquelles des données simulant des profils Argo ont été rajoutées.

Dans la première, nommée Argo1, les données simulées proviennent des postions de la flotte Argo réelle de 2009. Pour la seconde, Argo2, les profils de la flotte Argo réelle de 2009 ont été agrémentés par les profils de 2010 dans les courants de bord ouest et à l'équateur. Outre l'assimilation des profils Argo, ces expériences sont équivalentes à la simulation Sat3.

| Exp. | Res. | Err. repr. | Jeux de données | | | | | | | |
|---------|--------------|------------|-----------------|---------------|--------------|--------------|---------------|--------------|---------|---------|
| | | | Jason2 (LRM) | Envisat (LRM) | Jason1 (LRM) | Jason2 (SAR) | Envisat (SAR) | Jason1 (SAR) | Argo 09 | Argo 10 |
| Sat1 | $1/4^\circ$ | non | x | | | | | | | |
| Sat2 | $1/4^\circ$ | non | x | x | | | | | | |
| Sat3 | $1/4^\circ$ | non | x | x | x | | | | | |
| Sat3_s | $1/4^\circ$ | non | | | | x | x | x | | |
| Sat3_r | $1/4^\circ$ | oui | x | x | x | | | | | |
| Sat3_sr | $1/4^\circ$ | oui | | | | x | x | x | | |
| CONV | $1/12^\circ$ | non | x | x | x | | | | | |
| SAR | $1/12^\circ$ | non | | | | x | x | x | | |
| Argo1 | $1/4^\circ$ | non | x | x | x | | | | x | |
| Argo2 | $1/4^\circ$ | non | x | x | x | | | | x | x |

TABLEAU 3.2 – Récapitulatif des expériences d'assimilation en fonction de leur grille et des données utilisées.

3.6 Tests de sensibilité de SAM-2

Afin de mieux comprendre le fonctionnement de SAM-2 au sein des systèmes de Mercator Océan, il a été nécessaire de mettre en place des expériences courtes et simplifiées par rapport aux expériences qui seront menées par la suite. Les simulations présentées ici ne couvrent que des périodes d'une semaine et seulement un nombre très limité de données altimétriques y est assimilé.

L'idée est d'observer comment l'assimilation d'une trace altimétrique permet d'apporter une correction en température, salinité et vitesses aux points d'observation et autour via les covariances d'erreur spécifiées. De plus, cette courte étude a été l'occasion de tester certains paramètres du système d'assimilation, à savoir le nombre de "modes" (voir Section 2.4) employé pour le calcul de l'incrément, ainsi que la taille des bulles d'analyse (voir Section 2.4.6.2).

Les modes sont calculés à partir d'une simulation de plusieurs années (environ 30 ans) et à chaque cycle d'analyse un certain nombre de modes est sélectionné parmi toutes ces années et dans une fenêtre temporelle centrée autour de la date de l'analyse. Cette fenêtre est de 60 jours pour la simulation Exp0 et 120 jours pour la simulation Exp1. Le nombre de modes (nb_modes) sélectionnés est alors de 349 pour Exp0 et de 691 pour Exp1, soit quasiment un facteur 2 entre les deux expériences.

La taille des bulles d'analyse est spécifiée par les distances de corrélation zonale et méridienne prescrites au système sous forme de cartes. Pour la simulation Exp0, ces distances sont multipliées par 2.6 et par 5.2 dans l'expérience Exp2. Ce paramètre se nommera r_{coef} . Trois expériences ont donc été mises en place (Tableau 3.3) : la première reprenant le système tel qu'il sera employé (Exp0), une suivante où le nombre de modes a été multiplié par deux (Exp1) et une dernière où la taille des bulles d'analyse a été multipliée par deux (Exp2).

| Expériences | Paramètres modifiés |
|-------------|------------------------------------|
| Exp0 | $nb_modes = 349 ; r_{coef} = 2.6$ |
| Exp1 | $nb_modes = 691 ; r_{coef} = 2.6$ |
| Exp2 | $nb_modes = 349 ; r_{coef} = 5.2$ |

TABLEAU 3.3 – Récapitulatif des expériences de sensibilité menées.

Les corrections calculées par SAM-2 pour ces différentes simulations seront présentées sous la forme de cartes d'incrément en niveau de la mer (SL), température (T), salinité (S) et vitesses zonale et méridienne (U et V).

Ces expériences sont similaires dans leur mise en place aux OSSEs, il est donc possible de comparer les incréments calculés par SAM-2 avec les corrections théoriques (Champ prévu - NR) qui permettraient de corriger parfaitement l'état de l'océan. Ceci permet alors d'évaluer la précision et la cohérence des corrections calculées.

3.6.1 Mise en place des expériences

Ces expériences ont été initialisées à partir d'un état stabilisé de l'expérience Sat3. Cette dernière couvrant l'année 2009, les simulations décrites ici s'étendent sur les 7 jours du 7 au 14 avril 2009.

Afin d'observer l'impact d'une observation altimétrique, il a été choisi de n'assimiler qu'un nombre réduit de traces altimétriques et de sous échantillonner les observations contenues par chacune d'elles. Dans les fichiers utilisés dans les systèmes opérationnels, les observations altimétriques sont espacées de 7 km le long d'une trace, dans le cas de cette étude les observations seront distantes de 350 km soit un échantillonnage de une observations sur cinquante par rapport aux données réelles (Fig. 3.10).

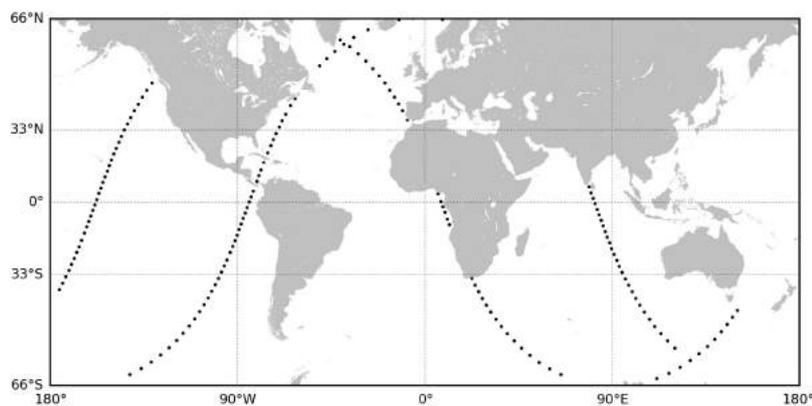


FIGURE 3.10 – Positions des observations altimétriques assimilées.

3.6.2 Étude de la correction multivariée

3.6.2.1 Correction de surface

L'expérience Exp0 est ici étudiée afin d'observer l'impact des observations altimétriques sur les autres variables (T, S, U et V). Pour évaluer cet impact, l'incrément calculé par SAM-2 est ici étudié. L'incrément est la correction calculée par SAM-2 et qui est ensuite appliquée via l'IAU (voir Section 2.4.2).

La Figure 3.11 montre qu'en dehors des traces, où il n'y a pas d'observations, aucune correction n'est calculée. Cette limitation spatiale de la correction est due à l'utilisation des bulles d'analyses. Une absence de correction signifie que le modèle ne sera pas contraint par ces observations dans les zones éloignées des traces.

Les cartes de la Fig. 3.12 montrent les incréments de surface pour les variables T, S et U (V non montré). La correction multivariée de SAM-2 est aussi limitée par les bulles d'analyse, en effet, les corrections ne sont pas étendues à l'océan global mais bien aux zones proches des observations altimétriques. Afin de mieux comprendre le fonctionnement de la correction multivariée, une zone plus petite de l'Atlantique ouest à proximité du Gulf Stream a été sélectionnée (Fig. 3.13).

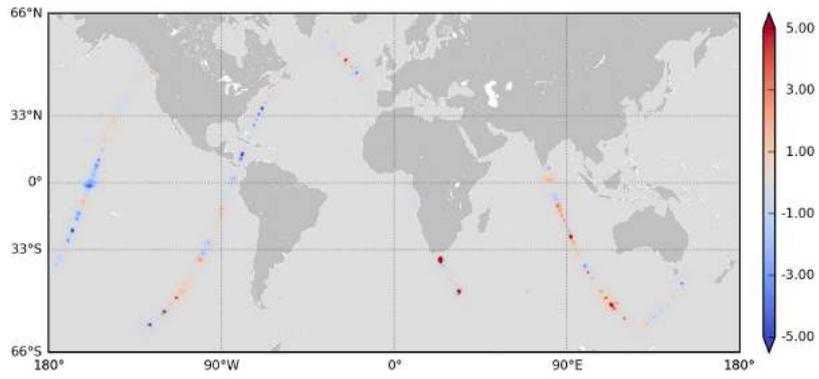
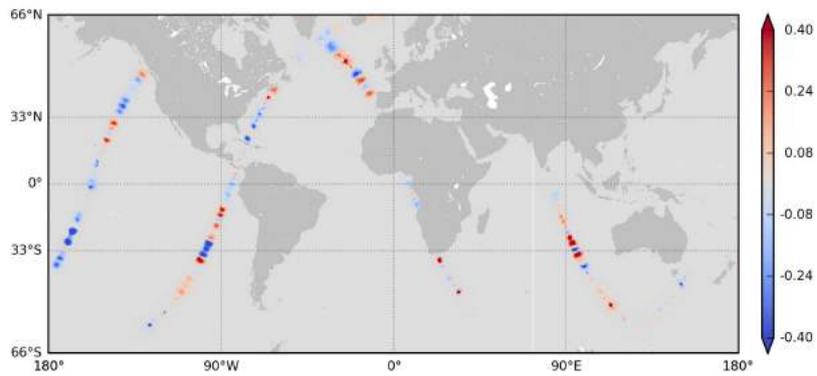
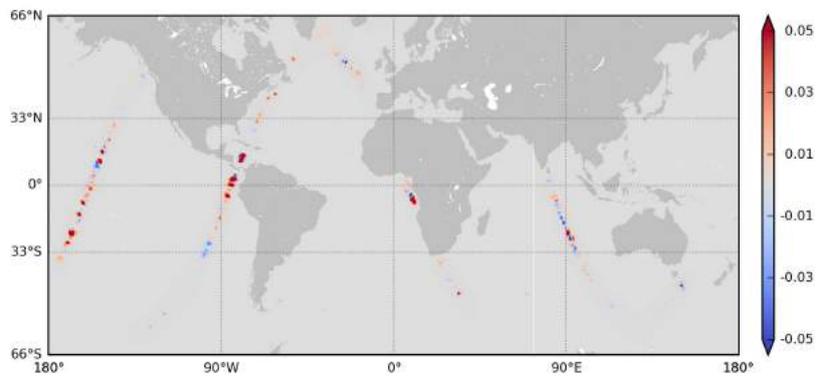


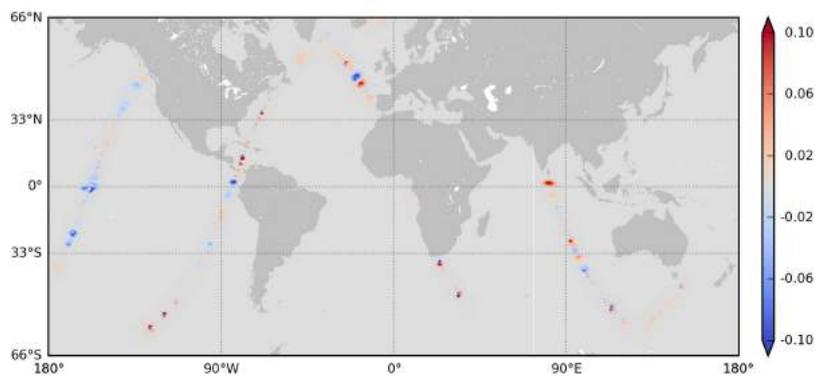
FIGURE 3.11 – Incrément en niveau de la mer (SL) (cm).



(a) Incrément en température à la surface ($^{\circ}C$).

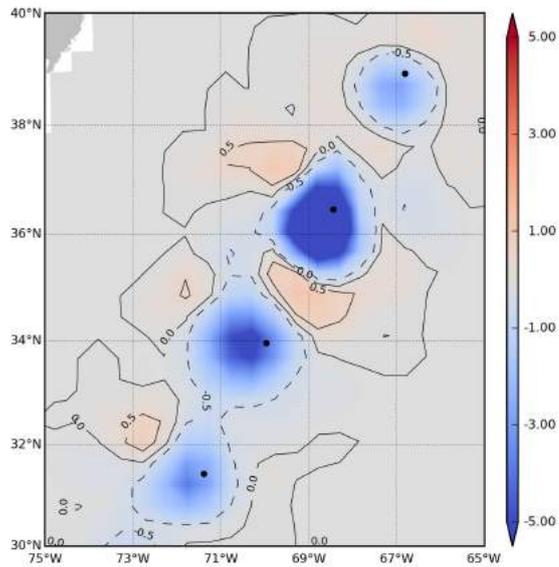


(b) Incrément en salinité à la surface (psu).

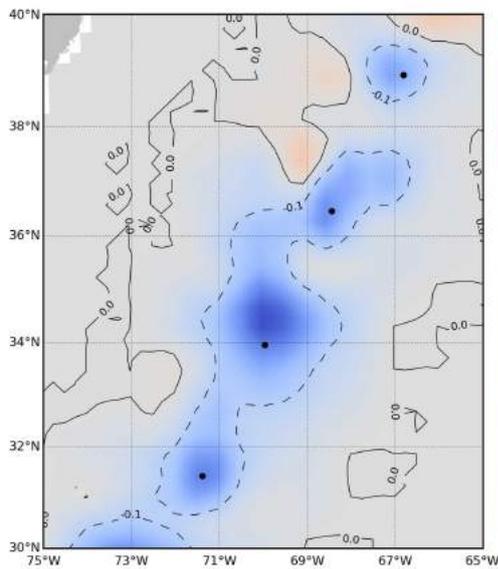


(c) Incrément en vitesse zonale à la surface ($m.s^{-1}$).

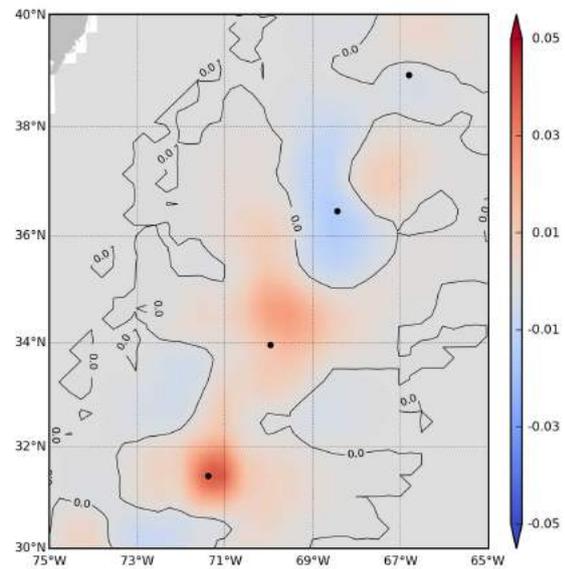
FIGURE 3.12 – Incréments de surface pour la température (T), la salinité (S) et la vitesse zonale (U).



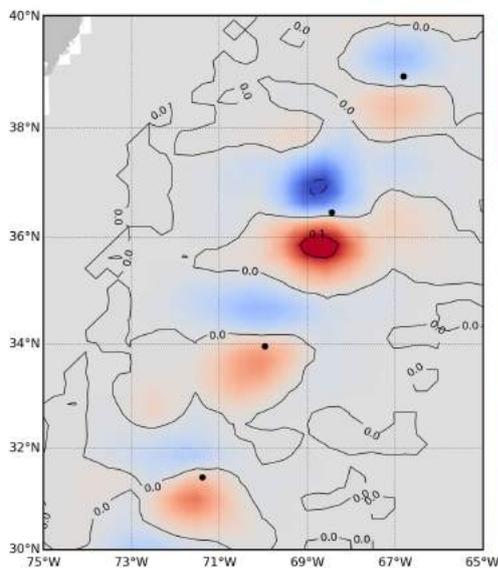
(a) Niveau de la mer (*cm*)



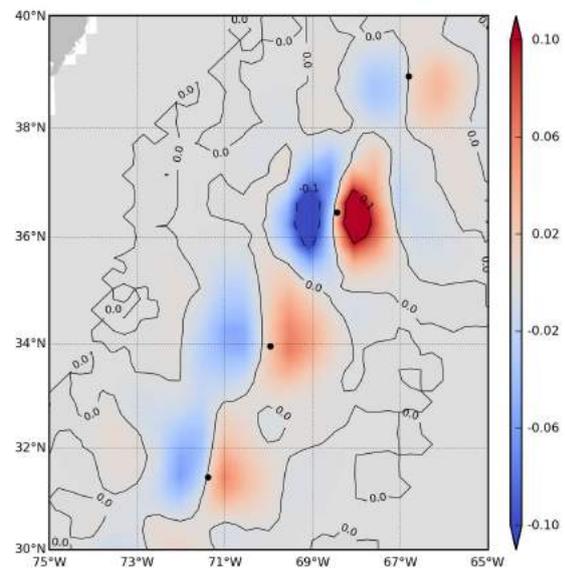
(b) T ($^{\circ}\text{C}$)



(c) S (*psu*)



(d) U ($m.s^{-1}$)



(e) V ($m.s^{-1}$)

FIGURE 3.13 – Incrément de surface pour le niveau de la mer (SL), la température (T), la salinité (S) et les vitesses zonale (U) et méridienne (V). Points noirs : positions des observations assimilées de SL.

Dans cette région précise, l'incrément négatif en SL se traduit par des incréments négatifs en T, le comportement en S n'est pas vraiment marqué et une correction sous forme de "dipôles" orientés zonalement pour U et méridionalement pour V apparaît.

La correction négative en T s'explique par l'effet stérique et les corrections en vitesse prenant ici la forme d'une correction cyclonique correspondent bien à un comportement tourbillonnaire d'une anomalie négative de niveau de la mer dans l'hémisphère nord via l'équilibre géostrophique.

3.6.2.2 Correction en profondeur

Afin de ne pas créer de discontinuité entre la surface et les couches inférieures, il est important de propager les corrections en T, S, U et V vers le fond. En se plaçant à une profondeur de 318 m dans le Gulf Stream il est possible d'observer la structure des incréments pour ces variables (Fig. 3.14).

Les incréments en profondeur présentent les mêmes structures que les incréments de surface notamment pour T, U et V qui pour ces derniers présentent toujours une structure dipolaire. Concernant S, la correction s'est globalement inversée et intensifiée par rapport à l'incrément de surface. Les champs sont impactés sur toute la colonne d'eau et ce, jusqu'au fond (non montré). L'assimilation de données altimétriques impacte les champs profonds de manière significative grâce à SAM-2.

3.6.3 Étude de l'impact des modes et de la taille de la bulle d'analyse

3.6.3.1 Impact du nombre de modes

Les modes correspondent aux degrés de liberté laissés au système d'assimilation pour calculer une correction en 3 dimensions.

Les incréments en SL (Fig. 3.15) des simulations Exp0 et Exp1 diffèrent peu entre eux, cependant, pour Exp1, le champ présente des structures plus continues. La comparaison à l'incrément théorique montre les limites de ce type d'expérience en révélant quelques incohérences entre incréments expérimentaux et théoriques. L'incrément théorique est obtenu en réalisant la différence entre la prévision à 7 jours et le Nature Run (océan parfaitement défini servant de référence aux OSSEs, voir Section 3.4.1).

L'utilisation de modes supplémentaires permet un calcul théoriquement plus précis de l'incrément. Ceci s'explique par le fait que l'augmentation du nombre de modes utilisés signifie que la base servant au calcul de l'incrément est aussi augmentée. Ici les différences sont peu sensibles entre les deux simulations.

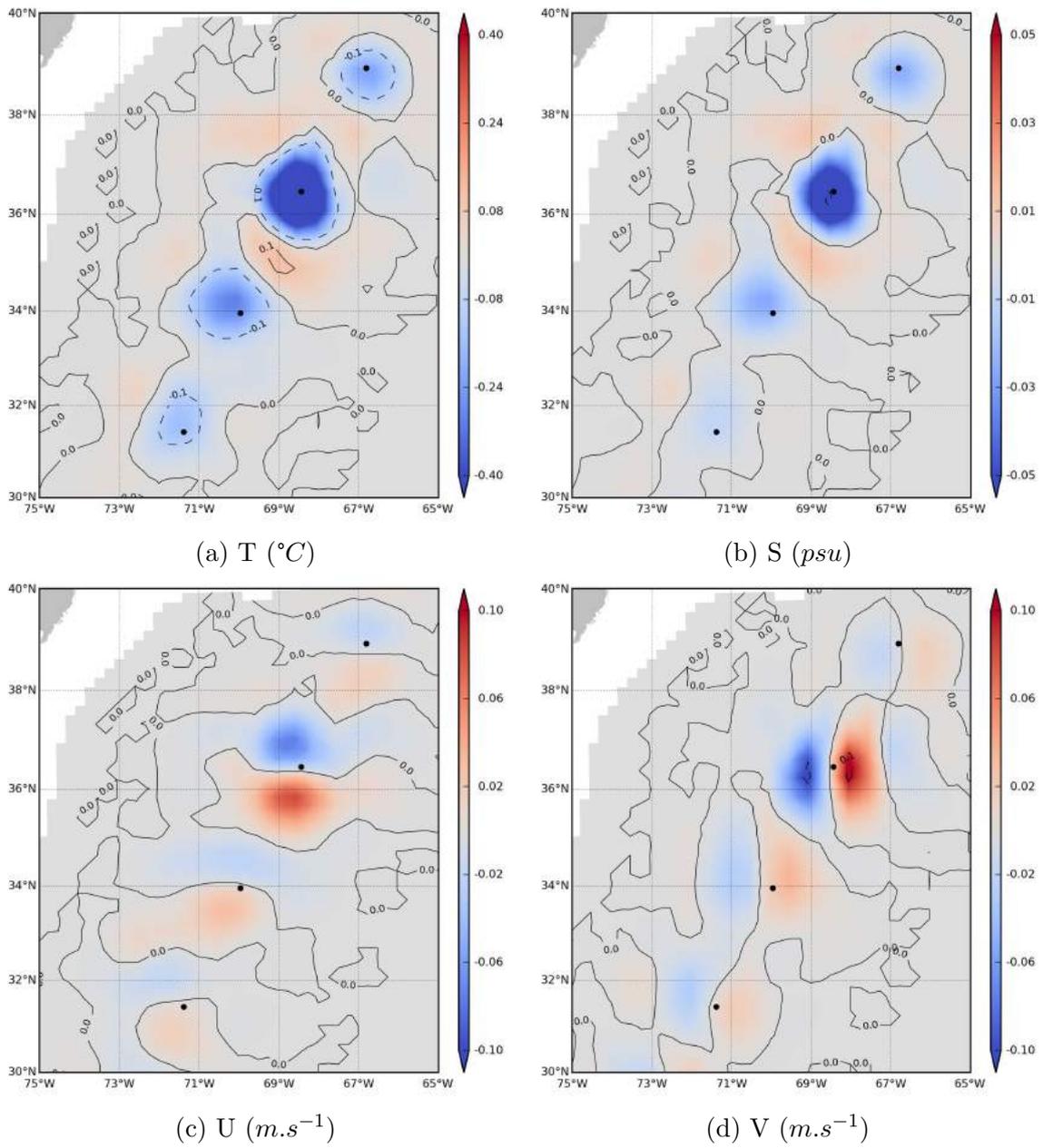


FIGURE 3.14 – Incréments à 318m pour la température (T), la salinité (S) et les vitesses zonales (U) et méridiennes (V).

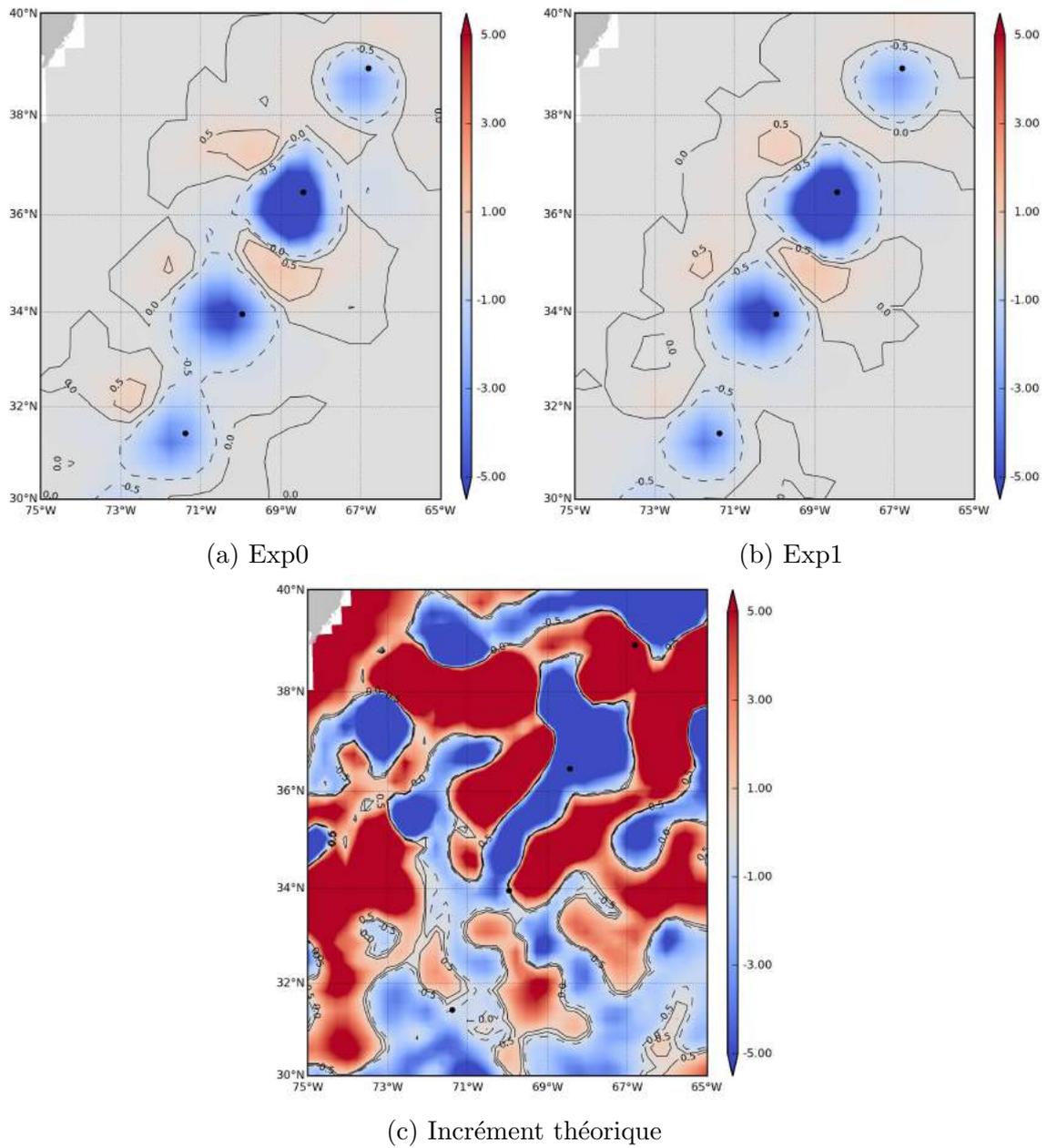
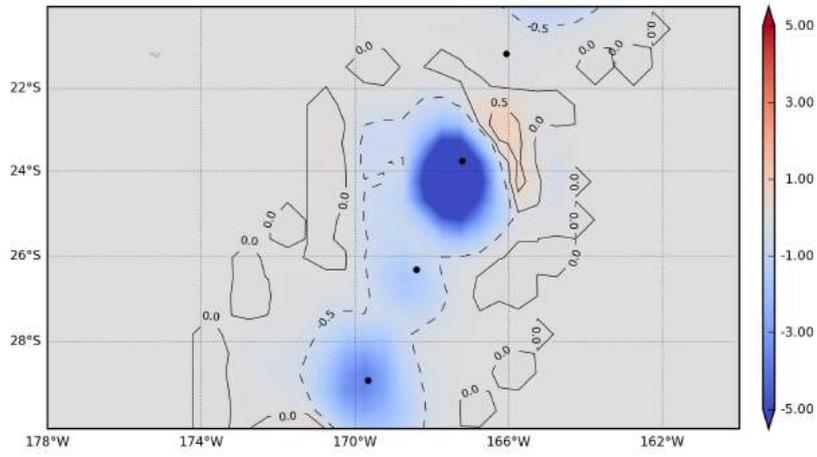
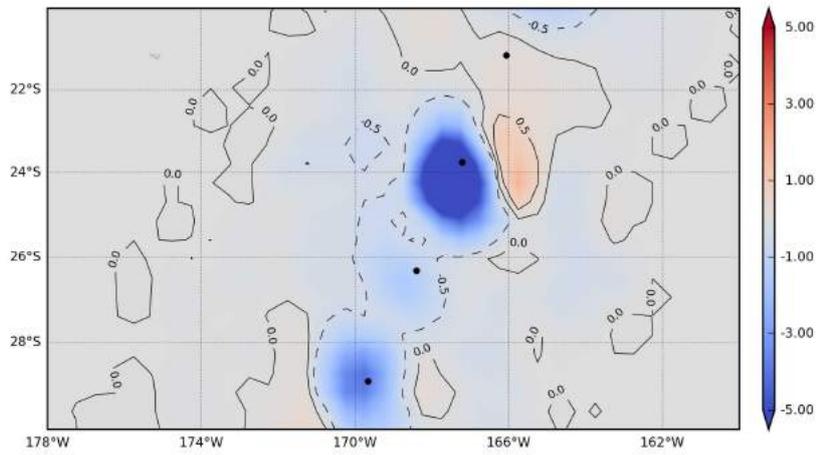


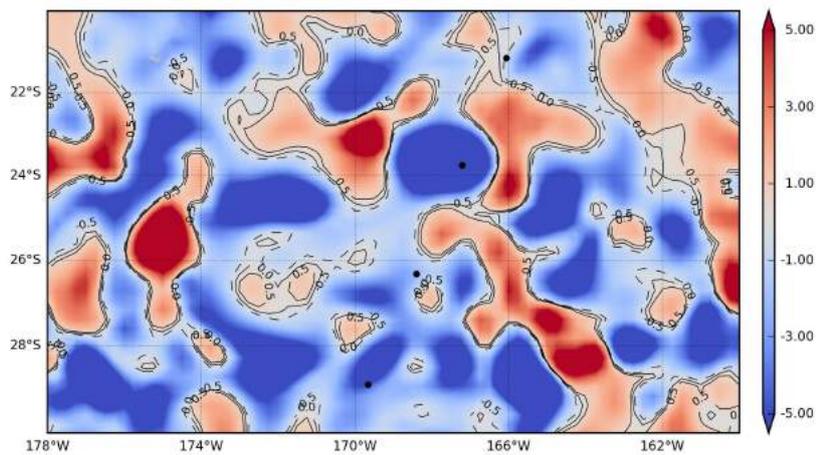
FIGURE 3.15 – Incréments de niveau de la mer (cm) dans le Gulf Stream pour les simulations Exp0 (a) et Exp1 (b) et incrément théorique (c).



(a) Exp0



(b) Exp2



(c) Increment théorique

FIGURE 3.16 – Incréments de niveau de la mer (cm) dans le Pacifique Sud pour les simulations Exp0 (a) et Exp2 (b) et incrément théorique (c).

3.6.3.2 Impact de la taille des bulles d'analyse

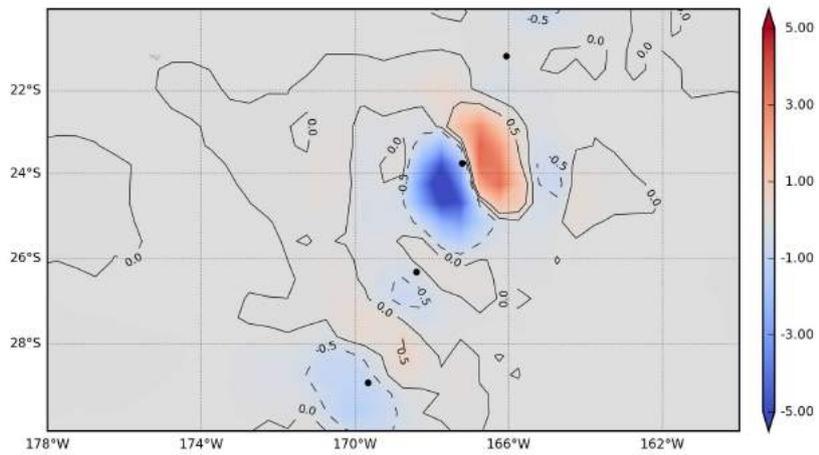
Les bulles permettent deux choses : de définir jusqu'à quelle distance d'un point d'analyse une observation est utilisée ou non pour le calcul de la correction et à limiter l'étendue de cette correction autour du point d'analyse. L'expérience Exp0 est reprise mais en doublant les rayons des bulles d'analyse. Ces rayons sont définis par des cartes présentes dans le système et dépendent de la région considérée.

La Figure 3.16 montre les incréments de SL dans le Pacifique Sud. Les différences entre les étendues de la correction autour de la trace altimétrique sont bien visibles. Bien que les principales valeurs de l'incrément se concentrent autour des observations, dans Exp2 des incréments faibles sont calculés loin des observations. Ces incréments sont de petite échelle (1 à 2°) et d'une amplitude de l'ordre du pour-cent par rapport aux valeurs maximales. Ces faibles valeurs d'incrément se retrouve dans Exp0 mais de manière plus concentrée autour des observations. En comparant les incréments de Exp0 et Exp1 à l'incrément théorique, ces petites structures sont réalistes car présentes dans ce dernier. Cependant l'agrandissement des bulles d'analyse tend à écarter ces structures de part et d'autre du point d'analyse créant alors des zones étendues où la correction est quasiment nulle.

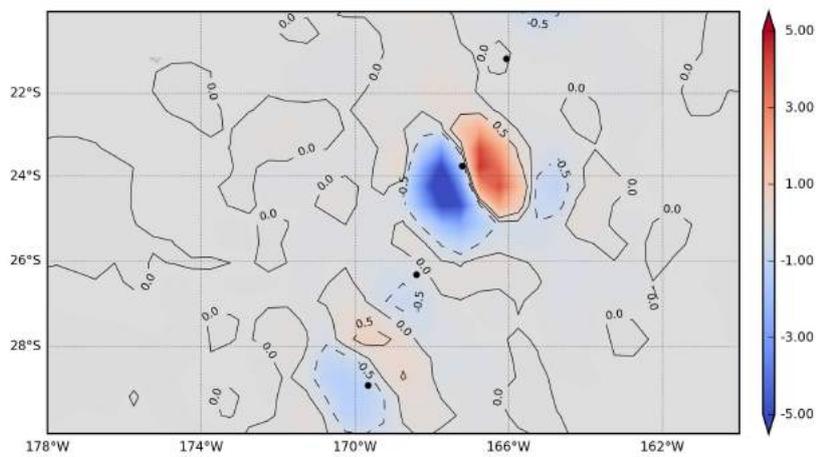
Dans le fonctionnement de SAM-2, l'incrément, une fois calculé n'est pas appliqué au modèle de manière brutale. En effet grâce à l'IAU la correction est répartie linéairement sur toute la fenêtre temporelle du cycle afin d'obtenir un état continu de l'analyse océanique. A chaque pas de temps cet incrément est propagé par le modèle. Il en résulte que la correction finale entre prévision et analyse n'est pas exactement égale à l'incrément calculé par SAM-2. La partie de l'incrément non pris en compte est nommé incrément rejeté et permet de juger si la correction a été prise en compte par le modèle ou si elle a été, comme son nom l'indique, rejetée. Cet incrément est calculé en réalisant la différence entre incrément calculé et incrément réel. Ce dernier correspond à l'écart entre l'état prévu et l'état analysé du 7^{eme} jour du cycle.

Sur la Figure 3.17 sont comparés les incréments rejetés pour les expériences Exp0 et Exp2. Les incréments rejetés sont sensiblement plus faibles pour Exp0 et les structures spatiales sont moins bruitées que pour Exp2. Ceci montre que l'incrément calculé présente des structures trop petites pour être prises en compte par le modèle.

A travers ces différentes expériences il apparaît que le choix des paramètres de SAM-2 ont peu d'impact sur les résultats du calcul de la correction appliquée aux prévisions. Cependant il serait nécessaire d'approfondir ce type d'étude afin de tirer des conclusions sur les choix effectués. Cette courte étude a surtout permis de comprendre le fonctionnement de SAM-2 et comment la correction 3D et multivariée était calculée. Les choix faits dans le système opérationnel semblent donc validés et seront ainsi appliqués dans le cadre de nos travaux.



(a) Exp0



(b) Exp2

FIGURE 3.17 – Incréments rejetés de niveau de la mer (cm) dans le Pacifique Sud pour les simulations Exp0 (a) et Exp2 (b).

Chapitre 4

Impacts des observations
altimétriques et des profils in situ
dans les systèmes au $1/4^\circ$

Sommaire

| | | |
|------------|--|------------|
| 4.1 | Assessing the impact of multiple missions and Argo in a global eddy permitting data assimilation system | 65 |
| 4.1.1 | Introduction (fr) | 65 |
| 4.1.2 | Conclusion (fr) | 66 |
| 4.1.3 | Abstract | 67 |
| 4.1.4 | Introduction | 68 |
| 4.1.5 | OSSE methodology | 69 |
| 4.1.6 | Altimetry OSSEs results | 72 |
| 4.1.7 | OSSE with Argo and altimetry | 86 |
| 4.1.8 | Conclusion | 90 |
| 4.2 | Impacts globaux et régionaux de l'assimilation du jeu de profils augmenté | 91 |
| 4.2.1 | Impacts globaux | 91 |
| 4.2.2 | Impact dans le Gulf Stream | 95 |
| 4.3 | Évaluations des prévisions via l'utilisation de forecast skill dans le système au 1/4° | 101 |
| 4.3.1 | Calcul des Forecast Skill | 101 |
| 4.3.2 | Étude des scores de FS | 102 |

4.1 Assessing the impact of multiple missions and Argo in a global eddy permitting data assimilation system

Cette première section reprend l'article Verrier et al., 2017 proposé à la revue *Ocean Science*. L'introduction et la conclusion ont été traduites en français.

4.1.1 Introduction (fr)

Les OSSEs (Observing System Simulation Experiments) sont un outil puissant permettant l'évaluation de l'impact, des apports et de la complémentarité des différents composants du système d'observation global de l'océan. Elles permettent une caractérisation des éléments existants du système d'observation et sont essentielles pour évaluer des configurations modifiées ou prévues (i.e évolution des caractéristiques et sous-échantillonnage, ajout d'un nouvel élément dans le système d'observation). Les OSSEs reposent sur des modèles représentant de manière réaliste la variabilité spatiale et temporelle des principales variables à observer, et l'assimilation de données combine de manière optimale les données in situ, les observations satellites et les modèles numériques. Les OSSEs utilisent deux modèles distincts. Le premier permet de créer une "vérité" ou une "nature" considérée alors comme l'océan réel. Ce run "naturel" (nature run) est sous-échantillonné de la même manière que s'il était observé par un système d'observation existant ou futur, créant ainsi un jeu d'observations simulées. Ces observations simulées sont assimilées dans un second modèle (run assimilé) et les performances de ce dernier sont évaluées en les comparant à celle du nature run. Ceci permet l'évaluation des impacts des observations. Les OSSEs testent la capacité d'un système global d'assimilation de données à combiner efficacement différents types d'observations avec les modèles permettant des analyses et prévisions améliorées. Ces expériences sont complémentaires aux OSEs (*Observing System Evaluations*). Ces dernières analysent l'impact de données réelles sur l'analyse et la prévision océanique en comparant généralement une simulation assimilant la totalité des données disponibles à une seconde utilisant toutes les observations à l'exception d'un type de données concerné par l'étude. Les OSSEs permettent cependant une étude plus approfondie des erreurs d'analyse et de prévision à toutes les profondeurs et pour l'ensemble des paramètres à travers une comparaison au nature run (la "vérité"). Les résultats pour des jeux de données existant doivent être en accord avec les résultats issus d'OSSEs. Ce problème de calibration des OSSEs en accord avec les OSEs est un problème essentiel pour obtenir des OSSEs de qualité (e.g Halliwell et al., 2014). Les choix du nature run, des run assimilés, du système d'assimilation de données et des erreurs à appliquer aux observations simulées doivent être soigneusement étudiés afin d'éviter des sous ou

surestimations des erreurs de prévision et d'analyse dans les OSSES.

Dans cette étude, une évaluation de l'impact de plusieurs altimètres et de la flotte de profileurs Argo est menée avec le système d'assimilation de données global au $1/4^\circ$ de Mercator Océan en réalisant une série d'OSSEs. L'objectif est de quantifier l'impact de l'assimilation de plusieurs altimètres sur les analyses et prévisions ainsi que la complémentarité entre l'altimétrie et les observations Argo. Un objectif secondaire est de tester la capacité du système d'assimilation de Mercator Océan à utiliser et à combiner efficacement plusieurs altimètres aux profileurs Argo. L'altimétrie et la flotte Argo sont la colonne vertébrale de l'océanographie opérationnelle (e.g Le Traon, 2013). De nos jours, ces observations sont utilisées de manière systématique pour contraindre les systèmes d'analyse et de prévision océanique globaux et régionaux. Plusieurs altimètres sont nécessaires afin de contraindre la circulation mesoéchelle (e.g Le Traon et al., 2015) et les observations Argo sont requises pour contraindre les champs de température et de salinité. Les OSEs menées dans le contexte du programme international GODAE Ocean View (Bell et al., 2015) ont montré l'impact de l'assimilation de plusieurs altimètres et des données Argo (e.g.; Lea et al., 2014; Oke et al., 2015; Turpin et al., 2015). Ils montrent, en particulier, que l'ajout du premier altimètre engendre le plus gros impact mais que les apports du deuxième puis du troisième altimètre permettent des améliorations significatives. La flotte Argo est indispensable pour contraindre les champs de température et de salinité (e.g. Turpin et al., 2015). L'étude de l'impact de l'altimétrie et de la flotte Argo dans un système d'assimilation de données global grâce à des OSSEs n'a, à notre connaissance, pas encore été menée durant ces dernières années. Une telle étude peut apporter des résultats complémentaires à ceux fournis par les précédentes OSEs grâce à une étude plus détaillée des erreurs d'analyse et de prévision. Ce chapitre est organisé comme suit : la première partie fournit une description de la méthodologie, la modélisation et l'assimilation de données propres aux OSSEs. Nous étudions ensuite l'impact de un, deux puis trois altimètres. Une dernière section présente le rôle complémentaire des flotteurs Argo avant de conclure sur les perspectives à donner à ce travail.

4.1.2 Conclusion (fr)

Un ensemble d'OSSEs (Observing System Simulation Experiments) a été mené à partir d'un système global d'assimilation de données à une résolution de $1/4^\circ$ en utilisant des données provenant d'une simulation libre au $1/12^\circ$. L'objectif a été d'évaluer avec quelle efficacité une constellation multi-satellitaire et la flotte Argo pouvaient contraindre un système global d'assimilation de données. L'impact de plusieurs altimètres est clairement identifié. Le premier altimètre réduit le plus l'erreur et corrige les grandes échelles du biais du niveau de la mer. Ce résultat concorde avec ceux obtenus avec différents systèmes de prévisions en temps réel (e.g. Lea et al., 2014; Oke et al.,

2015) où le premier altimètre contribue le plus à la réduction de l'erreur de niveau de la mer. Les prévisions en niveau de la mer et des courants océaniques se retrouvent améliorées en passant d'une constellation d'un à deux altimètres avec une réduction relative de l'erreur de presque 30 %. L'ajout du troisième altimètre continue d'améliorer les prévisions malgré la résolution moyenne d' $1/4^\circ$ et apporte une réduction relative de l'erreur d'environ 10 %. Les résultats montrent que le troisième altimètre permet la réduction des erreurs en niveau de la mer et des courants océaniques dans toutes les régions à forte dynamique telles que les courants de bord ouest. Ceci à cause du fait qu'un modèle au $1/4^\circ$ n'est pas en mesure de créer des structures d'échelles inférieures à 100-200 km. Mais en assimilant plusieurs altimètres, cette limite est abaissée à 100 km. L'assimilation de données altimétriques améliore la représentation des champs de température de surface. L'ajout des flotteurs Argo a un impact majeur sur l'amélioration des champs de température et démontre l'intérêt premier de la flotte Argo combinée à l'altimétrie pour contraindre l'océan profond dans un système d'assimilation de données global. Les champs de salinité sont améliorés de manière plus mesurée. Les résultats provenant de ces OSSEs sont en accord avec ceux obtenus avec des expériences utilisant des observations réelles (OSEs) et ils permettent une analyse plus détaillée des erreurs. Ils montrent aussi que ces OSSEs sont correctement construites pour simuler l'impact d'un système d'observation sur nos analyses et prévisions océaniques.

Cette étude a été prolongée afin d'évaluer l'impact d'un réseau augmenté de profileurs Argo et de l'utilisation de données altimétriques plus précises de type SAR. Cependant, il serait envisageable d'étendre ce travail aux profileurs Argo "Deep" ainsi qu'aux autres instruments de mesure in situ (e.g. mouillages, gliders).

4.1.3 Abstract

A series of Observing System Simulation Experiments (OSSEs) is carried out with a global data assimilation system at $1/4^\circ$ resolution using simulated data derived from a $1/12^\circ$ resolution free run simulation. The objective is to quantify how well multiple altimeter missions and Argo profiling floats can constrain a global data assimilation system but also to better understand the sensitivity of results to data assimilation techniques used in Mercator Ocean operational systems. Impact of multiple altimeter data is clearly evidenced. Forecasts of sea level and ocean currents are significantly improved when moving from one altimeter to two altimeters. In high eddy energy regions, sea level and surface current forecast errors when assimilating one altimeter data set are respectively 20 % and 45 % of the error of the simulation without assimilation. Forecasts of sea level and ocean currents continue to be improved when moving from one altimeter to two altimeters with a relative error reduction of almost 30 %. The addition of a third altimeter still improves the forecasts even at this medium $1/4^\circ$ resolution and brings an additional relative error reduction of about 10 %. The error level of the analysis with

one altimeter is close to the forecast error level when two or three altimeter data sets are assimilated. Assimilating altimeter data also improves the representation of the 3D ocean fields. The addition of Argo has a major impact to improve temperature and demonstrates the essential role of Argo together with altimetry to constrain a global data assimilation system. Salinity fields are only marginally improved. Results derived from these OSSEs are consistent with those derived from experiments with real data (observing system evaluations/OSEs) but they allow a more detailed characterization of errors on analyses and forecasts. Both OSEs and OSSEs should be systematically used and intercompared to test data assimilation systems and quantify the impact of existing observing systems.

4.1.4 Introduction

Observing System Simulation Experiments (OSSEs) are powerful tools to evaluate the impact, relative merits and complementarities of the different components of the global ocean observing system. They allow an assessment of existing elements of the global ocean observing system and are essential to evaluate revised or new design (e.g. evolution of sampling characteristics, addition of a new observing system component). OSSEs rely on models that realistically represent the space-time variability of the essential ocean variables to be monitored, and data assimilation to optimally merge in-situ, satellite observations and models. OSSEs typically use two different models. One model is used to perform a “truth” or “nature” run - and it is treated as if it is the real ocean. The “nature” run is sampled in a manner that mimics either an existing or future observing system - yielding synthetic observations. The synthetic observations are assimilated into the second model (assimilated run) and the model performance is evaluated by comparing it against the nature run. This in turn quantifies the impact of observations. OSSEs are also important tools to test the capability of global data assimilation systems to effectively merge different types of observations with models to produce improved ocean analyses and forecasts. OSSEs are complementary to OSEs (Observing System Evaluations). OSEs analyse the impact of real data for ocean analysis and forecasting generally by comparing a run assimilating all available data with a run assimilating all the data except for the data type to be investigated. OSSEs allow, however, a more comprehensive assessment of errors on analyses and forecasts at all depths and for all parameters through the comparison with the nature run (the “truth”). On the other hand, results for existing observing systems must be consistent with those derived from OSSEs. This issue of calibration of OSSEs with respect to OSEs is actually an important element for a proper design of OSSEs (e.g. Halliwell et al., 2014). Choice of the nature run, assimilated run, data assimilation scheme and errors to apply to synthetic observations should be carefully analysed to avoid under or overestimations of forecast and analysis errors in OSSEs.

In this study, an assessment of the impact of multiple altimeters and Argo profiling floats is carried out with the Mercator Ocean global $1/4^\circ$ data assimilation system via a series of OSSEs. The objective is to quantify the impact of assimilating several altimeters on analyses and forecasts and the complementarities between altimetry and Argo observations. A secondary objective is to test the capability of the Mercator Ocean data assimilation system to effectively use and merge multiple altimeters and Argo. Altimetry and Argo are the backbone observing system required for operational oceanography (e.g. Le Traon, 2013). They are systematically used today to constrain global and regional ocean analysis and forecasting systems. Multiple altimeter missions are required to constrain the mesoscale circulation (e.g. Le Traon et al., 2015) and Argo observations are required to constrain the temperature and salinity fields. OSEs carried out in the context of the GODAE OceanView international program (Bell et al., 2015) have demonstrated the impact of assimilating several altimeters and Argo (e.g. ; Lea et al., 2014; Oke et al., 2015; Turpin et al., 2015). They show, in particular, that the addition of the first altimeter has the largest impact but that there are quantitative improvements seen by the addition of a second and third altimeter. Argo is, on the other hand, mandatory to constrain temperature and salinity fields (e.g. Turpin et al., 2015). Analysing the impact of altimetry and Argo in a global data assimilation system through OSSEs has, to our knowledge, not been carried out at least in recent years. Such an analysis can provide, however, very useful and complementary results compared to these past OSEs by allowing a more detailed analysis of analysis and forecast errors.

The paper is organized as follows. Section 4.1.5 provides a description of the OSSE methodology and modelling and data assimilation system. Section 4.1.6 analyses the impact of assimilating one, two or three altimeters. Complementary role of Argo is discussed in section 4.1.7. Main conclusions and future prospects are given in section 4.1.8.

4.1.5 OSSE methodology

This section describes the methodologies used to perform the different OSSEs. The Mercator Ocean data assimilation system is first presented. The Nature Run and the Free Run used to initialise the Assimilated Run, the simulation of observations and the characteristics of OSSEs are then described.

4.1.5.1 The Mercator Data Assimilation System

Commonly called SAM2, the current protocol for data assimilation at Mercator Ocean (Lellouche et al., 2013) computes correction over a 7 day assimilation window and is based on a modified Kalman filter named SEEK (Singular Evolutive Ensemble Kalman filter) first introduced by Pham et al. (1998). Analysis is calculated at the middle of the assimilation window, i.e. the fourth day. The SEEK filter means, as

explained by Brasseur and Verron (2006), that covariance error matrices are forced at a low rank (“Singular”) and that it computes errors propagation (“Evolutive”) following the model dynamics.

The filter used in SAM2 is not evolutive as a SEEK. Indeed, instead of using EOFs to build its error covariance matrix that will be propagated onto the model along time steps, SAM2 takes a fixed base of smoothed model anomaly fields. This approach allows the system to get a covariance matrix that is realistic with the climatological statistics of the ocean at the time step and saving computation time as this matrix will not be propagated in the model unlike the SEEK. Anomalies are the differences of a smoothed (running mean along time) free run with it-self. They are used such as EOFs. These anomalies are selected respectively to the season of the assimilation cycle in a way to make statistics evolving consistently with climatology. Once the correction is calculated, it is projected in the model space by using a linear combination of the selected anomalies. Then, this correction is injected linearly over the seven days using the Incremental Analysis Update (IAU, Bloom et al., 1996). As explained in Lellouche et al. (2013), when in situ measurements are assimilated, a bias correction based on a 3D-Var approach is used to correct large scale and slow evolving errors in T, S and thus dynamical height. Bias correction uses a collection of temperature and salinity innovations from the last three months and creates a correction to be added in the model prognostic equations.

4.1.5.2 The Nature Run and the initialisation of the Assimilated Run

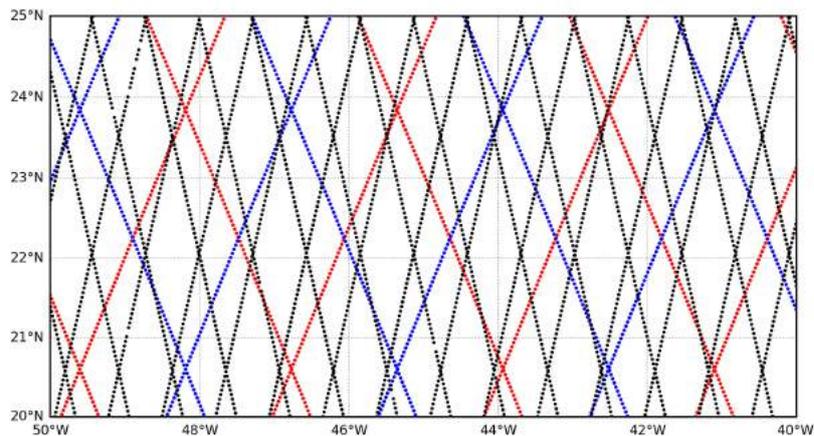
In this study, both the “nature” run (NR) and the assimilated run (AR) are based on the NEMO model (Nucleus for European Modelling of the Ocean, Madec et al. 1998) with a global coverage and 50 vertical levels with 22 levels within the upper 100m and with 1m resolution at surface up to 450 m at the bottom. The system uses the OPA (Océan Parallélisé) model coupled with the LIM2 ice model (Fichefet and Morales Maqueda, 1997). The difference between the two configurations is that the NR uses a $1/12^\circ$ tripolar grid (ORCA12) and the second one a $1/4^\circ$ tripolar grid (ORCA025). Both models are forced using the CORE (Coordinated Ocean-Ice Reference Experiment) bulk formulation (Large and Yeager, 2009). The $1/12^\circ$ free model is chosen for NR because it is our best estimation of the true ocean variability.

The OSSEs were started from January 7, 2009 over a one-year time period. Two different initial conditions (i.e. January 7, 2009) for the NR and for the AR are required so that we can quantify the impact of assimilating pseudo observations of the NR in the AR. This was achieved by running the two free run NEMO configurations initialized from climatology but at different times. The NR simulation was started in 2003 and forced with ECMWF (European Centre of Medium Weather Forecasting) operational 3-h atmospheric data and the AR was initialized from a $1/4^\circ$ free run started from

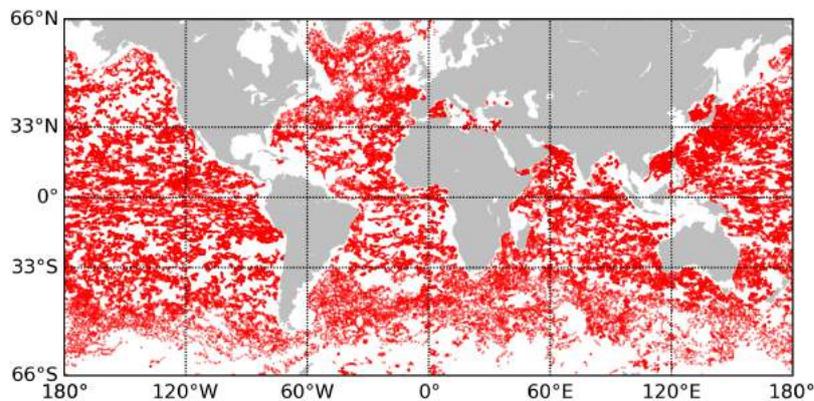
1989 and forced by ECMWF ERA-Interim 3h atmospheric data. The 1-year OSSEs are all forced with the ECMWF operational 3-h data. Note that as AR and NR are both forced by ECMWF operational data, our OSSEs do not address the impact of atmospheric forcing errors.

4.1.5.3 Simulated observations

To assess the impact of the number of altimeter data, three satellites have been considered : Jason-1, Jason-2 and Envisat (Fig. 4.1a). Jason-1 and Jason-2 have a 10-day repeat cycle and Envisat a 35-day repeat cycle. Jason-1 was in its interleaved orbit with its ground tracks just in between Jason-2 tracks and a time shift of 5 days. This orbit was chosen to optimize mesoscale variability sampling by Jason-1 and Jason-2. The OSSEs were carried out over the year 2009. Jason-1, Jason-2 and Envisat simulated observations were derived from the NR with a resolution of 7 km between two points along the tracks. An observation white noise of 3 cm RMS was simulated and added to these pseudo observations.



(a)



(b)

FIGURE 4.1 – a) Satellites tracks over 35 days in the North Atlantic. Blue : Jason 2 ; Black : Envisat ; Red : Jason 1. b) Argo profiles over the year 2009.

Mercator Ocean operational systems assimilate Sea Level Anomaly (SLA) obser-

vations. The Absolute Sea Level (i.e. sea level relative to the geoid) is obtained by using a pre-calculated Mean Dynamic Topography (MDT). In our case, the nature and assimilated runs have different MDTs because of the grid resolution, the model parametrizations and different initialization procedures. We thus chose to assimilate the absolute sea level from the NR at $1/12^\circ$.

Argo in-situ Temperature and Salinity observations from the surface down to 2000 m were simulated using the 2009 Argo profile positions in the Coriolis CORA3.2 data base (Fig. 4.1b).

4.1.5.4 OSSEs

The four different OSSEs that have been carried out are summarized in Table 4.1. The first three simulations address the question of the number of altimeters required to constrain ocean analyses and forecasts. There are three experiments with one (Jason-2), two (Envisat and Jason-2) and three (Jason-1, Envisat and Jason-2) assimilated satellite data sets. They are respectively called Sat1, Sat2 and Sat3 experiments. The other OSSE addresses the impact of Argo profiling floats together with the three satellite data sets.

| Exp. | Res. | Assim. | Data Set | | | |
|------------|--------------|--------|----------|---------|--------|------|
| | | | Jason2 | Envisat | Jason1 | Argo |
| Nature Run | $1/12^\circ$ | no | | | | |
| Free Run | $1/4^\circ$ | no | | | | |
| Sat1 | $1/4^\circ$ | yes | x | | | |
| Sat2 | $1/4^\circ$ | yes | x | x | | |
| Sat3 | $1/4^\circ$ | yes | x | x | x | |
| Argo1 | $1/4^\circ$ | yes | x | x | x | x |

TABLEAU 4.1 – Computed simulations and assimilated data set.

All the assimilated experiments start the 7th of January 2009 and end the 30th of December 2009. The difference between a given simulation and the NR are used to derive statistics on errors on analyses and forecasts over the last 7 months (June-December 2009). For each assimilation experiment, time series of errors on analyses and forecasts (up to 7 days) are obtained. 7-day forecast errors will be used in this study.

4.1.6 Altimetry OSSEs results

Impact of assimilation of altimeter data is first analysed on sea level (SL). A wavenumber spectral characterization of the error is also carried out. Errors on surface zonal (U) and meridional velocities (V) are then estimated. Finally, errors on velocities, temperature and salinity at depths are analysed to quantify how the assimilation of multiple altimeter data can constrain deep fields. Analyses are focused on regions with

high mesoscale variability : Gulf Stream (GS), Agulhas Current (AC) and Kuroshio (KU).

4.1.6.1 Impact on Sea Level

Figure 4.2 shows the Mean Square Error (MSE) for the Free Run (FR) and for the analyses and forecasts of the three different assimilation runs (Sat1, Sat2 and Sat3) estimated as the difference with the NR. As expected, the FR shows large differences with the NR as they provide two uncorrelated mesoscale variability fields. Assimilation of one satellite leads to a significant reduction of both analysis and forecast errors. Adding a second altimeter reduces significantly the errors. The impact of assimilating a third altimeter remains positive but not as large as the addition of a second altimeter. Moreover, errors are largely reduced between the forecast and the analysis for each of the three assimilation runs.

The evolution in time of the global MSE of Sea Level for both the analysis and 7-day forecast fields is shown on Fig. 4.3. The system constrained by the $1/12^\circ$ simulated SSH observations converges toward a stable state in 2 to 3 months. The Free Run MSE is about 97 cm^2 (not shown on the plot) over the time period of the experiment ; it is reduced to 20 cm^2 in Sat1. The analysis MSE in Sat2 is lower than Sat1 and approximatively equal to 15 cm^2 . Sat3 provides a slight improvement of a few cm^2 compared to Sat2.

To analyse further the structure of errors in high mesoscale variability areas, MSEs for analyses and 7-day forecasts are shown for the GS (Fig. 4.4 and Fig. 4.5), AC (Fig. 4.6 and 4.7) and KU (Fig. 4.8 and Fig. 4.9) regions. “Diamond” like structures can be seen on the analysis error maps for all regions when only one altimeter is assimilated revealing the repetitive spatial sampling of Jason-2. Adding Envisat observations suppresses this effect. In those energetic regions, the MSE for the Free Run is very high in the core of the main current. The increase of the number of assimilated altimeter data set allows a clear reduction of both forecast and analysis errors.

To summarize results shown on the different maps, the following score is defined as the MSE for a given AR in percentage of the Free Run MSE :

$$\alpha = 100 \times \left[\frac{\text{MeanSquare}(\text{error}_{AR})}{\text{MeanSquare}(\text{error}_{FR})} \right] \quad (4.1)$$

Those statistics are presented in Table 4.2.

The greatest impact is made with the assimilation of the first altimeter which strongly reduces the large scale biases existing between the NR and FR. Sat1 Sea Level global analysis MSE reaches 21% of the Free Run MSE. Adding a second satellite (Sat2) reduces the analysis errors by 6%. The third satellite (Sat3) reduces further the errors by about 2%.

Compared to Sat1 global analysis MSE, Sat2 analysis MSE is reduced by 28% and

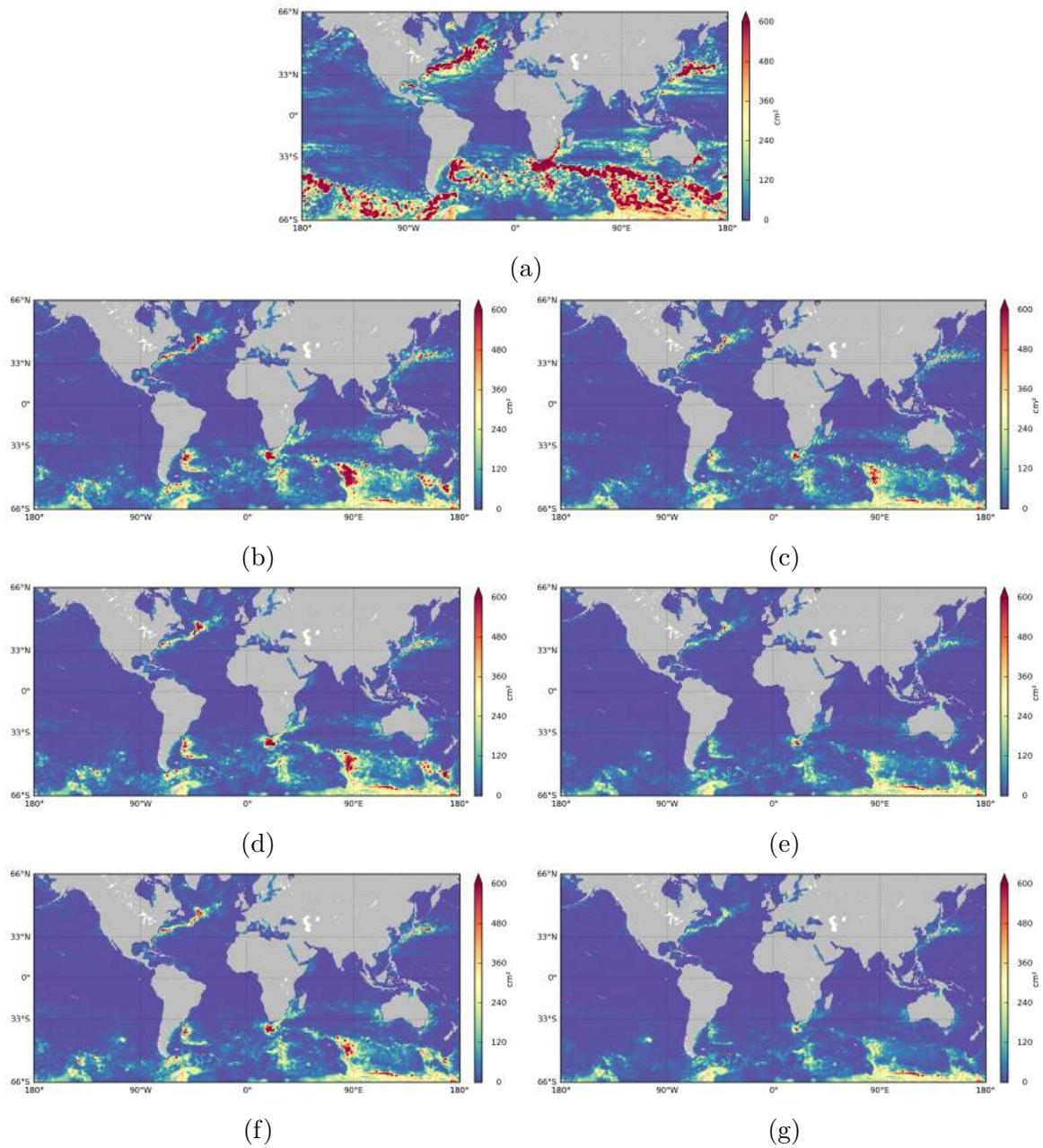


FIGURE 4.2 – Global Mean Square Error (MSE) of the relative SL compared to NR in cm^2 for the FR (a), Sat1 (b,c), Sat2 (d,e) and Sat3 (f,g). 7-day forecast on the left column and analyses on the right.

| SL | GLO | | GS | | AC | | KU | |
|------|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|
| | FCST | ANA | FCST | ANA | FCST | ANA | FCST | ANA |
| Sat1 | 21 | 29 | 19 | 29 | 14 | 22 | 13 | 20 |
| Sat2 | 15 | 24 | 12 | 23 | 9 | 18 | 8 | 14 |
| Sat3 | 14 | 21 | 9 | 21 | 7 | 15 | 7 | 14 |

TABLEAU 4.2 – Assimilated simulation relative Sea Level MSE in percent of the Free Run MSE.

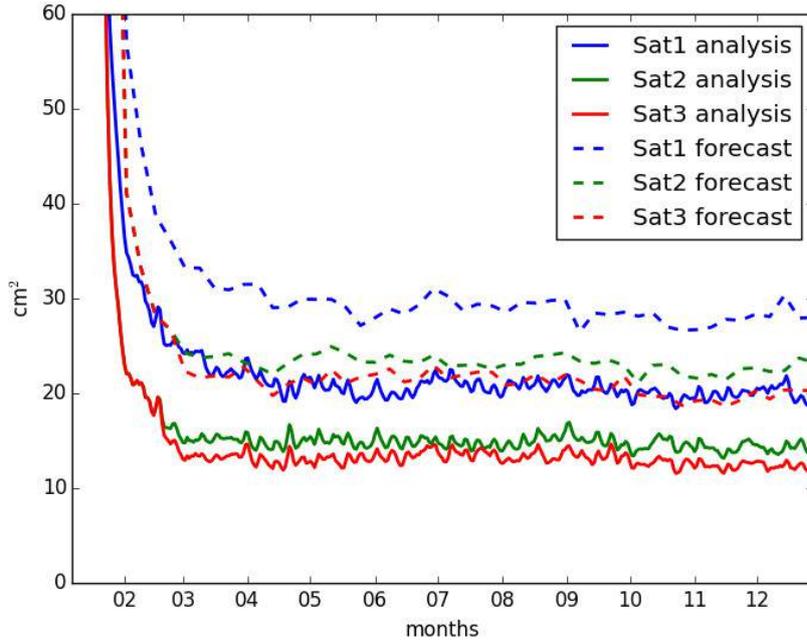


FIGURE 4.3 – Time evolution of the global MSE of SL in cm^2 for both analyses (plain lines) and 7-day forecasts (dashed lines) for Sat1(blue), Sat2(green) and Sat3(red)

for Sat3 compared to Sat2 error is reduced by 11%. In high eddy energy region, that ratio can reach respectively 42% and 22%.

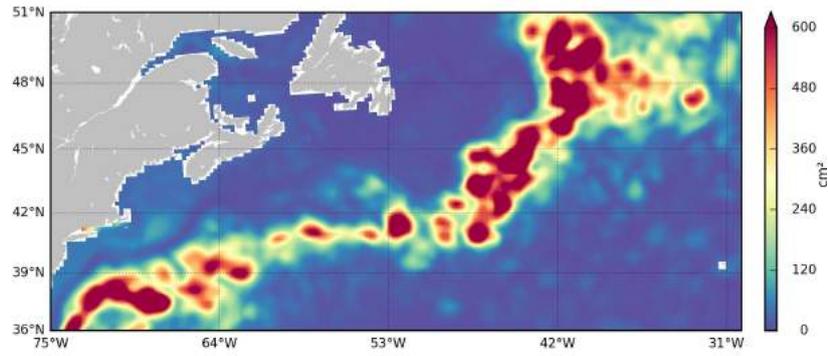
For a same assimilation experiment, the analysis error is always lower than the forecast error. The error level of the analysis with one altimeter is close to the forecast error level when two or three altimeter data sets are assimilated. This is true for all of the considered regions and globally (Table 4.2). The largest error reduction due to data assimilation occurs in the Agulhas and Kuroshio regions.

The error increase between the analysis and forecast for each experiment highlights the “model predictability” in the different regions. The MSE increase is 28% globally for Sat1, 35% for Sat2 and 37% for Sat3. In WBCs, values are around 34% for Sat1, around 49% for Sat2 and 54% for Sat3. The error increase is thus the largest when more altimeter data are assimilated. Analyses are thus better constrained but this does not fully translate into improved forecasts.

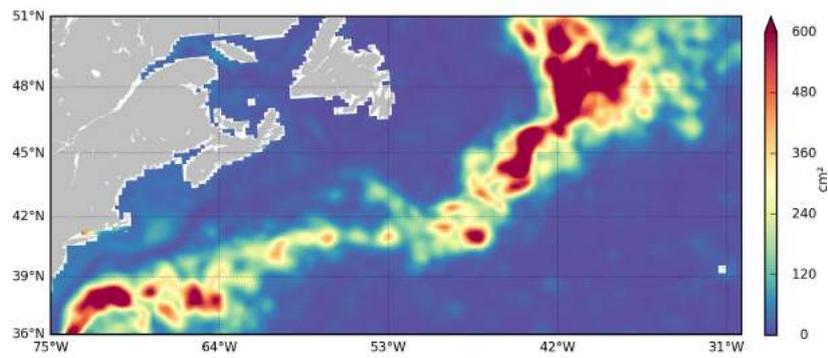
Note that as the NR and the ARs use the same atmospheric forcing, forecast errors are only related to internal mesoscale dynamics and initialization issues.

4.1.6.2 Spectral characterization of the error

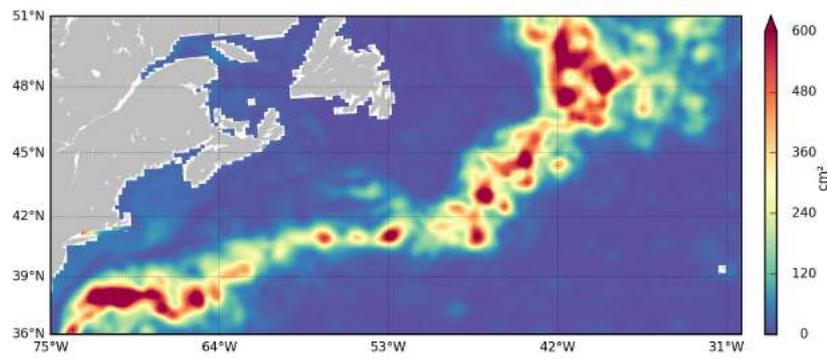
Estimation of the sea level wavenumber spectrum from altimetry data (e.g. Le Traon et al. 1990; Stammer 1997; Le Traon and Dibarboure, 2008) has allowed major progresses in the characterization of ocean mesoscale dynamics. Wavenumber spectra are used here to characterize sea level analysis and forecast errors in the Gulf Stream, the Agulhas Current and the Kuroshio regions.



(a)

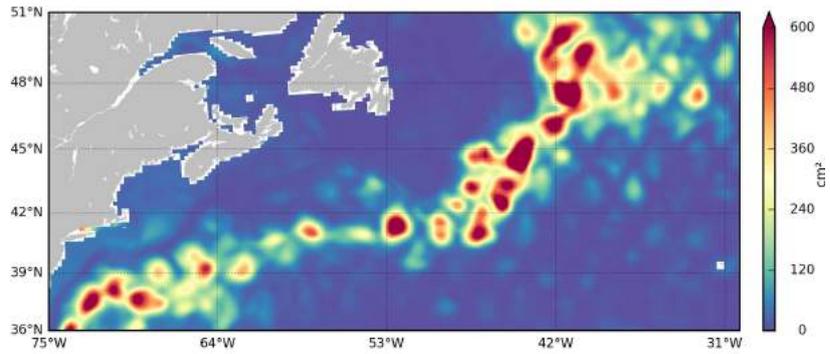


(b)

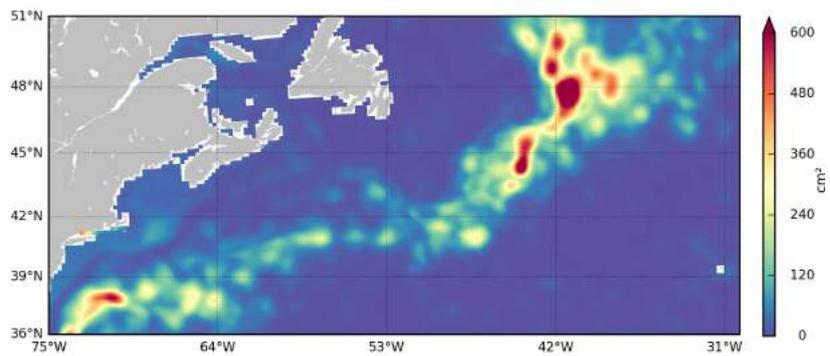


(c)

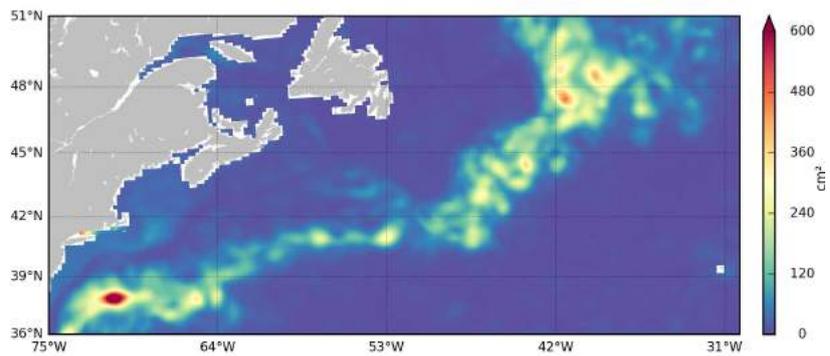
FIGURE 4.4 – GS 7-day forecast MSE of SL in cm^2 for Sat1 (a), Sat2 (b) and Sat3 (c).



(a)

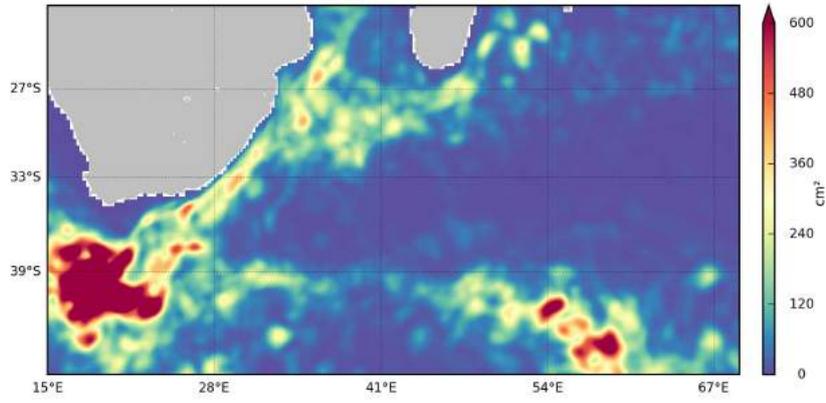


(b)

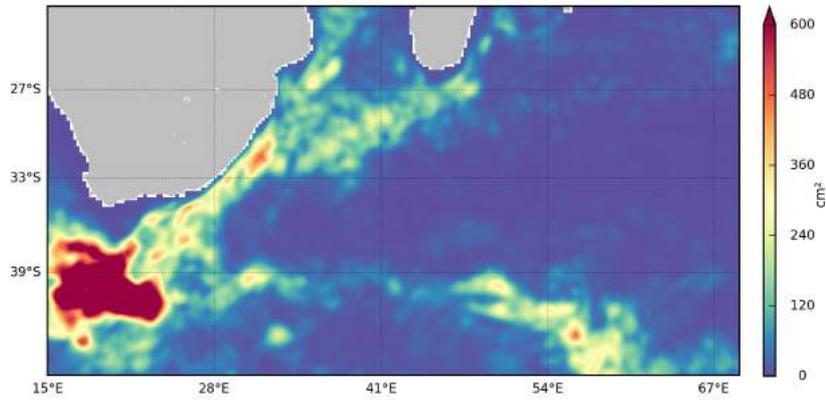


(c)

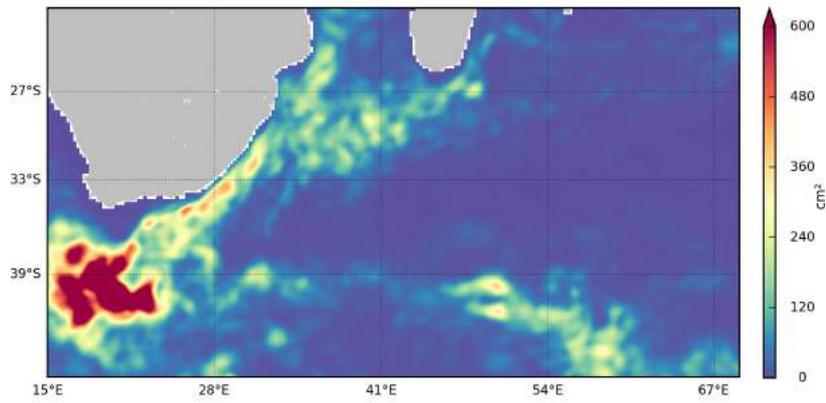
FIGURE 4.5 – GS analyses MSE of SL in cm^2 for Sat1 (a), Sat2 (b) and Sat3 (c).



(a)

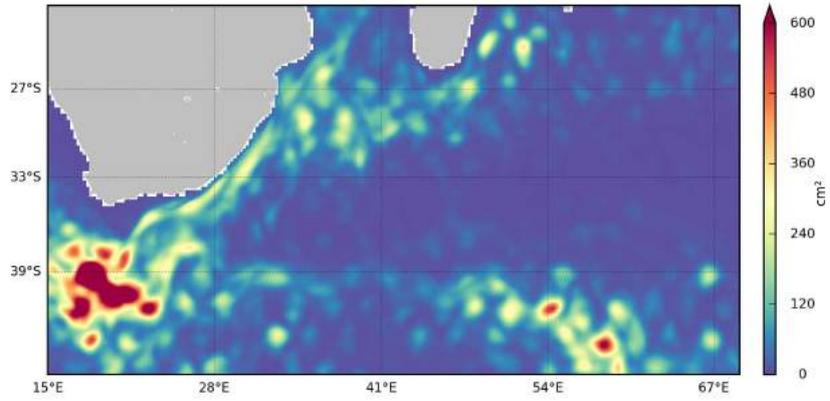


(b)

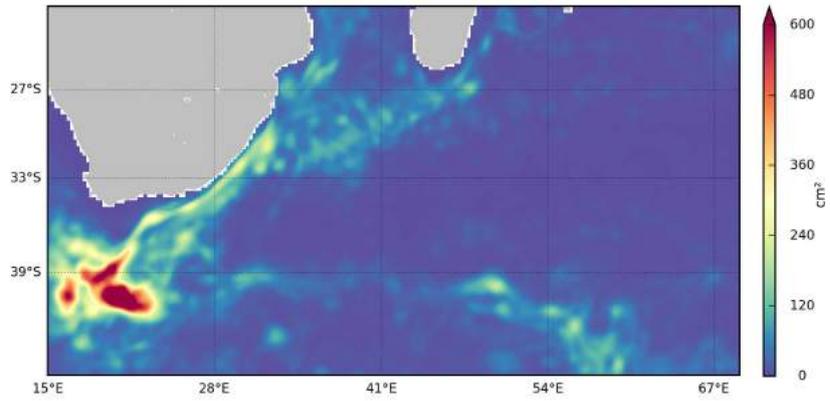


(c)

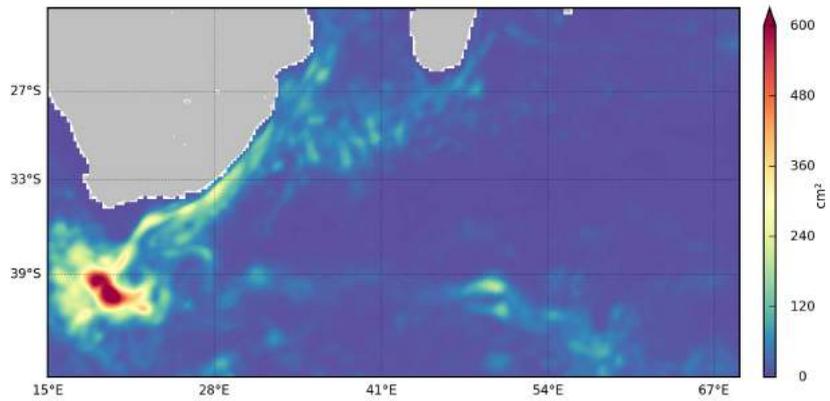
FIGURE 4.6 – AC 7-day forecast MSE of SL in cm^2 for Sat1 (a), Sat2 (b) and Sat3 (c).



(a)

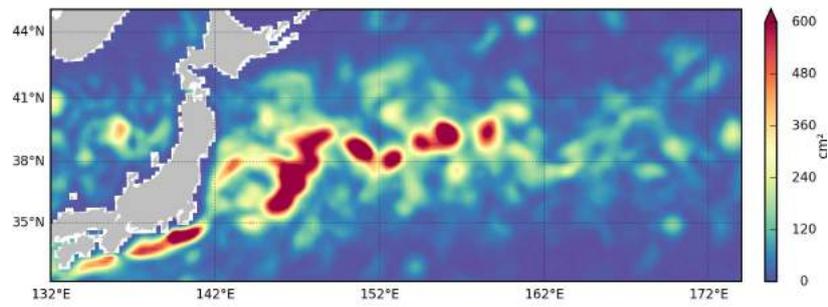


(b)

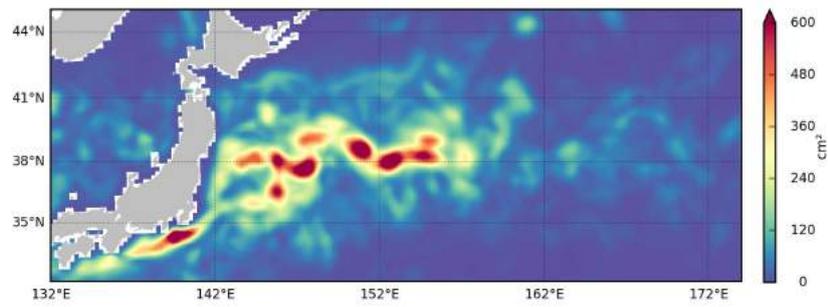


(c)

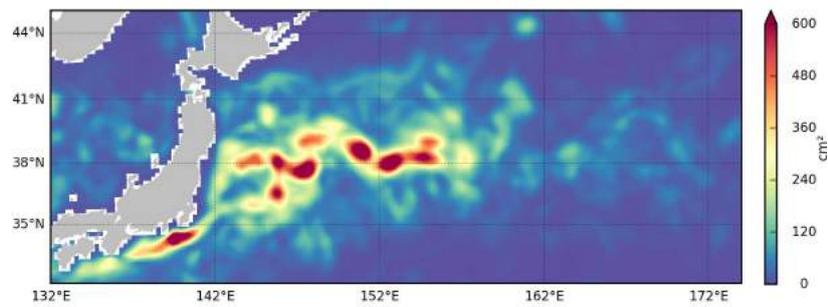
FIGURE 4.7 – AC analyses MSE of SL in cm^2 for Sat1 (a), Sat2 (b) and Sat3 (c).



(a)

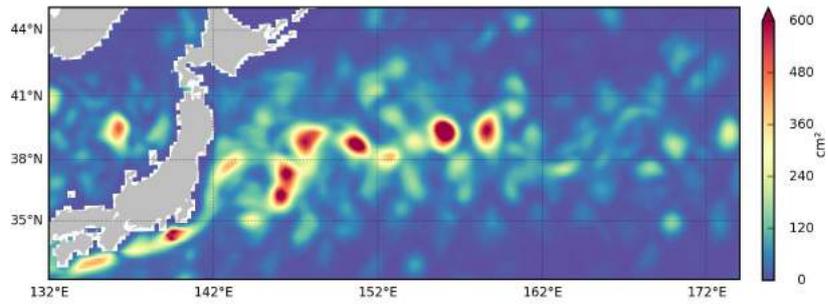


(b)

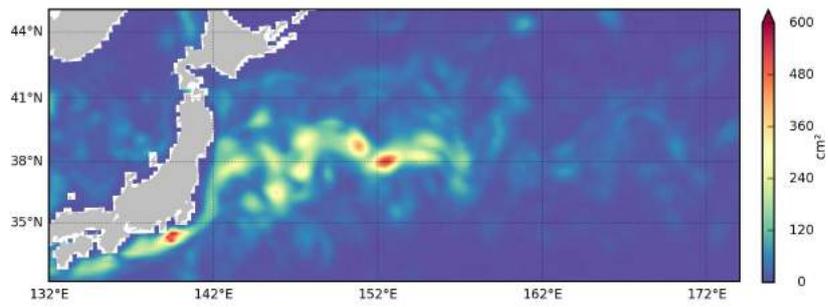


(c)

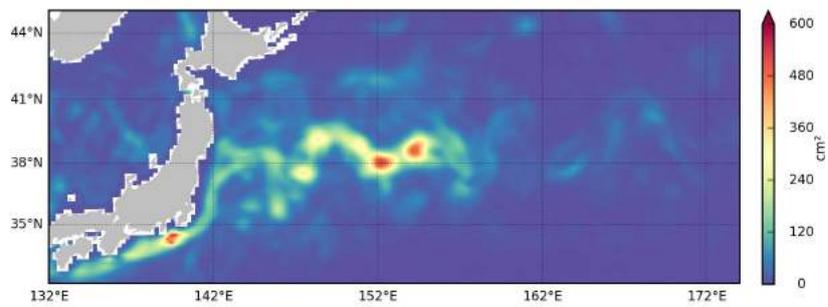
FIGURE 4.8 – KU 7-day forecast MSE of SL in cm^2 for Sat1 (a), Sat2 (b) and Sat3 (c).



(a)



(b)



(c)

FIGURE 4.9 – KU analyses MSE of SL in cm^2 for Sat1 (a), Sat2 (b) and Sat3 (c).

The $1/12^\circ$ NR was chosen for its capacity to better represent mesoscale variability (50-500km) in the ocean compared to a $1/4^\circ$ resolution simulation. Assimilating data from a higher resolution model into the $1/4^\circ$ configuration is a way to determine how these structures, underestimated in a free $1/4^\circ$ model, can be forced to be closer to reality (NR).

Wavenumber spectra were calculated from the sea level model error fields using Fast Fourier Transform (FFT). The FFT was applied in $10^\circ \times 20^\circ$ boxes within the previously defined WBCs regions but not fitting exactly to the areas shown on the maps. Longitudinal spectra were estimated from daily error fields and meridionally averaged. Figure 4.10 shows the mean sea level error spectrum calculated in the GS(a), AC(b) and KU(c) regions. The computation is made from June to December 2009 both for the analysis and for each 7th-day forecast of the assimilation cycle.

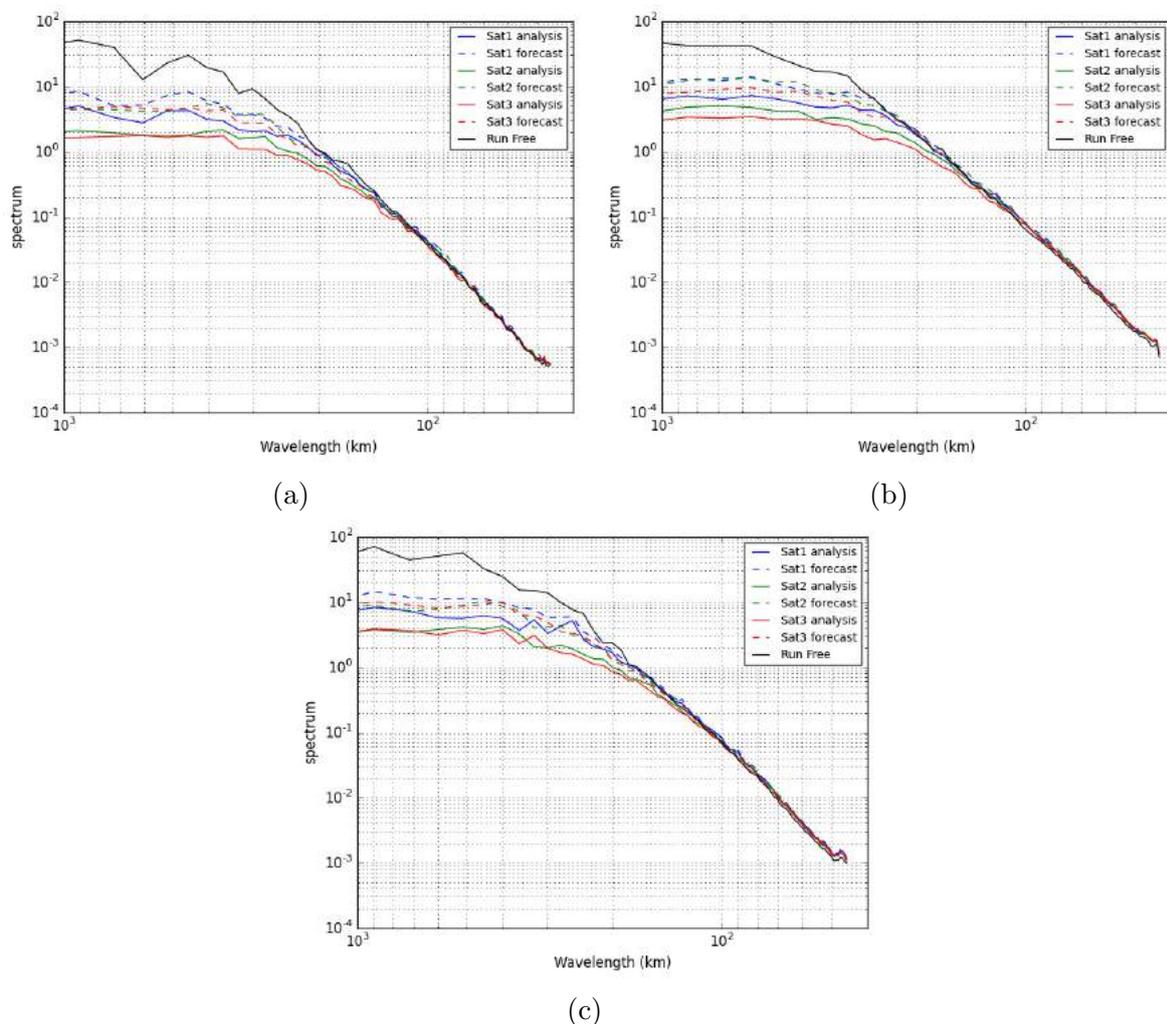


FIGURE 4.10 – Sea Level error energy spectrum in the GS (a), AC (b) and KU (c) for FR (black), Sat1 (blue), Sat2 (green) and Sat3 (red). Analyses are in plain line and 7-day forecast in dashed line.

The error reduction due to altimeter data assimilation is visible for all of the three selected regions : the free model run error spectrum is higher at all wavelengths larger

than 100 km. The assimilation corrects the $1/4^\circ$ model sea level below its own capacity to represent small scales. Below this limit of 100 km, all the simulations are gathered in one curve. This curve follows the same slope as the full sea level spectrum of the Nature Run (not shown on the plot).

As seen before, the error is reduced each time an additional altimeter is assimilated, for all wavelengths larger than 100 km and up to 1000 km. It is also the case for the analysis compared to the forecast. Analysis of spectra in a variance preserving form (not shown) shows that, compared to analysis errors, forecast errors occur at larger wavelengths; they have a maximum variance at wavelengths between 300 to 500 km while it is about 200-300 km for analysis errors.

Compared to the Free Run errors, adding one satellite (Sat1) reduces analysis errors for all wavelengths larger than 250 km. Addition of a second (Sat2) and third (Sat3) altimeter allows reducing analysis errors down to 150 km wavelength. In the KU and the GS regions, the Sat2 and Sat3 analysis errors are similar for most of the length scale. In the AG region, the assimilation of the third satellite still allows a significant analysis error reduction.

In most cases, the forecast error spectrum for the Sat3 experiment is lower than the analysis error for the Sat1 experiment for wavelengths smaller than 300 km.

4.1.6.3 Impact on surface currents and currents, temperature and salinity at depths

To assess the system ability to reproduce the Nature Run, it is necessary to analyse how non assimilated model variables are improved when assimilating sea level altimeter data. The unobserved variables are impacted by assimilating only sea level observation through two mechanisms. The first one is the multivariate characteristic of the analysis corrections computed by SAM2. The model error covariance matrix is defined with a collection of model anomalies used to calculate increment for all the model prognostic variables, SL, U, V, T and S. The second one is the non linear model dynamics that implies changes on temperature, salinity and velocities when the SSH analysis correction on sea level is added to the model forecast.

Because of geostrophy, we expect, in particular, that assimilating more altimetry data will better constrain surface velocity fields. Figure 4.11 presents the MSE of analysis and forecast for the zonal velocity U. The Free Run shows everywhere higher values for the velocity MSEs both for U and V (not shown).

Table 3 shows the same score as the one used for the Sea Level but for the MS of the analysis and forecast errors of the zonal and meridional velocity components in $\text{cm}^2.\text{s}^{-2}$. Globally and in the Gulf Stream region, the meridional and zonal velocities MSE are similar, meridional velocity MSE are slightly higher (10%) than zonal errors in the Agulhas Current and slightly lower (10% again) in the Kuroshio.

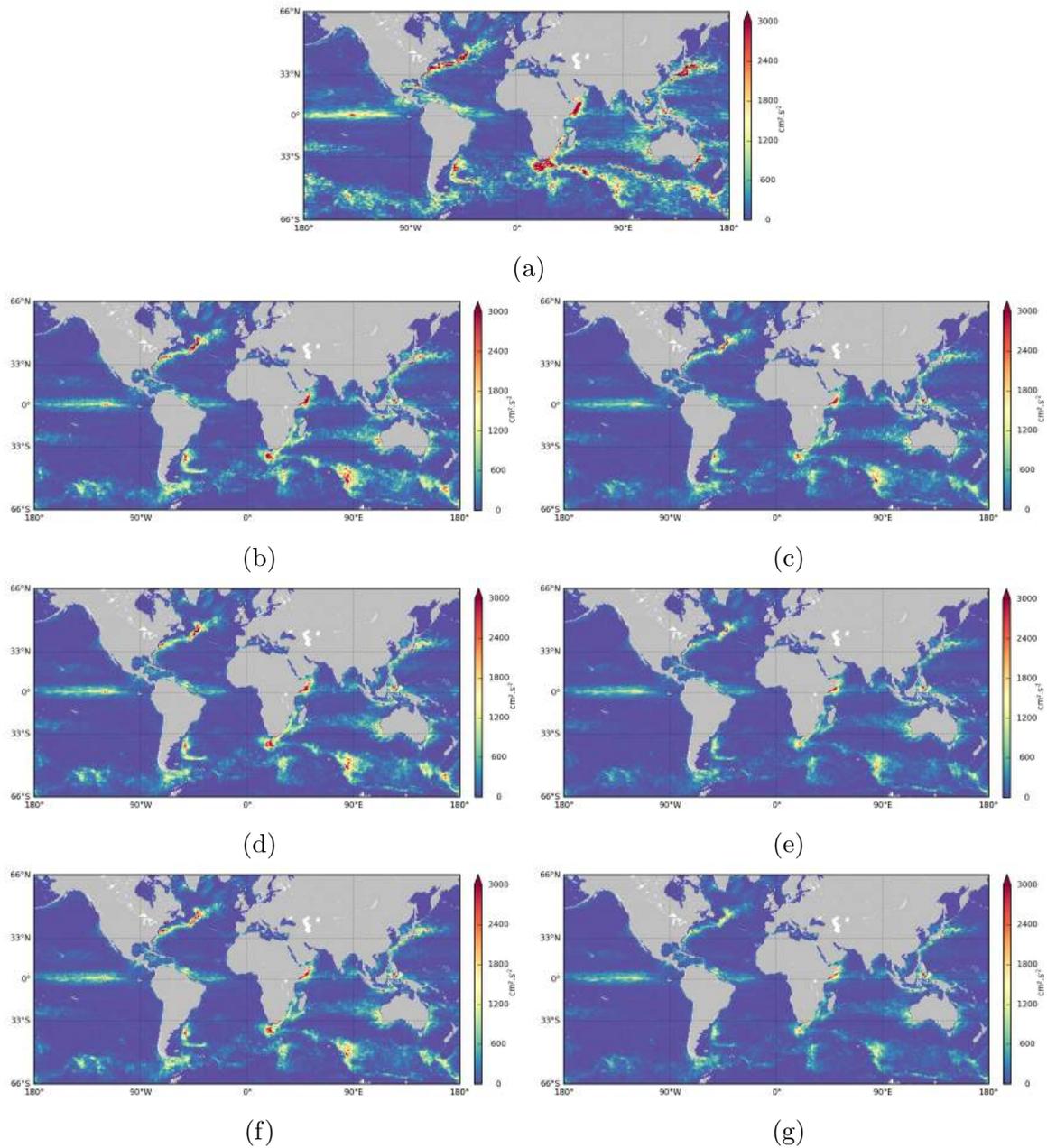


FIGURE 4.11 – Global MSE in $\text{cm}^2.\text{s}^{-2}$ of U compared to NR in cm for the FR (a), Sat1 (b,c), Sat2 (d,e) and Sat3 (f,g). 7-day forecast on the left column and analyses on the right.

| U | GLO | | GS | | AC | | KU | |
|------|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|
| | FCST | ANA | FCST | ANA | FCST | ANA | FCST | ANA |
| Sat1 | 53 | 64 | 47 | 62 | 39 | 51 | 35 | 45 |
| Sat2 | 44 | 56 | 34 | 52 | 30 | 44 | 26 | 37 |
| Sat3 | 41 | 53 | 31 | 50 | 27 | 40 | 24 | 36 |

| V | GLO | | GS | | AC | | KU | |
|------|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|
| | FCST | ANA | FCST | ANA | FCST | ANA | FCST | ANA |
| Sat1 | 57 | 67 | 57 | 72 | 39 | 48 | 50 | 60 |
| Sat2 | 47 | 59 | 41 | 61 | 30 | 43 | 35 | 48 |
| Sat3 | 42 | 55 | 34 | 56 | 26 | 39 | 32 | 47 |

TABLEAU 4.3 – Assimilated simulation relative zonal velocity (U) meridional velocity (V) and MSE in percent of the Free Run MSE.

The absolute MSEs are decreasing from Sat1 to Sat3, and are much lower than the Free Run. For each experiment, the analysis error is again reduced compared to the forecast error. The level of error for the forecast of Sat3 is, in most regions, comparable to the level of the analysis error of Sat1. The assimilation of a second satellite leads to a higher error reduction than the third one, for both analysis and forecast and in all regions.

Sat1 global analysis velocity MSEs represent 55% of the Free Run MSE. Additional error reductions of 10% and 4% occur for Sat2 and Sat3. In high eddy energy regions (GS, AC, KU), the analysis MSEs are smaller and can reach 35% of the Free Run MSE for Sat1; they continue to be reduced by 13% and 4% for Sat2 and Sat3.

Forecast velocity errors are less reduced when an additional altimeter data set is assimilated. They globally represent 65%, 57% and 54% of the Free Run MSE for respectively Sat1, Sat2 and Sat3.

Assimilation of multiple altimeter data does not only improve the surface velocity but also velocity fields at depth. Figure 4.12 shows global RMS error profiles for U and V. These plots are similar for the two velocity components and show decreasing error profile with depth. There is a clear positive impact of the assimilation of additional altimetry observations up to 2000 meter depth. The improvement brought by each additional satellite is almost uniform on the vertical and even the third altimeter improves the 3D velocity field estimation.

Assimilating sea level altimeter data also improves the temperature and salinity at depths as shown on RMS error profiles for temperature (T) and salinity (S) of Fig. 4.13. Temperature error profiles show a maximum at the thermocline depth as the salinity error decreases with depth. Globally, Sat1 gives a good improvement for T a depth, comparatively to Free Run with 0.2°C of RMS error in temperature at 200m depth. Sat2 and Sat3 are not distinguishable and only improve the RMS error score by less than 0.05°C. The experiments with altimeter data assimilation only slightly improved Salinity fields. Sea level as measured by altimetry is to a large extent the

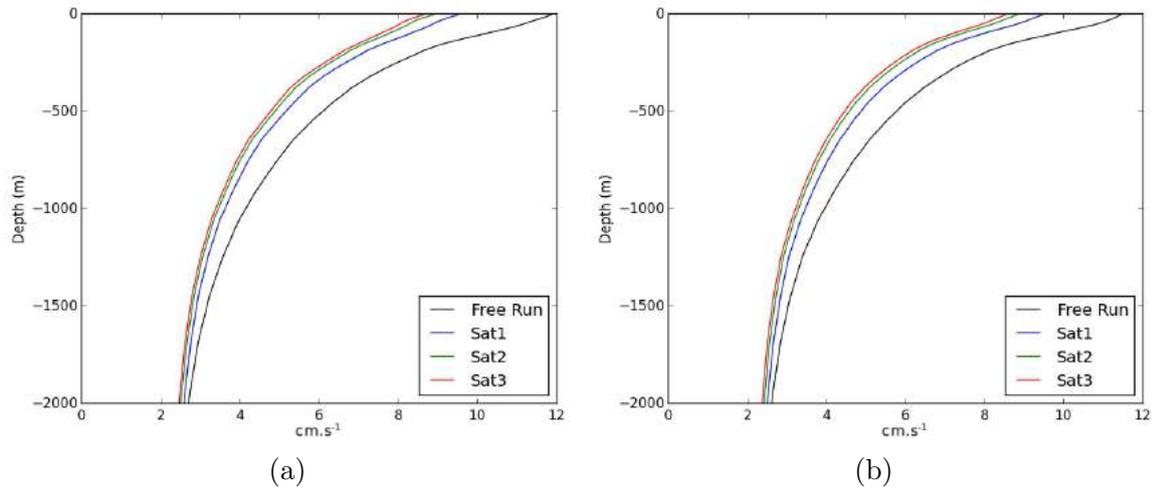


FIGURE 4.12 – Global 7-day forecast RMSE of zonal (a) and meridional (b) velocities profiles in cm.s^{-1} for RF (black), Sat1 (blue), Sat2 (green) and Sat3 (red).

signature of baroclinic processes and represents an integral of the density anomaly. As density variations are mainly related to temperature variations, this explains why assimilating altimeter data improves the representation of the upper temperature fields (e.g. Guinehut et al., 2012).

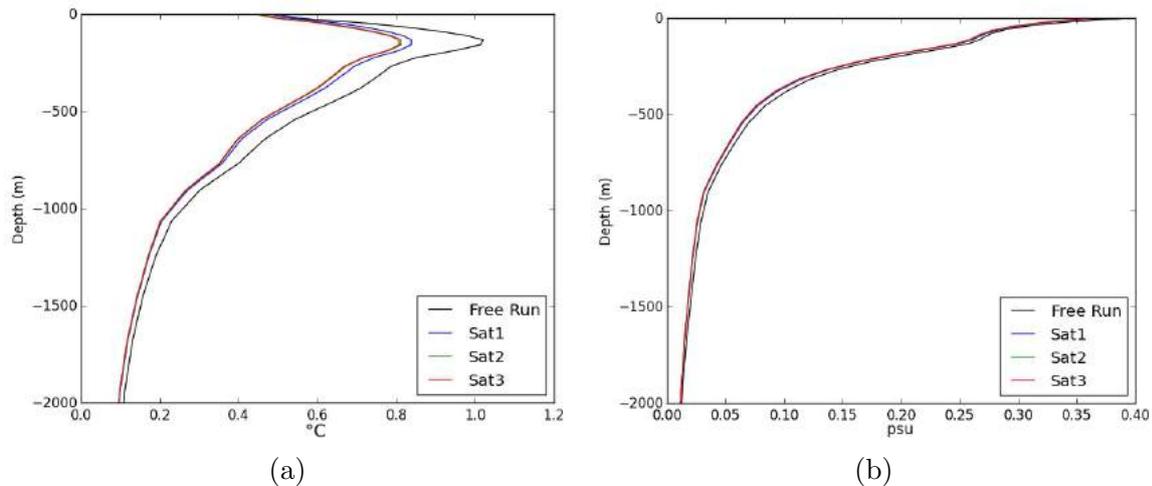


FIGURE 4.13 – Global 7-day forecast RMSE of temperature (a) and salinity (b) profiles respectively in $^{\circ}\text{C}$ and psu for RF (black), Sat1 (blue), Sat2 (green) and Sat3 (red).

4.1.7 OSSE with Argo and altimetry

Assimilating altimeter data only improves temperature fields and marginally salinity fields but errors remain large. This leads to the next part of the study concerning the Argo1 experiments. This experiment has been designed to answer how a simulated Argo profiles data set allows correcting large scales compared to the Sat3 experiment. Argo floats are designed to monitor large scale and low-frequency variability as described in Roemmich et al. (2009) and the complementarity between remote sensing observation

and in situ profiles has been studied in the North Atlantic using OSSEs-like simulations by Guinehut et al. (2004). They showed how well the estimation of 200m T fields was improved thanks to the merging of in situ profiles and altimeter data. Here one wants to assess the global impact of the Argo profiles assimilation using the idealistic configuration of OSSEs in the Mercator Ocean systems. This issue has already been explored using OSEs by Turpin et al (2016). In the latter study, the impact of Argo profiles was assessed using the operational observing array. Three experiments were intercompared, the first one where half of the Argo floats have been removed, the second where all the floats were removed and the last one where all Argo floats were assimilated. The system used in the OSEs (Model combined to an assimilation scheme) is very similar to the one that is used here, meaning $1/4^\circ$ Nemo model and the SAM2 assimilation scheme. OSEs results showed an increasing improvement in both forecast and analysis scores when more profiles are assimilated and this mainly in the 0-300m and 700-2000m depth layers.

Profiles in Fig. 4.14 represent the RMS of the error of T and S for the 7-day forecasts for the global ocean for the OSSEs Argo1 and Sat3. The black line shows the Free Run score. These scores need to be compared with the results of Turpin et al (2016) in Section 3.1.1 and 3.1.2. Profiles shown in the latter uses RMS of innovations meaning, the difference between the observed T and S profiles and the model forecast values at the observation point over the seven days of the assimilation cycle. This metric can be compared to our 7-day forecast errors, meaning the difference on the $1/4^\circ$ model grid between the 7th field of each assimilation cycle with the Nature Run.

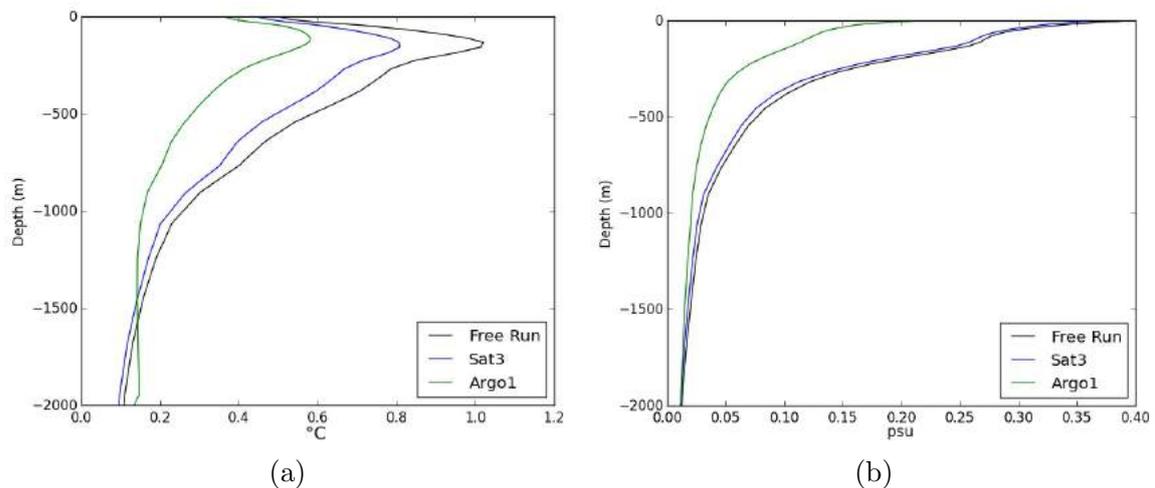


FIGURE 4.14 – Global 7-day forecast RMSE of temperature (a) and salinity (b) profiles respectively in $^\circ\text{C}$ and psu for RF (black), Sat3 (blue) and Argo1 (red).

It is then expected that scores may differ from one set of experiment to the other. Moreover there are no reasons for the Nature Run to be similar to the ocean state estimated by OSEs and so the results to be exactly the same.

Now considering these OSE and OSSE results, we see that the given profiles are very

similar. As we explained in the previous part, temperature fields at depth are improved compared to the Free Run when altimetric sea level observations are assimilated and this conclusion can also be made when looking at the OSEs results when analysing the corresponding Free Run and RunNa (meaning No Argo) OSEs of Turpin et al. (2016). In the OSSEs, maxima of RMS errors drop from 1.2°C (Free Run) to 0.9°C (Sat3) and in the OSEs, it goes from 1.35°C (Free Run) to 1.18°C (RunNa). For S, both protocols give the similar conclusion that salinity is not highly impacted by altimetry data assimilation.

Improvement brought by the Argo float assimilation is explained by the comparison between Argo1 and Sat3 for OSSEs and the RunOP (for Operational Run) and RunNa for Turpin et al. (2016) OSEs. Temperature RMS error maximum reaches 0.6°C for Argo1 and 1°C in the RunOP ; in both cases it is reduced compared to simulations without Argo profiles assimilations. Concerning Salinity, maxima are located at the surface and are close to 0.2 psu for Argo1 and 0.17 psu for RunOP. The major improvement is done in Argo1 where the RMS error is divided by almost two compared to Sat3.

This comparison helps to validate the results of the OSSE experiments. The similarity of the error profiles for both the OSE and OSSE is a good indication of the realism of the OSSE experimental context, at least in term of errors relative to the “Nature Run” for the OSSE and the real ocean for OSEs.

Figure 4.15 maps give a better understanding of how and where the improvements are made in Argo1 compared to Sat3. They represent the RMS error of temperature at the surface, 318m, 902m and 1941m. Those depths correspond to model vertical level. Only fields in the upper 2000m are shown because it is the maximum depth for Argo profiles.

Sat3 RMS error maps show larger scale patterns compared to the Argo1 fields where much more small structures are visible. At the surface, in-situ data assimilation is the most effective in the southern ocean where RMS errors are strongly driven back to a much smaller value (from more than 2°C to less than 0.8°C). Elsewhere Argo1 presents weaker and smaller RMS error compared to Sat3.

The 318m depth is the most impacted level by the assimilation presented here. The strong RMS error in the Atlantic is efficiently corrected in Argo1 and values are reduced everywhere else. Errors show smaller structures and only remain high in the WBCs.

The last two maps (at 902m and 1941m) give similar results but in a much less significant way. Big patterns in Sat3 are corrected and lead to small RMS error structures in Argo1.

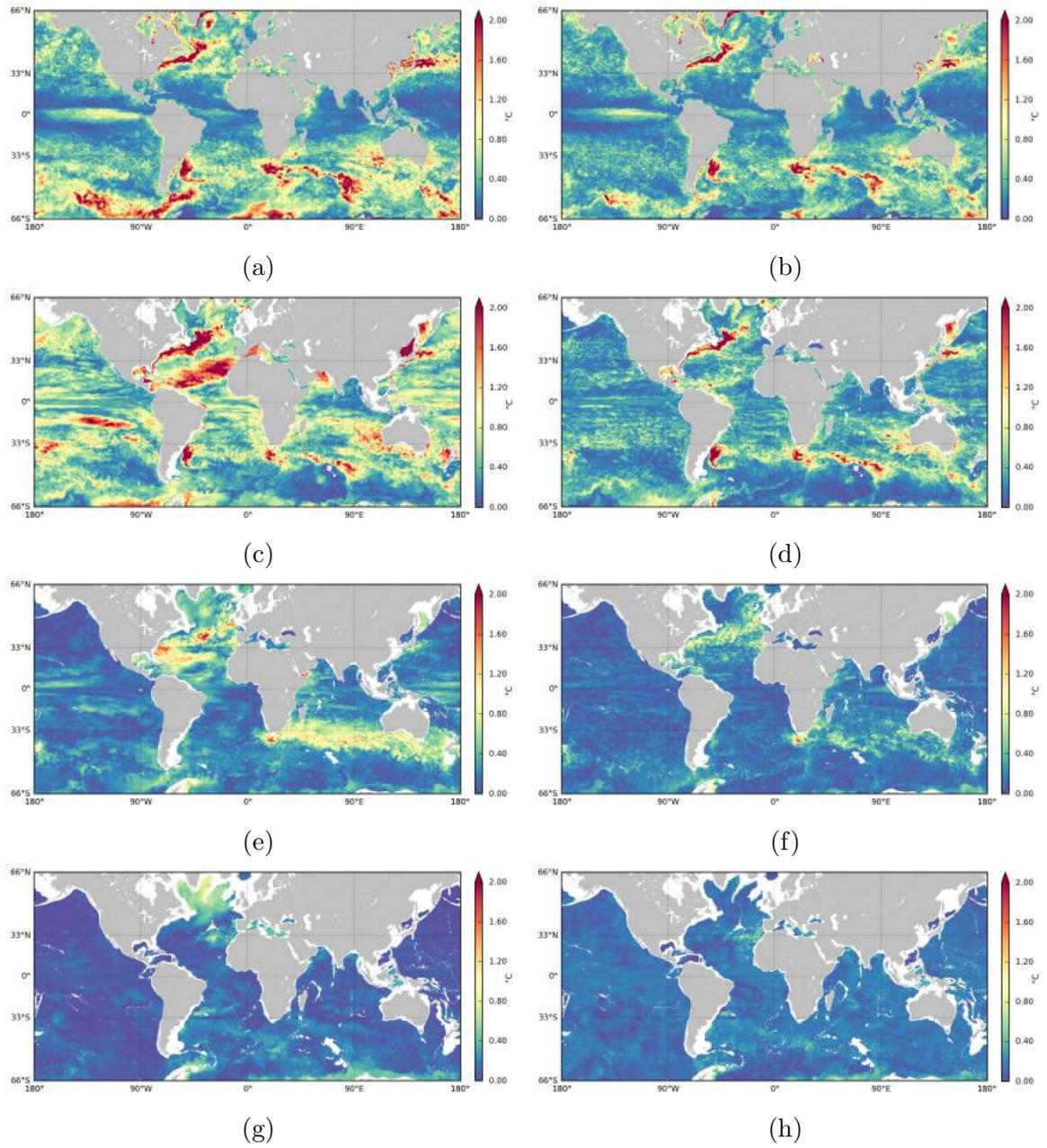


FIGURE 4.15 – 7-day forecast RMSE of temperature in $^{\circ}\text{C}$ for Sat3 (left) and Argo1 (right) at the surface (a,b), 318m (c,d), 902m (e,f), and 1941m (g,h).

4.1.8 Conclusion

A series of Observing System Simulation Experiments (OSSEs) was carried out with a global data assimilation system at $1/4^\circ$ resolution using simulated data derived from a $1/12^\circ$ resolution free simulation. The objective was to quantify how well multiple altimeter missions and Argo can constrain a global data assimilation system. Impact of multiple altimeter data is clearly evidenced. The first altimeter is the one that reduces the most the error and corrects large scale sea level biases. This was also found in OSEs conducted with different real time forecasting systems (e.g. Lea et al., 2014; Oke et al., 2015) where the first altimeter contributes the most to the Sea Level error reduction. Forecasts of sea level and ocean currents continue to be improved when moving from one altimeter to two altimeters with a relative error reduction of almost 30 %. The addition of a third altimeter still improves the forecasts even at this medium $1/4^\circ$ resolution and brings an additional relative error reduction of about 10 %.

Results show that a third altimeter still provides sea level and ocean current error reduction in every highly dynamic area such as WBCs. This is because in WBCs a $1/4^\circ$ model is not able to create structures with scales smaller than 100-200km, but when assimilating several altimeters, this limit falls closer to 100km. Assimilating altimeter data improves the representation of the upper temperature fields. The addition of Argo has a major impact to improve temperature fields and demonstrates the essential role of Argo together with altimetry to constrain the ocean interior in a global data assimilation system. Salinity fields are only marginally improved. Results derived from these OSSEs are consistent with those derived from experiments with real data (OSEs) but they allow a more detailed analysis of errors. They also show that our OSSEs are well calibrated to simulate the impact of observing systems on our ocean analyses and forecasts.

The study is now being extended to analyse the impact of extension of Argo (deep Argo, improved coverage in western boundary currents and in the tropics), evolution of the altimeter constellation and impact of the other elements of the global in-situ observing systems (e.g. moorings, gliders).

4.2 Impacts globaux et régionaux de l'assimilation du jeu de profils augmenté

La comparaison des trois simulations Sat3, Argo1 et Argo2 entre elles va permettre d'évaluer l'impact dans les courants de bord ouest et à l'équateur sur les analyses et prévisions de l'assimilation d'un jeu de profils dont la densité spatiale a été artificiellement doublée. Ces expériences ont déjà été décrites (voir Section 3.5.2).

L'utilisation de la flotte augmentée répond aux prescriptions du JCOMMOPS basées sur les travaux de Qiu et al. 2012. Une augmentation de la densité du réseau d'observations devrait permettre une meilleure description des zones de fronts et des dynamiques associées (méandres, tourbillons mesoéchelle), des transports de masse et d'énergie (température, salinité) ou encore des échanges avec l'atmosphère.

Les impacts de ce jeu augmenté de profils seront étudiés à l'échelle du globe puis dans les courants de bord ouest et à l'équateur. L'étude se portera ensuite sur l'étude de la structure verticale en température et salinité et de la position des fronts de température dans certaines régions.

4.2.1 Impacts globaux

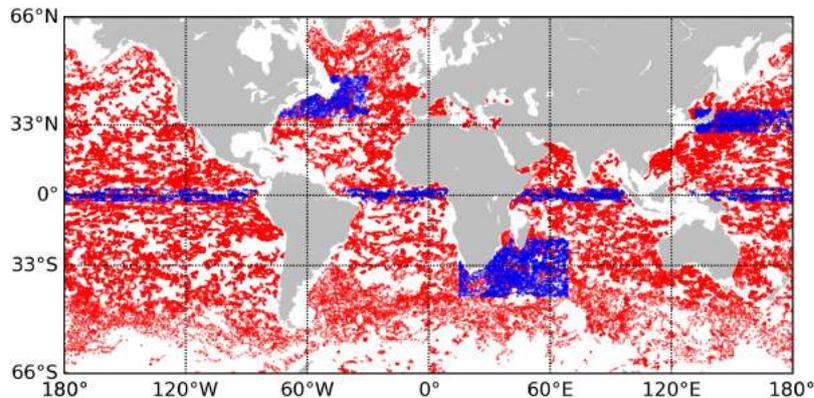


FIGURE 4.16 – Positions des profils Argo en 2009 (rouge) et 2010 (bleu) assimilés dans la simulation Argo2.

La Fig. 4.16 montre l'ensemble des profils assimilés dans la simulation Argo2. Les points bleus indiquent les données supplémentaires assimilées dans les régions qui seront étudiées dans cette partie. Nous observons la forte disparité de densité des profils avec un fort échantillonnage du Kuroshio par rapport aux autres courants de bord ouest et un réseau plus relâché dans l'Atlantique Sud par exemple.

Les profils de la Fig. 4.17 montrent les fortes réductions des MSE de température et de salinité amenées par les profils Argo au niveau global par rapport aux simulations n'assimilant pas de données in situ (Sat3 et Free Run). L'impact en température est visible jusqu'à environ 2000 m (limite de plongée des profileurs) et en salinité jusqu'à

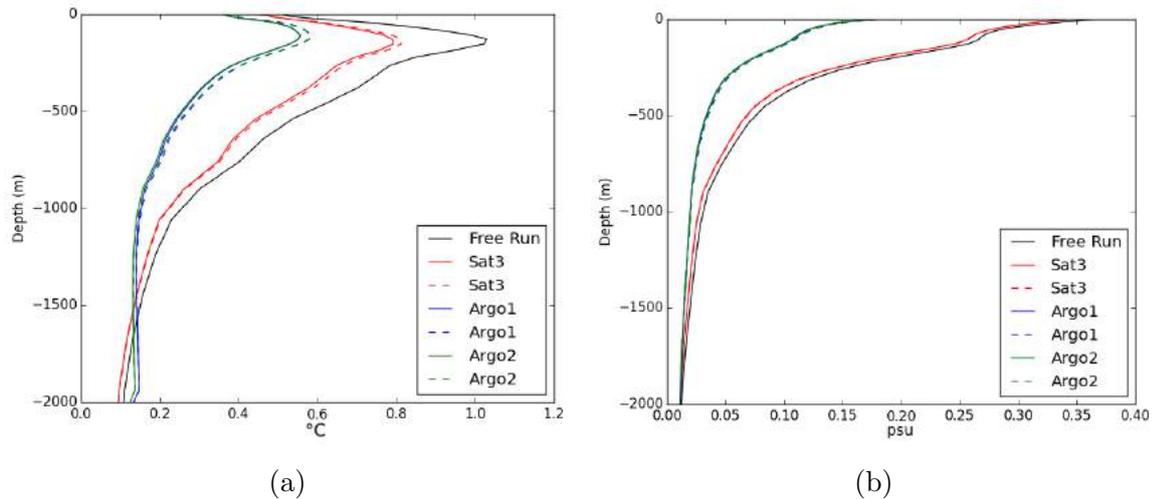


FIGURE 4.17 – Profils de RMSE globaux en analyse (traits pleins) et prévision à 7 jours (pointillés) pour Sat3, Argo1 et Argo2 en température (T) (a) et salinité (S) (b). Le Free Run est donné pour comparaison

1000 m. L'analyse (traits pleins) en température et salinité est meilleure que la prévision (pointillés). A l'échelle globale, il n'y a pas de différence nette entre les simulations Argo1 et Argo2. Pour la suite de l'étude, le choix a été fait de s'éloigner de la surface et de l'influence des forçages et de se placer à la profondeur modèle de 318 m.

La Table 4.4 montre les score relatifs au Free Run en % de RMSE en température et salinité à 318m. En température, globalement Argo1 et Argo2 améliorent les erreurs de la simulation Sat3 d'environ 40 % en analyse et prévision. Dans les courants de bord ouest (GS, AC, KU), les erreurs de température sont améliorées de 16 % en analyse et prévision. Dans la bande équatoriale (Eq : +3°N/-3°S) les scores de Sat3 sont équivalents à ceux du Free Run montrant le faible impact de l'altimétrie par rapport à l'in situ dans cette région. Les RMSE de température sont réduites de 35 % en moyenne par Argo1 et Argo2. Les améliorations apportées par Argo2 sont de l'ordre de 1 % par rapport à Argo1 globalement et dans les courants de bord ouest. La zone équatoriale est plus sensible avec des améliorations de l'ordre de 3 %.

La salinité est en moyenne réduite de 50 % à l'échelle du globe et de 35 % dans les courants de bords ouest. La bande équatoriale montre aussi des scores de salinité comparables entre Sat3 et Run Free. Dans cette région, Argo1 et Argo2 réduisent les erreurs d'environ 42 %. La salinité montre donc des corrections d'erreurs plus importantes que la température lorsque sont assimilées des données in situ. Argo2 améliore d'environ 2 % la salinité par rapport à Argo1.

Les profils de RMSE de température (Fig. 4.18) et de salinité (Fig. 4.19) montrent, dans les quatre régions considérées (GS, AC, KU, EQ), le fort impact d'un jeu simple de profileurs mais le faible écart entre Argo1 et Argo2 notamment en salinité. Cependant, les améliorations sont systématiques et les scores constamment améliorés par Argo2.

A partir de 1500 m de profondeur environ, apparaît une faible augmentation de la

| T | GLO | | GS | | AC | | KU | | EQ | |
|-------|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|
| | FCST | ANA |
| Sat3 | 84 | 82 | 67 | 61 | 52 | 46 | 57 | 52 | 100 | 100 |
| Argo1 | 49 | 46 | 47 | 39 | 46 | 40 | 35 | 30 | 67 | 66 |
| Argo2 | 48 | 46 | 46 | 39 | 45 | 39 | 34 | 29 | 64 | 63 |

| S | GLO | | GS | | AC | | KU | | EQ | |
|-------|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|
| | FCST | ANA |
| Sat3 | 92 | 91 | 87 | 84 | 63 | 59 | 80 | 77 | 100 | 100 |
| Argo1 | 41 | 40 | 41 | 35 | 43 | 39 | 45 | 42 | 59 | 58 |
| Argo2 | 41 | 39 | 38 | 33 | 41 | 37 | 44 | 41 | 57 | 56 |

TABLEAU 4.4 – RMSE en température (T) et salinité (S) à 318 m pour les simulations Argo1, Argo2 et Sat3 en % de la RMSE du Free Run.

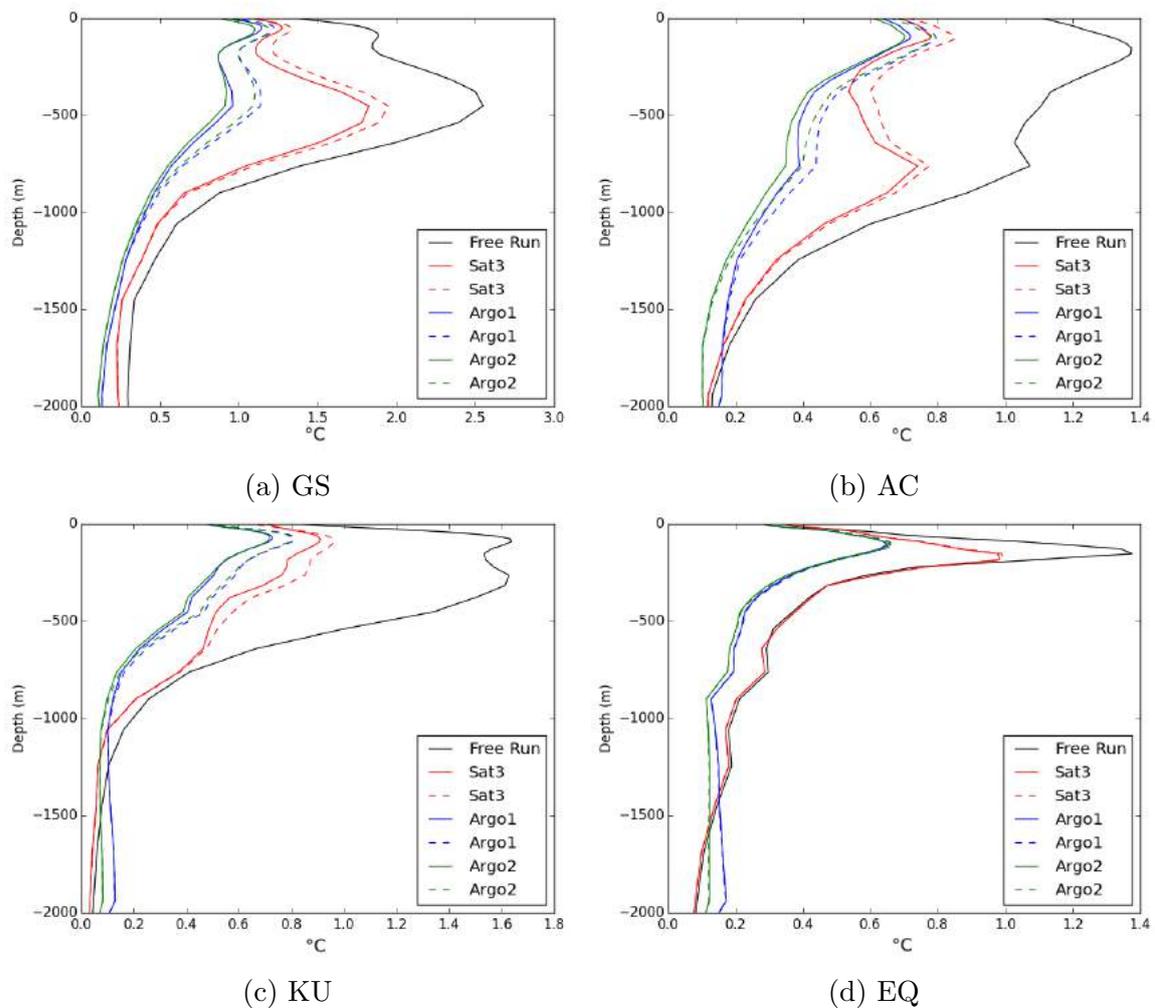
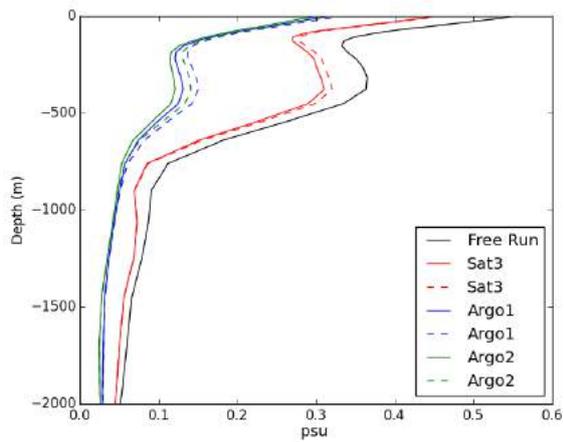
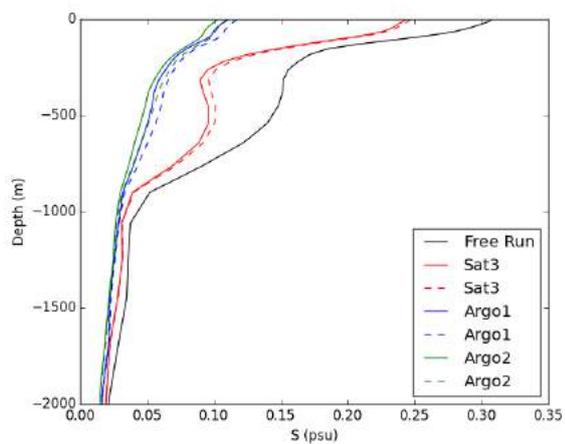


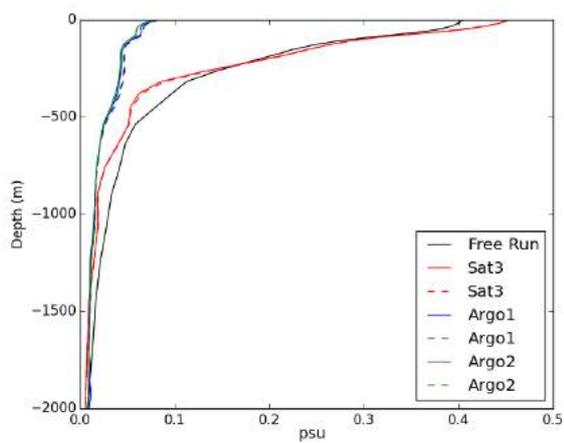
FIGURE 4.18 – Profils régionaux de RMSE de température (T) pour Run Free, Sat3, Argo1 et Argo2 (°C).



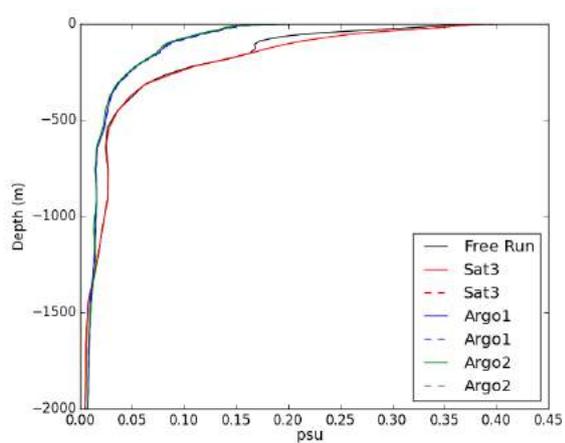
(a) GS



(b) AC



(c) KU



(d) EQ

FIGURE 4.19 – Profils régionaux de RMSE de salinité (S) pour Run Free, Sat3, Argo1 et Argo2 (psu).

RMSE de température. Cela est dû à un biais d'environ 0.1 °C qui tend à être réduit par Argo2. L'origine de ce faible biais n'est pas déterminée

4.2.2 Impact dans le Gulf Stream

L'intérêt des Argo est de permettre une meilleure description de la structure verticale de la colonne d'eau. Parmi les différents courants de bord ouest étudiés, le Gulf Stream est le plus sensible en température et en salinité par l'assimilation de données in situ jusqu'à 2000 m (Fig. 4.18 et 4.19). C'est dans cette région que la capacité des flotteurs Argo à mieux décrire les phénomènes précédemment cités va être analysée.

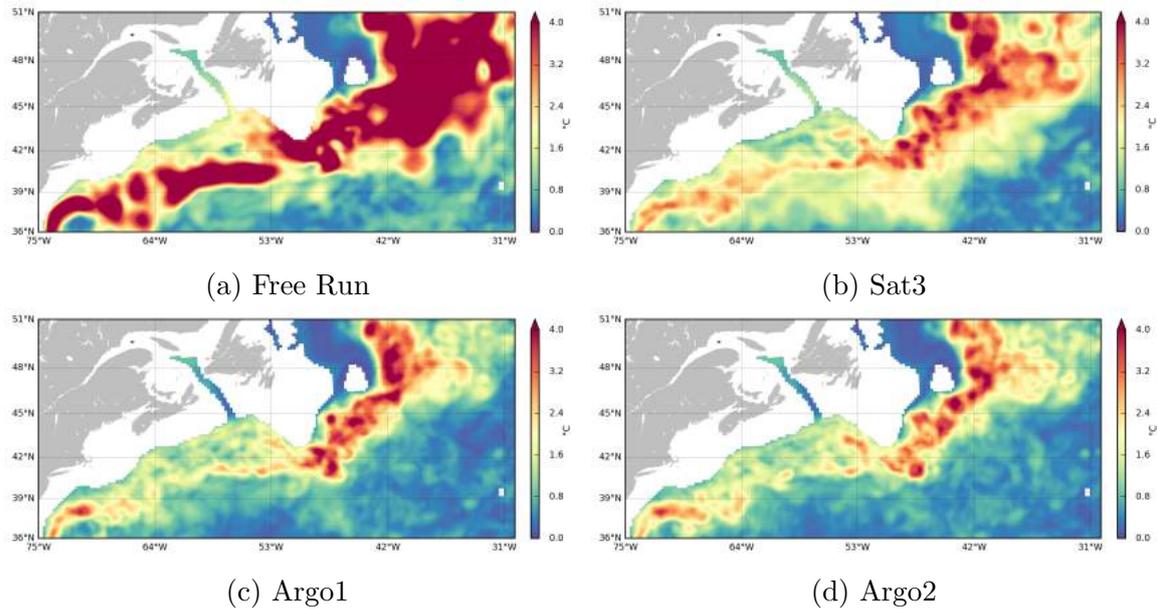


FIGURE 4.20 – Cartes de RMSE en prévision de température (T) dans le Gulf Stream à 318m (°C).

Les cartes des Fig. 4.20 et 4.21 montrent les RMSE en prévision de température et salinité à 318 m de profondeur. Ces cartes montrent la diminution des RMSE dans cette région lorsqu'un seul jeu de données Argo est assimilé. L'amélioration se poursuit sensiblement dans Argo2 notamment dans la partie nord est de la région. C'est cette zone qui a été sélectionnée pour étudier les structures verticales en T et en S estimées par les 4 simulations.

4.2.2.1 Impact sur la structure verticale des champs de température et de salinité dans le Gulf Stream

Une boîte de 10°x10° est définie de 41°N à 51°N et de 41°O à 31°O dans la zone de convergence avec le courant du Labrador. Un diagramme température/salinité des 4 simulations couvrant la période de juin à décembre décrit la structure verticale en température et salinité de cette régions (Fig. 4.22).

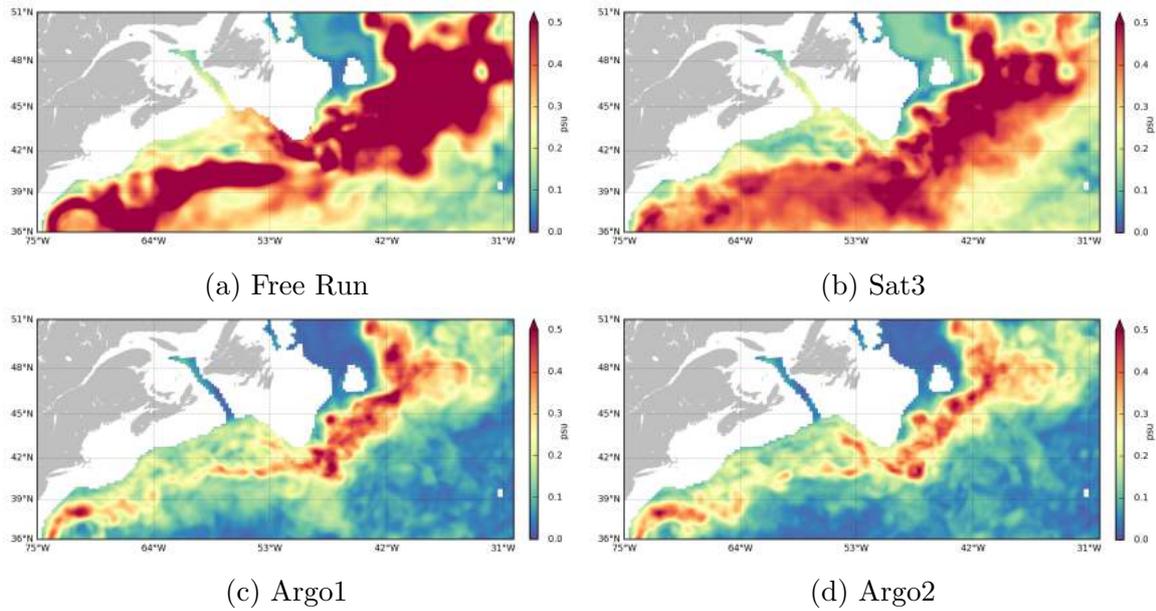


FIGURE 4.21 – Cartes de RMSE en prévision de salinité (S) dans le Gulf Stream à 318m (psu).

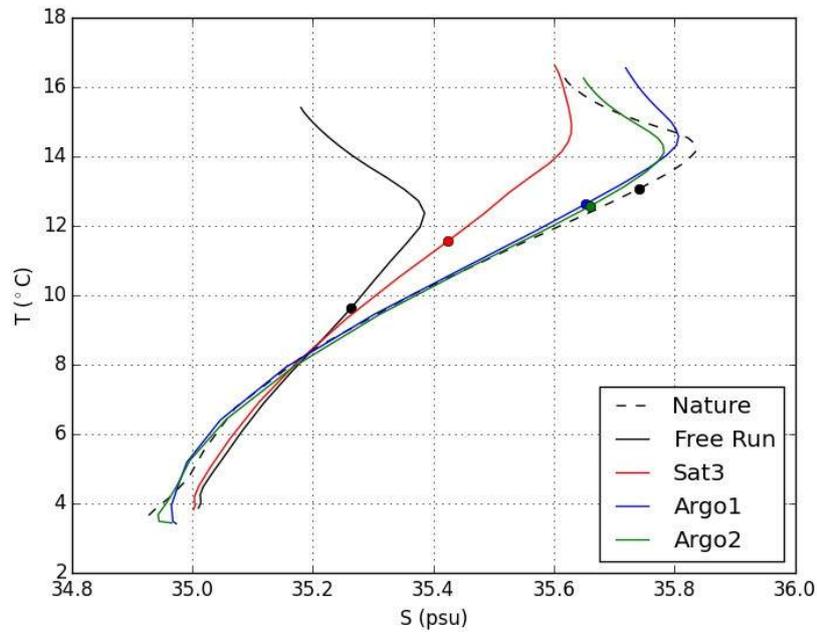


FIGURE 4.22 – Diagramme température/salinité, sur la période de juin à décembre, jusqu'à 2000 m, dans la boîte (41°N-51° N ; 41°O-31°O), les points indiquent la profondeur de 318 m.

Ce diagramme permet de visualiser de manière condensée les caractéristiques (température et salinité) des masses d'eau océaniques. Le Nature Run, ici en pointillés noirs montre des eaux se refroidissant et gagnant en salinité avec la profondeur, qui a continué de se refroidir et de perdre du sel jusqu'à 2000 m. La courbe du Free Run (en bleu) montre un comportement similaire mais avec des eaux plus froides et moins salées. L'assimilation de données altimétriques (Sat3, courbe rouge) permet de se rapprocher de la salinité de surface mais engendre un léger biais positif. Sur les premiers mètres, la salinité est relativement constante (35.6 psu). Sat3 crée globalement des eaux plus froides et moins salées. L'assimilation du premier jeu d'Argo (Argo1, courbe bleue) permet d'améliorer la température à l'exception de la surface qui est toujours légèrement plus chaude. En effet, la température de la profondeur 318 m s'est fortement rapprochée de celle du Nature Run. Argo1 montre un biais positif de salinité à la surface puis un biais négatif. Sur le reste de la colonne d'eau, Argo1 est très proche du Nature Run. En doublant le jeu d'Argo (Argo2, courbe verte), le biais de température de surface est presque nul tandis que le biais de salinité est réduit par rapport à Argo1. De manière générale, sur la colonne d'eau, c'est Argo2 qui montre le comportement le plus proche du Nature Run.

Ce comportement était difficile à observer en ne s'intéressant qu'aux cartes et profils de RMSE. Cette région du Gulf Stream est la plus sensible parmi celle qui ont pu être observées via ce type de diagramme. Cependant la simulation Argo2 est toujours la simulation permettant de recréer au mieux les structures verticales en température et salinité du Nature Run.

4.2.2.2 Impacts sur le front de température dans le Gulf Stream

Les fronts de températures océaniques sont des phénomènes essentiels dans les machines océanique, atmosphérique et climatique. Les forts gradients de température présents engendrent d'importants transferts d'énergie des zones chaudes vers les zones froides. Spatialement peu étendus, leur position géographique (horizontale et verticale) est primordiale dans la dynamique océanique. Cette section s'intéresse à la capacité des simulations Argo1 et Argo2 à reproduire ces zones de forts gradients.

La position moyenne, sur la période de juin à décembre, du front du Gulf Stream est ici déterminée par l'isotherme 14°C à 318 m pour les simulations Free Run, Sat3, Argo1 et Argo2 (voir Fig. 4.23).

Les aires colorées représentent la surface comprise entre les bornes 13.9°C et 14.1°C pour isoler l'isotherme 14°C. Le Run Free est incapable de reproduire la position moyenne du front. L'assimilation de données altimétriques permet de sensiblement repositionner le front dans sa partie la moins turbulente. Argo1 corrige encore la position moyenne du front et lui permet de suivre le front du Nature Run dans la convergence avec le courant du Labrador. Argo2 n'améliore pas la position du front. Il semble que

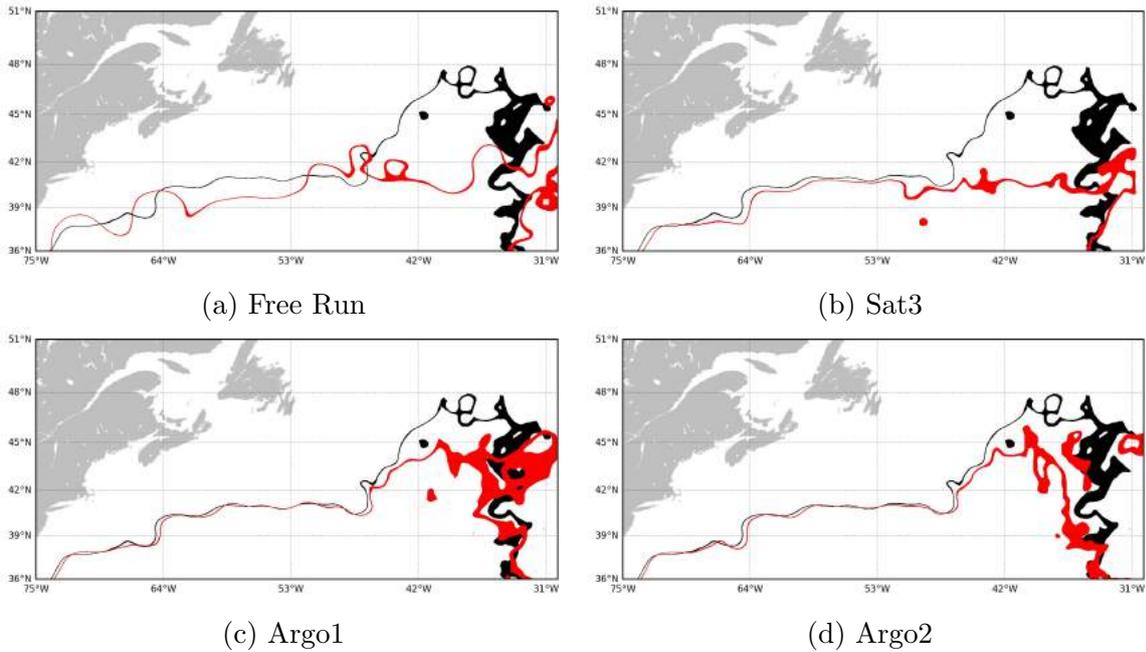


FIGURE 4.23 – Position moyenne de juin à décembre du front (isotherme 14°C à 318 m) dans le Gulf Stream. La ligne rouge représente le front des différentes simulations et la ligne noire le front du Nature Run.

le gradient soit plus précis dans la zone de convergence avec le courant du labrador. Cependant, sur des événements isolés (non montrés) l'amélioration apportée par Argo2 est évidente et permet de mieux replacer le front.

Cette position horizontale du front est à associer à sa structuration verticale. Une section Nord/Sud a été définie à la longitude de 57°O et entre 36°N et 46°N dans le Gulf Stream (Fig. 4.24).

La Figure 4.24 montre aussi la différence entre Nature Run et le Free Run. La simulation Sat3 permet de recalibrer la position des forts gradients mais les isothermes ne sont pas correctement placés par rapport au Nature Run. Ces derniers sont mieux contraints dans Argo1 et encore mieux positionnés avec Argo2. Ces deux diagnostics restent à approfondir pour en déduire des résultats concrets liés à l'assimilation de données in situ plus nombreuses. Ils permettent en revanche de percevoir l'intérêt d'un jeu augmenté dans un contexte océanographique et non plus d'assimilation de données pure. Argo2 apporte une meilleure description de la dynamique de la région du Gulf Stream et il en va de même pour les autres régions, malgré des résultats moins marqués. En étudiant le même type d'expériences sur une plus longue période, il serait possible d'obtenir des résultats plus concrets en analysant des phénomènes saisonniers. En effet, ici, nous ne considérons qu'une période de 7 mois, ce qui est court pour une analyse des phénomènes concernés par le réseau de profileurs Argo. En conclusion, notre analyse montre un faible impact de l'augmentation de la densification du nombre de flotteurs argo dans les courants de bord ouest et la zone équatoriale. Ceci peut être dû à la résolution du modèle utilisé (1/4°). Il faudrait aussi analyser l'impact du choix a priori

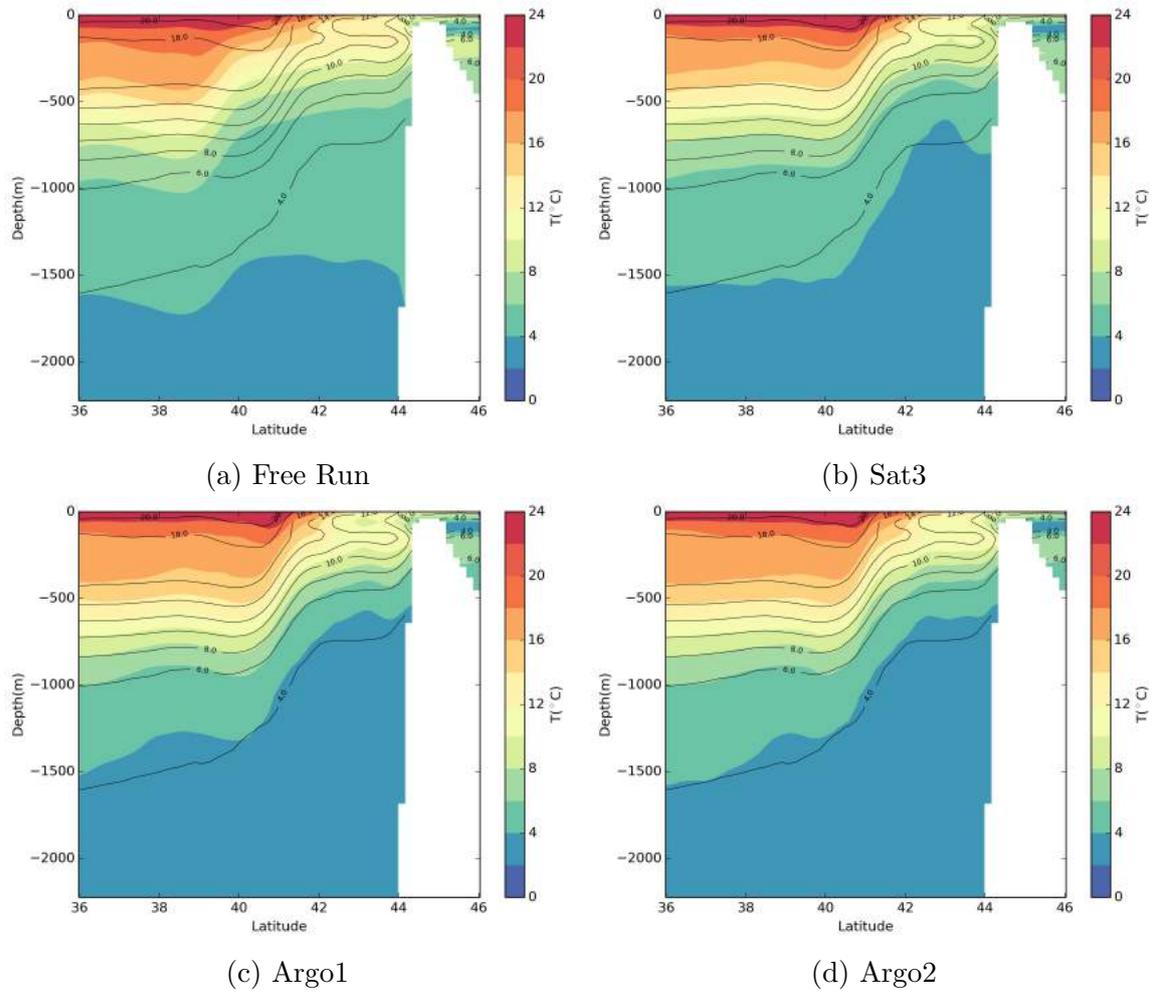


FIGURE 4.24 – Section verticale, en latitude et en température (T) dans le Gulf Stream (57°O). Les isothermes noires indiquent le Nature Run.

des profils d'erreur sur la température et la salinité. Des expériences complémentaires devront être menées pour mieux comprendre la sensibilité de l'analyse à ces choix.

4.3 Évaluations des prévisions via l'utilisation de forecast skill dans le système au 1/4°

Afin d'évaluer la qualité des prévisions faites par les différentes simulations, nous avons repris le principe des scores de prévisions (forecast skill - FS) couramment employés en prévision météorologique. Les FS sont multiples et se basent sur des considérations probabilistes plus ou moins élaborées (Hamill et Juras, 2006). Cependant, l'objectif reste le même : le but est d'obtenir un chiffre global ou régional permettant d'apprécier la qualité d'une prévision par rapport à une référence. Nous avons utilisé un FS permettant d'évaluer nos prévisions par rapport à leur persistance à 7 jours. Après avoir explicité le calcul du FS, les scores seront étudiés de manière globale pour le niveau de la mer

4.3.1 Calcul des Forecast Skill

Ici, nous avons comparé la variabilité de l'erreur à des prévisions à 7 jours (nommée MSF), déjà présentées précédemment par rapport à la persistance de prévision. La persistance consiste à calculer la variabilité de l'erreur commise par rapport au NR si, au lieu de réaliser une prévision, l'état du modèle au premier pas de temps du cycle de prévision était propagé à travers tout le cycle de manière invariante. Nous nommerons cette grandeur MSP.

Le calcul du FS se présente comme suit :

$$FS = 1 - \frac{MSF}{MSP} = 1 - \frac{\sum (FCST_{t_0+7} - NR_{t_0+7})^2}{\sum (FCST_{t_0} - NR_{t_0+7})^2} \quad (4.2)$$

Le FS est borné par 1 et sera négatif si la prévision est moins bonne qu'une persistance. En effet, si la variabilité de l'erreur de prévision est très faible devant la persistance, leur fraction tendra vers 0. De la même manière si elle est très grande le ratio ne sera pas limité positivement.

Les champs de variabilité d'erreur de prévisions et la persistance ne sont pas uniformes dans l'espace. Aussi ces scores vont varier en fonction de la dynamique des différentes régions considérées.

Le FS est dépendant de la qualité de la prévision mais aussi de la qualité de l'analyse, qui intervient dans la formulation de la persistance. Ce score permet d'informer sur la qualité de la prévision par rapport à la persistance et non pas par rapport à la réalité représentée par le Nature Run.

Les différents FS pour SL sont donnés en Table 4.5

| Expériences | Sea Level |
|-------------|-----------|
| Sat1 | 0.22 |
| Sat2 | 0.28 |
| Sat3 | 0.31 |

TABLEAU 4.5 – Forecast skills globaux pour le niveau de la mer dans le système d’assimilation au $1/4^\circ$

4.3.2 Étude des scores de FS

Les résultats de FS de la Table 4.5 pour le niveau de la mer montrent une amélioration globale lorsque le nombre de données altimétriques assimilées est augmenté. En effet, plus ce score est proche de 1, plus les erreurs de prévisions sont faibles devant la persistance. Concernant la prévision de hauteur de mer (SL), ce score passe de 0.22 pour Sat1 à 0.31 pour Sat3.

Ces premiers résultats montrent que globalement l’ajout de nouvelles données altimétriques dans le système de prévision et d’analyse permet d’améliorer la prévision à 7 jours comparativement à la persistance.

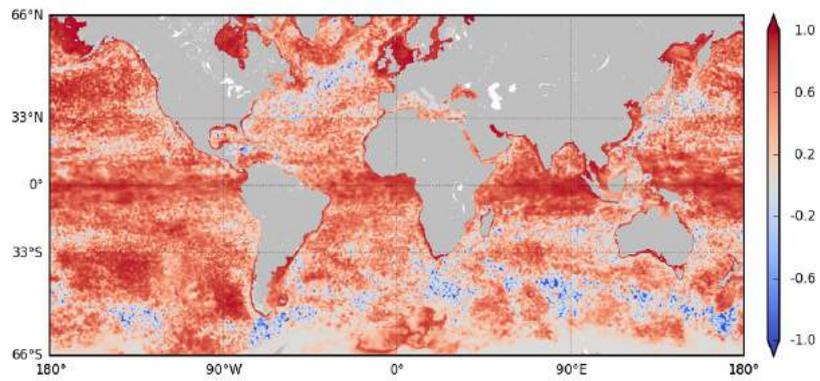
Les cartes de la Fig. 4.25 représentent le FS pour le niveau de la mer et pour les simulation Sat1, Sat2 et Sat3. Les régions rouges indiquent les zones où le FS est positif et les régions bleues là où il est négatif.

Les trois cartes sont très similaires et reflètent bien le peu d’écart constaté entre les différents FS dans le paragraphe précédent. Le score est globalement positif montrant ainsi qu’il est préférable de réaliser une prévision plutôt que d’utiliser la persistance afin de d’obtenir un état estimé de l’océan à 7 jours. Les régions concernées sont majoritairement des zones peu dynamiques et fortement dépendantes des forçages atmosphériques (e.g centre des gyres, équateur).

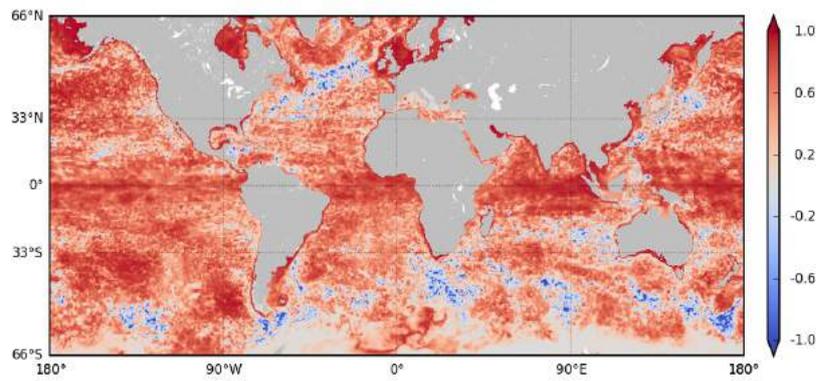
Ce résultat s’explique en partie par le calcul du FS mais aussi par le choix des forçages pour les différentes simulations (NR et AR). En effet les forçages sont les mêmes que ce soit pour NR ou pour les expériences d’assimilation. Ainsi en comparant les prévisions avec le NR à la même date les sources d’erreur liées aux forçages ne sont pas présentes. En observant séparément les cartes de variabilité d’erreur de prévision et de persistance (MSP) e niveau de la mer de la simulation Sat3 (Fig. 4.26), des structures d’erreur apparaissent (Pacifique, équateur) dans la première qui sont absentes dans la deuxième. Ces structures sont liées au fait que pour le calcul de MSP, nous comparons l’état de l’océan au début du cycle avec l’état du NR 7 jours plus tard.

Les zones à FS négatif correspondent à des régions ayant une forte dynamique comme les extensions des courants de bord ouest et le courant circumpolaire. Autrement dit, les erreurs commises à 7 jours en propageant l’état initial du cycle présentent une variabilité plus faible que les erreurs de prévisions à 7 jours.

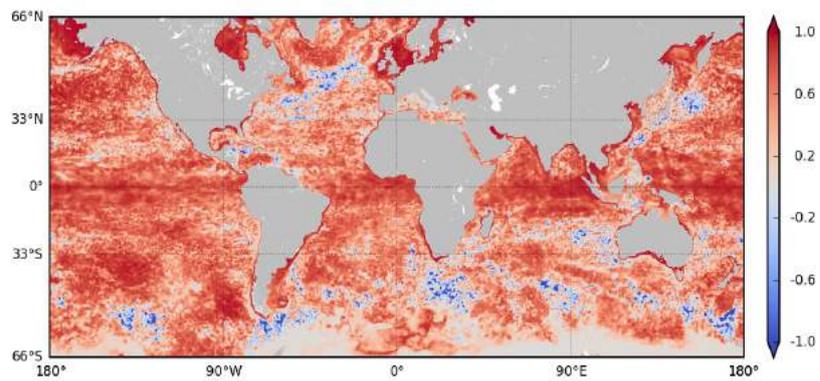
Ce comportement dans les zones à forte variabilité peut être dû au fait que les champs au début du cycle présentent une dynamique plus forte et plus proche du NR



(a)

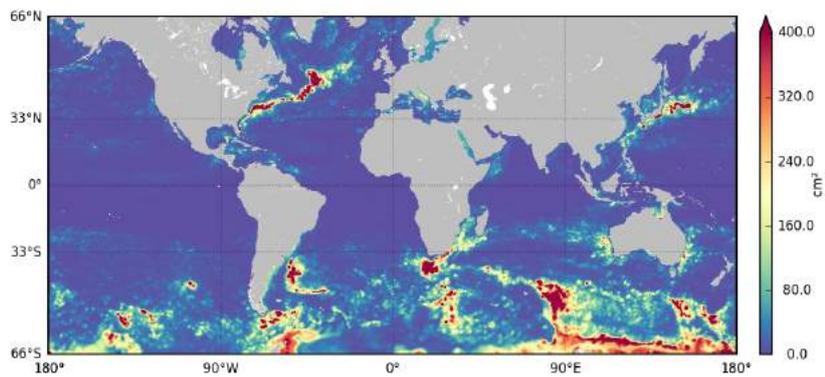


(b)

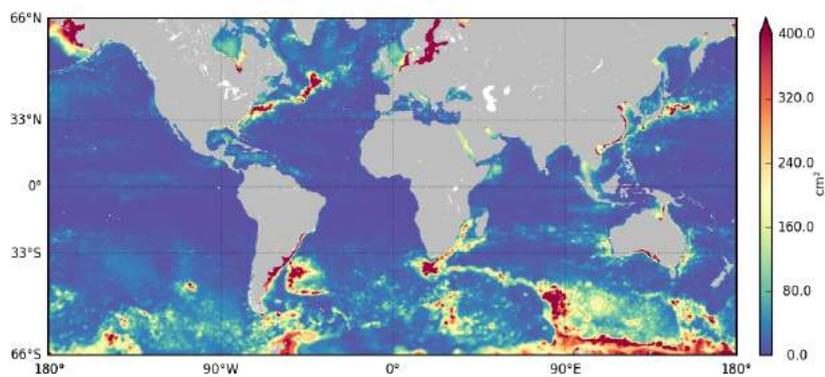


(c)

FIGURE 4.25 – Forecast Skill pour le niveau de la mer (SL) pour les simulations Sat1 (a), Sat2 (b) et Sat3 (c).



(a)



(b)

FIGURE 4.26 – Cartes de variabilité d'erreur de prévision (a) et de persistance (b) pour le niveau de la mer (SL) en cm^2 pour la simulation Sat3.

qu'au 7^{ème} jour de prévision (voir spectres Section 4.1.6.2). Dynamiquement parlant, les champs observés 7 jours avant seraient plus proches du NR que les champs prévus malgré les 7 jours de différence.

Dans les zones où la dynamique est moins intense, les modèles au 1/4° des OSSEs et au 1/12° du NR présentent des comportement plus proches d'où une diminution des erreurs de prévision. Il existe toutefois des régions de faible extension à proximité des bords ouest qui présentent un score s'améliorant avec le nombre de données satellites assimilées.

Chapitre 5

Impact des observations
altimétriques de type SAR dans les
systèmes de prévisions $1/4^\circ$ et $1/12^\circ$

Sommaire

| | | |
|------------|--|------------|
| 5.1 | Introduction | 109 |
| 5.2 | Impact SAR/LRM dans un système au 1/4° | 110 |
| 5.2.1 | Impact de la donnée SAR sur la température | 110 |
| 5.2.2 | Impact de l'erreur de représentativité | 112 |
| 5.3 | Assessing the impact of SAR altimetry for global ocean analysis and forecasting | 115 |
| 5.3.1 | Introduction (fr) | 115 |
| 5.3.2 | Conclusion (fr) | 116 |
| 5.3.3 | Observing System Simulation Experiments | 116 |
| 5.3.4 | Abstract | 116 |
| 5.3.5 | Introduction | 116 |
| 5.3.6 | Observing System Simulation Experiments | 117 |
| 5.3.7 | Main results | 118 |
| 5.3.8 | Conclusion | 121 |
| 5.4 | Impact de la donnée SAR sur les forecast skills dans les systèmes au 1/4° et au 1/12° | 122 |

5.1 Introduction

Le chapitre précédent s'est intéressé, entre autre, à l'impact du nombre d'altimètres assimilés sur les analyses et prévisions océaniques dans un système global au $1/4^\circ$. Les évolutions de la constellation altimétrique ne concerne pas uniquement le nombre de missions en vols. En effet il est attendu que des instruments plus précis contribuent au futur système d'observation.

Les simulations précédemment utilisées ont été construites de telle manière à simuler un système employant des données altimétriques de type LRM. Ces observations, de par leur technologies présentent une erreur qui a été simulée par un bruit blanc gaussien de 3cm. Certaines missions altimétriques récentes (Cryosat2, Sentinel 3a) embarquent à leur bord une nouvelle technologie (SAR) capable de réduire ce bruit de mesure à 1cm.

Ce chapitre est donc orienté vers cette question. Dans un premier temps l'impact des données plus précises nommées SAR est étudié par rapport à leur équivalent conventionnel (données LRM) dans un système au $1/4^\circ$. Nous verrons comment, étant donné les résultats, l'apport d'une carte d'erreur de représentativité influe sur ces derniers.

Dans un second temps, cette étude est reprise dans une configuration au $1/12^\circ$. De la même manière que pour le système au $1/4^\circ$, ont été utilisés des forecast skill afin d'évaluer la qualité de la prévision à 7 jours par rapport à la persistance.

5.2 Impact SAR/LRM dans un système au 1/4°

5.2.1 Impact de la donnée SAR sur la température

Comme vu dans le chapitre dédié au système d'assimilation de données (voir Section 2.4) et dans le Chapitre de résultat précédent, les corrections issues de l'assimilation de données altimétriques sont calculées pour les autres variables du modèle (T, S, U et V). L'intérêt d'étudier ces variables est d'observer leur comportement vis-à-vis de ce nouveau type de données SAR. Nous allons maintenant regarder l'impact des données SAR sur les températures à 318 m de profondeur.

Les cartes (Fig. 5.1) montrent que les variabilités des erreurs de prévision et d'analyse, augmentent lorsque des données SAR sont assimilées (simulation Sat3_s). Cette dégradation est globale et n'est pas cantonnée à une région particulière.

La Table 5.1 confirme cette constatation. De plus les RMSE de prévisions à 7 jours en température de surface sont légèrement plus faibles que les RMSE d'analyses.

| T | GLO | | GS | | AC | | KU | |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | FCST | ANA | FCST | ANA | FCST | ANA | FCST | ANA |
| Sat3 | 0.59 | 0.57 | 1.26 | 1.15 | 0.61 | 0.54 | 0.99 | 0.91 |
| Sat3_s | 0.61 | 0.60 | 1.26 | 1.15 | 0.64 | 0.56 | 0.98 | 0.90 |

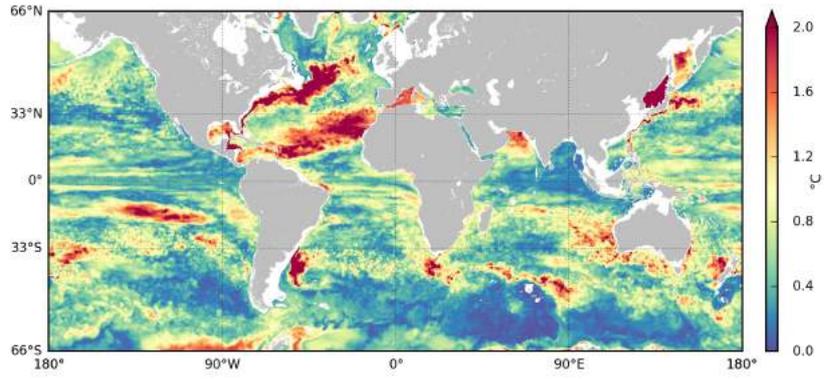
TABLEAU 5.1 – RMSE pour la température (T) à 318 m en prévision à 7 jours et en analyses pour Sat3 (LRM) et Sat3_s (SAR) (°C).

Si la donnée est de type SAR, impliquant une contrainte plus forte sur le niveau de la mer, la température en sera d'autant plus dégradée.

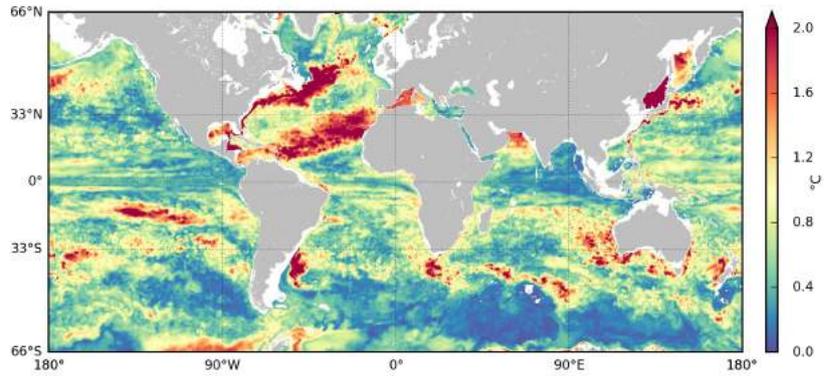
Les cartes des Fig. 5.2 et 5.3 montrent respectivement les incréments et les incréments rejetés moyens de Juin à Décembre pour la température de surface.

La donnée SAR génère un incrément plus fort en T que les données LRM, en revanche la part d'incrément rejeté est elle aussi plus importante. Ceci associé au fait que l'assimilation tend à augmenter l'erreur d'analyse par rapport à l'erreur de prévision notamment pour Sat3_s (Table 5.1) montre que le calcul de la correction en température génère des erreurs dans les champs prévus et analysés par rapport à la simulation Sat3.

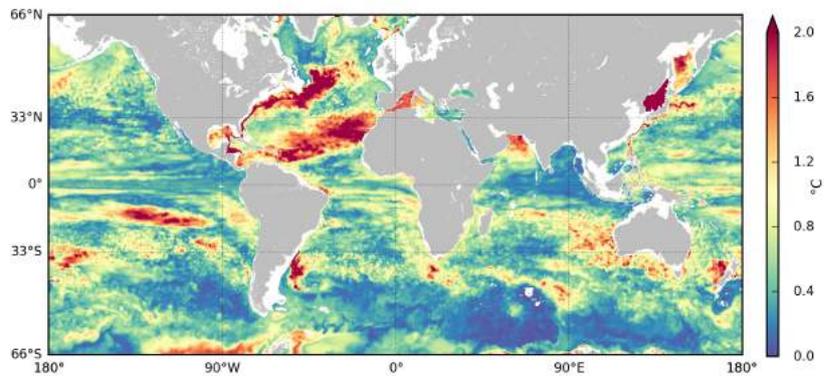
Cette dégradation en T associée à des améliorations faibles voire nulles du niveau de la mer lors de l'assimilation de données SAR nous a amené à formuler l'hypothèse suivante : la diagonale de la matrice d'erreur fixée à 1cm dans le système d'assimilation contraint trop fortement le niveau de la mer. Le système ne parvenant pas à assimiler l'information fournie la redistribue sous forme d'erreur aux autres champs du modèle tel que la température.



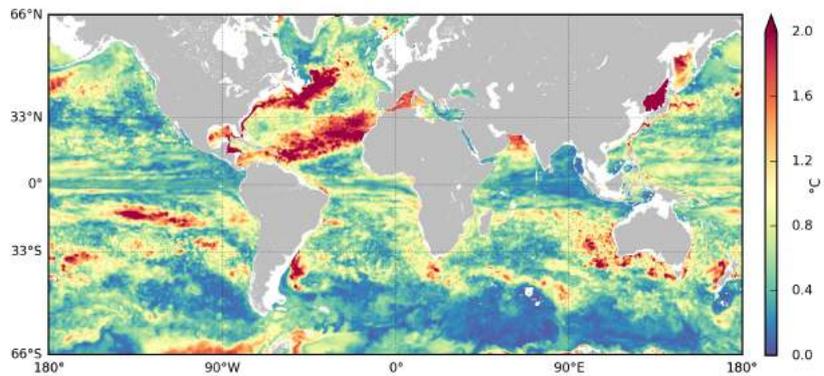
(a) Sat3 RMSE prévision



(b) Sat3_s RMSE prévision



(c) Sat3 RMSE analyse



(d) Sat3_s RMSE analyse

FIGURE 5.1 – RMSE en prévision à 7 jours (a,c) et en analyse (b,d) pour la température à 318 m (T) pour Sat3 (LRM) (a) et Sat3_s (SAR) (b) (°C).

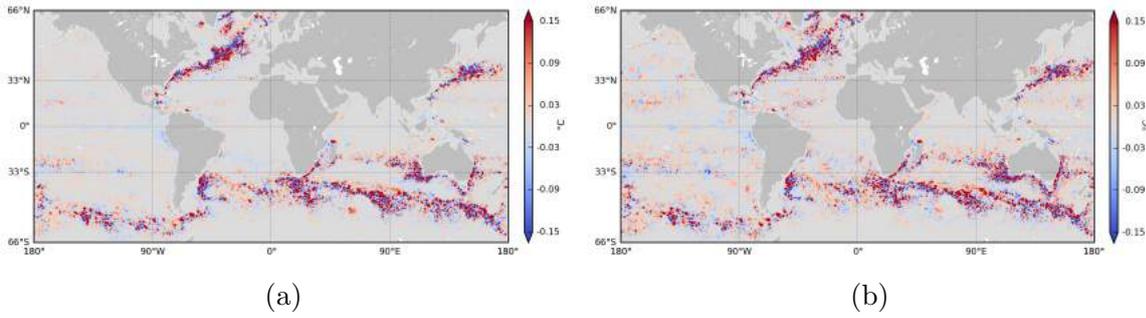


FIGURE 5.2 – Incréments calculés par SAM-2 pour la température de surface (T) pour Sat3 (LRM) (a) et Sat3_s (SAR) (b) (°C).

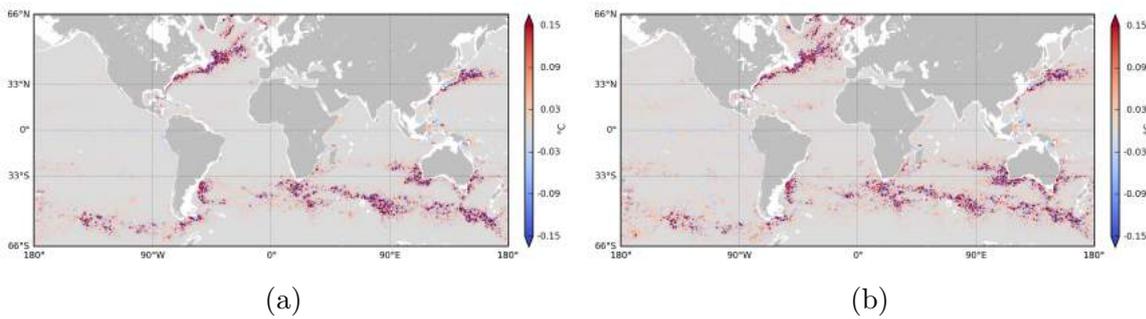


FIGURE 5.3 – Incréments rejetés calculés par SAM-2 pour la température de surface (T) pour Sat3 (LRM) (a) et Sat3_s (SAR) (b) (°C).

5.2.2 Impact de l'erreur de représentativité

Ces informations contenues dans les observations étant issues du Nature Run au $1/12^\circ$, et les expériences d'assimilation étant sur une grille au $1/4^\circ$, nous avons par la suite tenté d'intégrer une erreur de représentativité entre le modèle au $1/4^\circ$ et au $1/12^\circ$ jusque là non prise en compte. Ceci afin de relâcher les contraintes sur le niveau de la mer et sur la température.

Le calcul de cette carte à partir du NR a déjà été explicité en Section 3.5.1.2. En reprenant les configurations de Sat3 et Sat3_s, nous avons créé deux nouvelles simulations en ayant pris soin de rajouter la carte d'erreur de représentativité au sein du système. Ces expériences se nomment Sat3_r et Sat3_sr, la première basée sur Sat3 et donc des données LRM et la suivante se base sur Sat3_s utilisant des données de type SAR.

| SL_r | GLO | | GS | | AC | | KU | |
|---------|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|
| | FCST | ANA | FCST | ANA | FCST | ANA | FCST | ANA |
| Sat3 | 21 | 13 | 82 | 37 | 60 | 36 | 52 | 26 |
| Sat3_s | 22 | 13 | 78 | 35 | 63 | 26 | 47 | 22 |
| Sat3_r | 21 | 14 | 71 | 37 | 55 | 26 | 48 | 28 |
| Sat3_sr | 22 | 14 | 78 | 38 | 66 | 29 | 48 | 25 |

TABLEAU 5.2 – MSE pour le niveau de la mer (SL) en prévision à 7 jours et en analyse pour Sat3 (LRM), Sat3_r (LRM+repr.), Sat3_s (SAR) et Sat3_sr (SAR+repr.) (cm^2).

| T _r | GLO | | GS | | AC | | KU | |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | FCST | ANA | FCST | ANA | FCST | ANA | FCST | ANA |
| Sat3 _r | 0.59 | 0.57 | 1.18 | 1.08 | 0.61 | 0.55 | 1.00 | 0.92 |
| Sat3 _{sr} | 0.60 | 0.58 | 1.21 | 1.11 | 0.63 | 0.55 | 0.98 | 0.90 |

TABLEAU 5.3 – RMSE pour la température de surface (T) en prévision à 7 jours et en analyse pour Sat3_r (LRM+repr.) et Sat3_{sr} (SAR+repr.) (°C).

Concernant les simulations assimilant des données LRM (Sat3 et Sat3_r), l'utilisation d'une carte d'erreur de représentativité permet de réduire la variabilité des erreurs de prévisions à 7 jours pour le niveau de la mer (Table 5.2). En effet, globalement les deux simulations sont à 21 cm² mais dans les courants de bord ouest, en moyenne, Sat3_r affiche des MSE de 58 cm² alors que Sat3 affiche un score de 65 cm². En revanche pour les RMSE d'analyse, il apparaît une légère dégradation au niveau global (14 cm² au lieu de 13 cm² pour Sat3) et dans le Kuroshio (28cm² au lieu de 26 cm²), le Gulf Stream et le courant des Aiguilles montrent des valeurs égales (respectivement 37 cm² et 26 cm²).

Du point de vue de la température de surface (Table 5.1 et Table 5.3), une réduction sensible est visible pour les RMSE de Sat3_r par rapport à Sat3, autant pour les prévisions à 7 jours que pour l'analyse. Globalement les scores de prévisions passe de 0.45 °C à 0.44 °C et de 0.46 °C à 0.44 °C en analyse. Dans les WBCs, nous obtenons en moyenne 0.91 °C en prévision pour Sat3 et 0.87 °C pour Sat3_r et en analyse, 0.94 °C pour Sat3 contre 0.83 °C pour Sat3_r. Nous remarquons que pour Sat3_r, les scores d'analyse sont inférieurs aux scores de prévisions contrairement à Sat3.

L'ajout d'une carte d'erreur de représentativité, dans le cas des simulations assimilant des données de type LRM, permet une amélioration des scores de prévision à 7 jours pour le niveau de la mer mais implique une légère dégradation des scores d'analyse. De plus, les prévisions et analyses de température s'en retrouvent elles aussi améliorées.

Les simulations Sat3_s et Sat3_{sr} utilisant des données de type SAR, ne montrent pas les mêmes comportements. En effet, pour le niveau de la mer (Table 5.2) l'ajout de la carte de d'erreur représentativité dans le système ne permet pas de réduire les MSE de prévisions à 7 jours. En moyenne dans les courants de bord ouest, Sat3_s donne un score de 62 cm² contre 64 cm² pour Sat3_{sr}, de même en analyse les MSE passent de 28 cm² à 31 cm².

L'ajout de la carte d'erreur de représentativité dégrade les scores d'erreur de niveau de la mer des simulations SAR tandis qu'elle les améliore ou les égalise pour les simulation basées sur des données LRM.

Les MSE de température de surface de Sat3_{sr} sont plus faibles globalement, pour les prévisions à 7 jours et pour l'analyse que les scores de Sat3_s (Table 5.1 et Table 5.3). En prévision, le score passe de 0.54 °C pour Sat3_s à 0.46 °C pour Sat3_{sr}; en analyse,

nous obtenons 0.6 °C pour Sat3_s contre 0.47 °C pour Sat3_sr. En moyenne dans les courants de bord ouest, en prévision à 7 jours, les MSE passent de 1.01 °C à 0.94 °C et en analyse de 1.1 °C à 0.97 °C.

Parmi les 4 expériences comparées ci-dessus, la simulation assimilant des données LRM dans un système utilisant une carte d'erreur de représentativité présente les meilleurs résultats, tant en niveau de la mer qu'en température.

L'utilisation conjointe des données SAR et d'une matrice de covariance d'erreur d'observation adaptée ne permet pas d'améliorer sensiblement les résultats en niveau de la mer et dégrade les analyses et prévisions faites sur la température. Le fait de lui adjoindre une carte de représentativité ne permet pas d'améliorer les scores de niveau de la mer mais de diminuer les erreurs commises sur la température.

Ceci nous a amené à considérer que la précision de mesure apportée par les données de type SAR engendrait l'apparition de bruit non physique dans les modèles au 1/4°.

Ces diverses constatations nous ont orientées vers la mise en place de simulations équivalentes à Sat3 et Sat3_s mais en se basant sur un modèle à plus fine résolution au 1/12°.

La suite de cette étude a fait l'objet d'une courte note en cours de soumission au *Journal of Operational Oceanography*. Les introductions et conclusions ont été traduites en français.

5.3 Assessing the impact of SAR altimetry for global ocean analysis and forecasting

5.3.1 Introduction (fr)

L'Altimétrie spatiale est une technique essentielle pour l'océanographie opérationnelle (Le Traon et al., 2015). Plusieurs missions produisent des observations à haute résolution du niveau de la mer de l'océan global qui sont cruciales pour contraindre les analyses et prévisions océaniques (e.g. Lellouche et al., 2013; Oke et al., 2015). La nouvelle génération d'altimètres au nadir permet une réduction significative du bruit de mesure grâce à la technologie SAR (ou mode de traitement "Delay-Doppler") comparativement aux altimètres à pulsation limitée (Dibarboure et al., 2014; Boy et al., 2017). Ce bruit de mesure est d'environ 1 cm rms en mode SAR pour une fréquence de mesure de 1 Hz (environ 7 km) contre 3 cm rms pour l'altimétrie conventionnelle (notée CONV par la suite).

Cryosat-2 mis en orbite en 2010 a été la première mission à embarquer un altimètre SAR. Bien que dédiée à l'étude des glaces, ses observations ont été largement utilisées afin d'évaluer les capacités du mode SAR pour mesurer la surface océanique (e.g. Boy et al., 2017). Sentinel 3 est une mission composée de deux satellites S3A et S3B dédiés à l'observation de l'océan et pilotée par le programme Européen Copernicus. S3A a été lancé en 2016 et S3B devrait être mis en orbite en 2017. Ces deux plates-formes embarquent un altimètre SAR. D'ici 2020, Sentinel 6 (Jason CS) prolongera la série des satellites Jason et embarquera lui aussi un altimètre SAR. Il est donc attendu pour les années à venir qu'un minimum de trois satellites SAR voleront simultanément.

Un bruit réduit de mesure permet une meilleure résolution effective de la variabilité de la mesoéchelle le long de la trace altimétrique (e.g. Dufau et al., 2016). Cette mesure devrait aussi améliorer les analyses et prévisions océaniques mais ce point n'a pas été évalué à l'heure actuelle. A noter cependant qu'une meilleure résolution 1D le long de la trace ne se traduit pas forcément par une meilleure résolution 2D étant donné que cette dernière dépend principalement des caractéristiques de l'échantillonnage spatio-temporelle de la constellation altimétrique.

Une première évaluation de l'impact de l'altimétrie SAR sur la qualité de l'analyse et de la prévision océanique est développé ici. Des OSSEs (*Observing System Simulation Experiments*) sont menées à partir du système d'analyse et de prévision au 1/12° de Mercator Océan afin de quantifier l'impact de l'altimétrie SAR par rapport à l'altimétrie CONV. Cette note s'organise comme suit. Le design des OSSEs est présenté en section 5.3.3, les résultats sont discutés en section 5.3.7 et les principales conclusions sont résumées en section 5.3.2.

5.3.2 Conclusion (fr)

Les OSSEs (*Observing System Simulation Experiments*) menées avec un système d'assimilation au $1/12^\circ$ ont été utilisées afin d'évaluer pour la première fois l'impact d'une mission multi-satellites munis d'altimètre SAR sur les analyses et prévisions océaniques globales. Les résultats montrent un impact positif. Les erreurs en analyse et prévision du niveau de la mer sont réduites d'environ 20 % par rapport aux missions altimétriques conventionnelles. Cela suggère que les futures missions développées au sein du programme Européen Copernicus devraient améliorer la qualité des analyses et prévisions de CMEMS. Une étude équivalente devrait être menée avec les données actuelles. La sensibilité des résultats au système d'assimilation de données et à ses développements futurs devrait aussi être étudiée.

5.3.3 Observing System Simulation Experiments

5.3.4 Abstract

Satellite altimetry provides essential sea level observations to constrain ocean analysis and forecasting systems. New generation of nadir altimeters now provides enhanced capability thanks to a SAR mode that allows reducing the 1 Hz (7 km) measurement noise level from about 3 cm rms to 1 cms rms. A first assessment of the impact of SAR altimetry for global ocean analysis and forecasting is carried out using Observing System Simulation Experiments (OSSEs) with the Mercator Ocean high resolution $1/12^\circ$ data assimilation system. OSSEs are used to quantify the impact of assimilating multiple altimeter missions with and without a SAR mode. Both sea level and surface velocity analyses and 7-day forecasts are improved. Compared to conventional altimetry, SAR altimetry sea level variance errors for both analyses and forecasts are typically reduced by 20 %. This suggests that use of SAR multiple altimeter missions with high resolution models will significantly improve the capability of the ocean analysis and forecasting systems in the near future.

5.3.5 Introduction

Satellite altimetry is an essential remote sensing technique for operational oceanography (see Le Traon et al., 2015 for a recent review). Multiple altimeter missions provide all weather, global and high resolution sea level observations that are critical to constrain ocean analysis and forecasting systems (e.g. Lellouche et al., 2013; Oke et al., 2015). New generation of nadir altimeters now provides enhanced capability thanks to a SAR mode (also known as Delay-Doppler processing mode) that allows reducing significantly the measurement noise level compared to conventional pulse limited altimeters (Dibarboure et al., 2014; Boy et al., 2017). Noise level for 1 Hz sampling

(about 7 km) is thus about 1 cm rms for SAR altimeters compared to about 3 cm rms for conventional pulse limited altimeters (hereafter referred as CONV altimeters). Cryosat-2 launched in 2010 was the first altimeter mission with a SAR mode. Although Cryosat-2 is a mission dedicated to ice studies, its data have been extensively analyzed to assess the value of altimeter SAR mode over the ocean (e.g. Boy et al., 2017). Sentinel 3 is a constellation of two ocean missions (S3A and S3B) from the European Union Copernicus programme. S3-A was launched in early 2016 and S3-B should be launched by the end of 2017. They are both equipped with SAR altimetry. By 2020, Sentinel-6 (Jason CS) that will ensure the long term continuity of the Jason series will also feature a SAR altimetry mode. It is thus expected that in the years to come at least three altimeters with a SAR mode will be flying simultaneously. A reduced noise level allows a better effective resolution of mesoscale variability along the altimeter tracks (e.g. Dufau et al., 2016). It should also lead to improved ocean analyses and forecasts but this effect has not been yet quantified. Note, however, that a better effective 1D resolution along the altimeter tracks will not necessarily translate into a better 2D resolution as the latter is also and mainly dependent on the space/time sampling characteristics of the altimeter constellation. A first assessment of the impact of SAR altimetry for ocean analysis and forecasting is performed as part of this study. An Observing System Simulation Experiment (OSSE) is carried out with the Mercator Ocean global 1/12° ocean analysis and forecasting system to quantify the impact of SAR versus CONV altimetry. The note is organized as follows. The OSSE design is presented in section 5.3.3. Results are discussed in section 5.3.7 and main conclusions are summarized in section 5.3.8.

5.3.6 Observing System Simulation Experiments

OSSEs use two different models. One model is used to perform a “nature” run. The “nature” run (NR) is sampled to yield synthetic altimeter observations and a noise of 1 cm rms and 3 cm rms is added to simulate respectively SAR and conventional altimeter observations. These synthetic observations are assimilated into the second model (Assimilated Run or AR) and the model performance is evaluated by comparing it against the nature run. In this study, the NR is based on the global NEMO model at 1/12° horizontal resolution and 50 vertical levels. The AR uses the same global 1/12° NEMO model and the SAM-2 data assimilation system (see Lellouche et al., 2013). It is the same high resolution global data assimilation system used by Mercator Ocean for the Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS). A Free Run (FR) (i.e. AR without any data assimilation) is also used to quantify the relative improvement of altimeter data assimilation.

The OSSEs were started from January 7, 2009 over a one-year time period. Two different initial conditions (i.e. January 7, 2009) for the NR and for the AR are required

so that we can quantify the impact of assimilating pseudo observations of the NR in the AR. This was achieved by running the two free run NEMO configurations initialized from climatology but at different times. The NR simulation was started in 2003 and the AR was initialized from a $1/12^\circ$ free run started from 2006. Both NR and AR are forced with ECMWF (European Centre of Medium Weather Forecasting) operational 3-h atmospheric data.

To assess the impact of the number of altimeter data, three satellites have been considered : Jason-1, Jason-2 and Envisat. Jason-1 and Jason-2 have a 10-day repeat cycle and Envisat a 35-day repeat cycle. Jason-1 was in its interleaved orbit with its ground tracks just in between Jason-2 tracks. Jason-1, Jason-2 and Envisat simulated observations were derived from the NR with a resolution of 7 km between two points along the tracks. A first OSSE (CONV altimetry) uses an observation white noise of 3 cm RMS that was simulated and added to these pseudo observations. A second OSSE (SAR altimetry) uses an observation noise of 1 cm rms.

5.3.7 Main results

The two assimilated experiments (SAR and CONV) start the 7th of January 2009 and end the 30th of December 2009. The difference between a given simulation and the NR are used to derive statistics on errors on analyses and 7-day forecasts over the last 7 months (June-December 2009).

Impact of assimilation of altimeter data is analysed on sea level (SL) and surface zonal and meridional velocities (U, V). Errors on temperature and salinity at depths are also analysed to quantify the sensitivity of the results for the deep ocean fields. Analyses are focused on regions with high mesocale variability : Gulf Stream (GS), Agulhas Current (AC) and Kuroshio (KU).

Fig. 5.4 shows the Mean Squared Error (MSE) for the free run (FR), i.e. the difference between the FR and NR. As expected, the FR shows large differences with the NR as they provide two uncorrelated mesoscale variability fields.

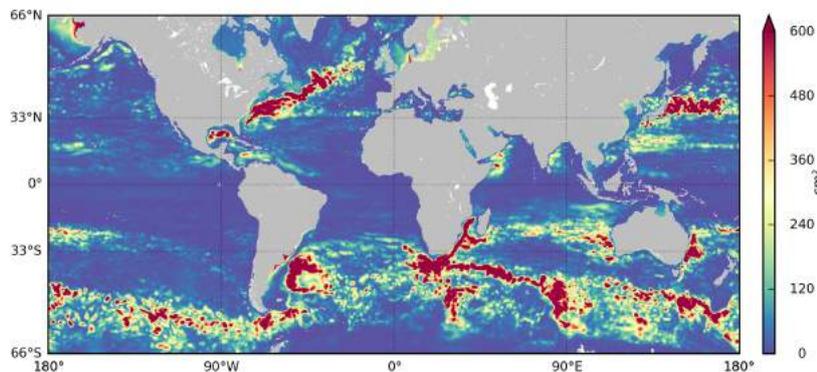


FIGURE 5.4 – Mean Square Error of sea level (SL) for the Free Run (cm^2).

Fig. 5.5 shows the MSEs for the analyses and forecasts of the two different assimi-

lation runs (SAR and CONV altimetry) as estimated from the difference with the NR. Both SAR and CONV assimilation runs strongly reduce analysis and forecast errors. SAR results are globally better than CONV results.

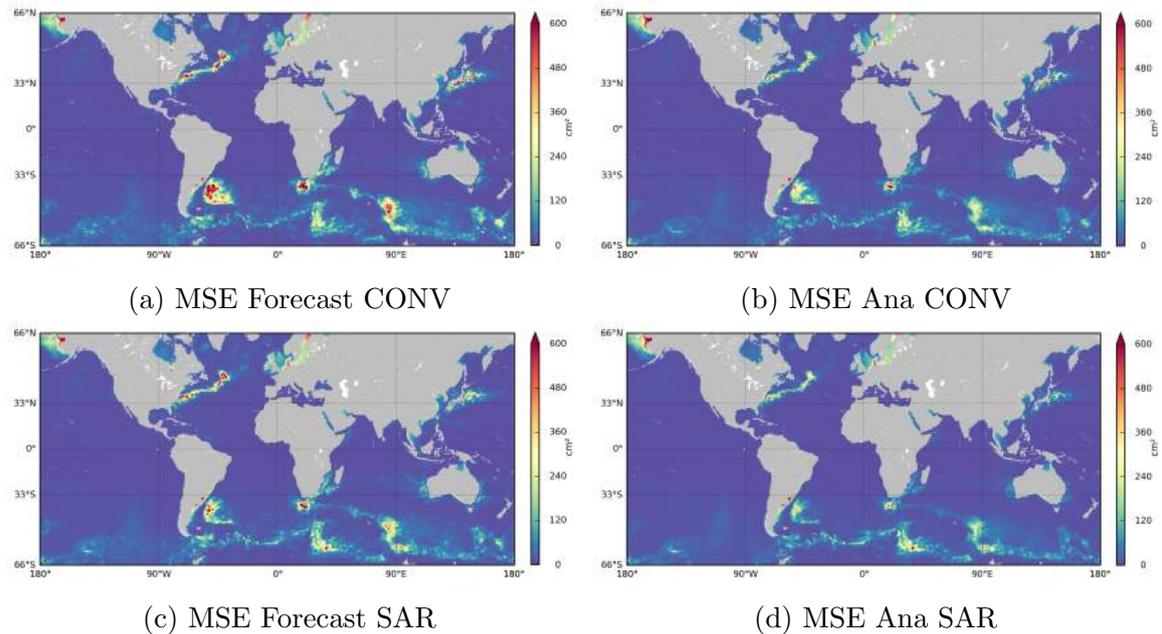


FIGURE 5.5 – Mean Square Error of seal level (SL) for the CONV (a) and SAR (c) analyses and CONV (b) and SAR (d) forecasts for the global high resolution $1/12^\circ$ Mercator Ocean system (cm^2).

To summarize results shown on the different maps and to focus on regions with high mesoscale variability, error variances for three Western Boundary Current regions (Gulf Stream, Algalhas, Kuroshio) are given in Table 5.4. Relative error variance reduction of SAR versus CONV altimetry is given in Table 5.5.

Compared to the Free Run error variance, sea level analysis errors for SAR and CONV altimetry are of about 10%. This shows the strong contribution of multiple altimeter data assimilation to constrain mesoscale variability in the global $1/12^\circ$ data assimilation system. 7-day sea level forecast errors are about twice as large as sea level analysis errors (about 20% of the Free Run error variance). Velocity analysis and forecast errors are, as expected, larger and are respectively about 30% and 50% of the Free Run error variance for analysis and forecast errors. Note that there are significant differences between the three regions. Largest errors are generally found in the Gulf Stream and the smallest ones in the Kuroshio. SAR altimetry provides better results for the three different WBC regions both for sea level analyses and forecasts. Although the improvements with respect to the FR error variance are small, the relative improvement with respect to the CONV error variance is quite significant and is on average of about 20%. The largest impact is obtained in the Kuroshio where the relative improvement is almost 40%. Similar results are obtained for the surface zonal and meridional velocity but the relative impact of SAR versus CONV altimetry is

| SL | GS | | AC | | KU | |
|-------------|-----|------|-----|------|-----|------|
| | ANA | FCST | ANA | FCST | ANA | FCST |
| CONV | 37 | 83 | 21 | 48 | 27 | 59 |
| SAR | 33 | 75 | 16 | 38 | 17 | 38 |
| Free Run 12 | 360 | 360 | 366 | 366 | 341 | 341 |

| U | GS | | AC | | KU | |
|-------------|------|------|-----|------|-----|------|
| | ANA | FCST | ANA | FCST | ANA | FCST |
| CONV | 280 | 454 | 198 | 301 | 279 | 412 |
| SAR | 257 | 431 | 182 | 278 | 214 | 316 |
| Free Run 12 | 1027 | 1027 | 891 | 891 | 874 | 874 |

| V | GS | | AC | | KU | |
|-------------|-----|------|-----|------|-----|------|
| | ANA | FCST | ANA | FCST | ANA | FCST |
| CONV | 271 | 427 | 210 | 321 | 243 | 337 |
| SAR | 251 | 405 | 191 | 289 | 207 | 290 |
| Free Run 12 | 855 | 855 | 970 | 970 | 826 | 826 |

TABLEAU 5.4 – Mean Squared Errors (MSEs) for Sea Level (SL), zonal (U) and meridional (V) velocity analysis and 7-day forecast errors. Free Run MSEs (i.e. free run minus nature run) are also given. Units are cm^2 for SL and cm^2s^{-2} for U and V.

| Error Reduction (in %) | GS | | AC | | KU | |
|------------------------|-----|------|-----|------|-----|------|
| | ANA | FCST | ANA | FCST | ANA | FCST |
| Sea Level | 13 | 9 | 22 | 22 | 37 | 35 |
| U | 8 | 5 | 8 | 7 | 23 | 23 |
| V | 7 | 5 | 9 | 10 | 15 | 14 |

TABLEAU 5.5 – Reduction (in percentage) of Mean Squared Errors (MSEs) between SAR and CONV for Sea Level (SL), zonal (U) and meridional (V) velocity analysis forecast errors. Statistics are given for three WBC regions : Gulf Stream (GS), Kurohio (KU) and Algulhas Current (AC).

smaller and is on average of about 10%. Similar calculations were done for temperature and salinity fields. Assimilation of multiple altimeters has a significant impact on the upper temperature fields. Use of SAR altimetry versus CONV altimetry showed slightly improved results but not as large as for sea level and surface velocity.

5.3.8 Conclusion

Observing System Simulation Experiments (OSSEs) carried out with a global data assimilation system at $1/12^\circ$ have been used to assess for the first time the impact of future multiple altimeter missions in SAR mode on global ocean analysis and forecasting. Results show a positive impact. Sea level analysis and forecast errors are typically reduced by about 20 % with respect to conventional altimeter missions. This suggests that the future altimeter missions developed as part of the EU Copernicus programme should improve the quality of CMEMS analyses and forecasts. This should now be checked with actual data. Sensitivity of the results to the data assimilation scheme and its evolutions should also be carried out.

5.4 Impact de la donnée SAR sur les forecast skills dans les systèmes au $1/4^\circ$ et au $1/12^\circ$

Les différents forecast skills (FS) des simulations Sat1, Sat2 et Sat3 ont été comparés (voir Section 4.3) et une amélioration des erreurs de prévision est visible par rapport à leur persistance à 7 jours. En reprenant le même calcul, nous allons analyser les forecast skills des simulations Sat3 ($1/4^\circ$), Sat3_s (données SAR $1/4^\circ$), CONV ($1/12^\circ$) et SAR (données SAR $1/12^\circ$). Le principe des forecast skills est développé en Section 4.3.

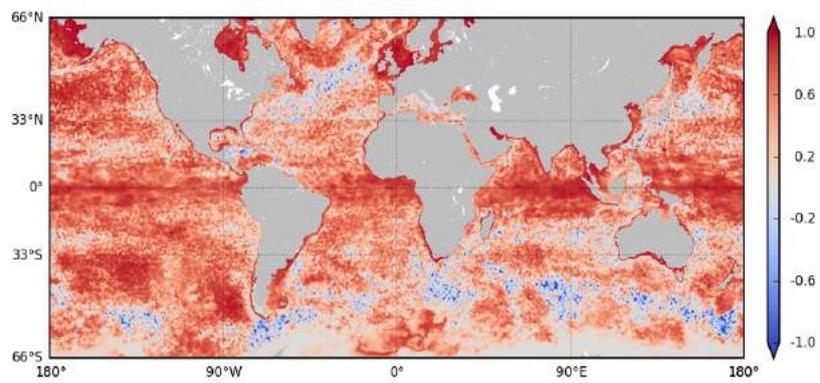
| Expériences | Sea Level |
|-------------|-----------|
| Sat3 | 0.31 |
| Sat_s | 0.28 |
| CONV | 0.41 |
| SAR | 0.48 |

TABLEAU 5.6 – Forecast skills en niveau de la mer (SL) les simulations Sat3 (LRM, $1/4^\circ$), Sat3_s (SAR, $1/4^\circ$) CONV (LRM, $1/12^\circ$) et SAR (SAR, $1/12^\circ$).

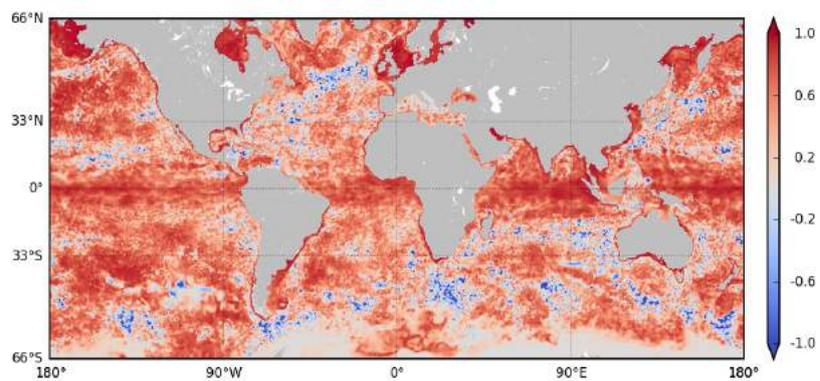
Les résultats de la Table 5.6 montrent une dégradation globale du score de niveau de la mer en passant de 0.31 (Sat3) à 0.28 (Sat3_s) lors de l'assimilation de la donnée SAR dans un système au $1/4^\circ$. En revanche, pour les simulations au $1/12^\circ$, le skill est amélioré avec 0.48 pour SAR au lieu 0.41 pour CONV.

Le passage d'une résolution de $1/4^\circ$ à $1/12^\circ$ permet une amélioration significative des scores de prévision. Dans les régions à faible variabilité, le forecast skill est renforcé par le passage à la grille $1/12^\circ$ (Fig. 5.7), dans les courants de bord ouest, en comparant Sat3 (Fig. 5.6a) et CONV (Fig. 5.7a), apparaissent des comportements différents en fonction de la région considérée. Une analyse plus fine des dynamiques locales permettrait de comprendre ces différences de comportement.

L'analyse du forecast skill permet de mettre en lumière, d'une part l'influence de la maille sur la précision des prévisions à 7 jours et d'autre part le fait que la donnée SAR est mieux utilisée par un système de résolution $1/12^\circ$ que par un système de résolution $1/4^\circ$.

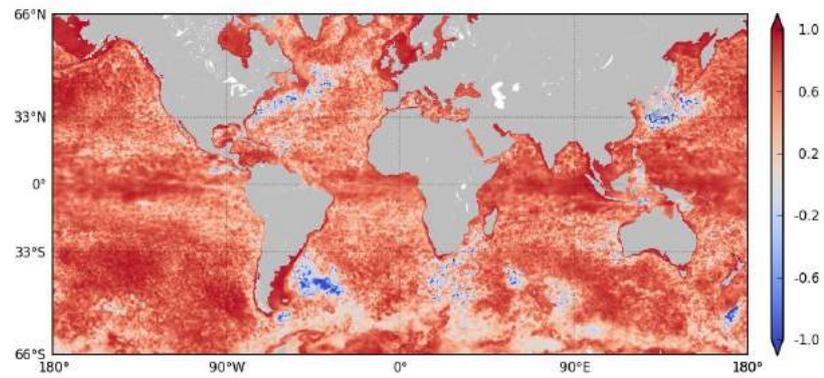


(a)

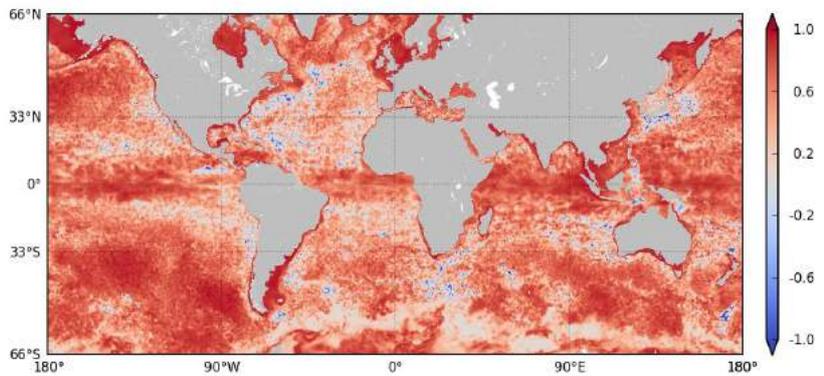


(b)

FIGURE 5.6 – Forecast Skill en niveau de la mer (SL) pour les simulations Sat3 (a) et Sat3_s (b) (système au 1/4°).



(a)



(b)

FIGURE 5.7 – Forecast Skill en niveau de la mer (SL) pour les simulations CONV (a) et SAR (b) (système au $1/12^\circ$).

Chapitre 6

Conclusion

Rappel du contexte

L'analyse et la prévision océanique menées dans un centre opérationnel tel que Mercator Océan sont basées sur trois éléments clés : le modèle océanique est issu des équations de la physique et représente le plus fidèlement possible la dynamique de l'océan ; les données provenant de différentes technologies, centralisées et mises à disposition en temps réel permettent une description parcellaire mais capitale de l'état de notre océan ; le système d'assimilation de données permet de relier les deux éléments précédents en contraignant le premier à partir du deuxième, en prenant en compte les erreurs intrinsèques à chacun. Les évolutions permanentes de ces trois éléments impliquent des changements dans les résultats des analyse et prévision océanique. Mercator Océan, ayant acquis un statut de leader dans la communauté océanographique opérationnelle et s'étant vu déléguer la responsabilité du volet "Océan" du programme Européen Copernicus se doit d'évaluer ces changements sur ses analyses et prévisions opérationnelles.

C'est dans ce contexte exigeant que s'est inscrite cette thèse ayant pour but d'évaluer les impacts des évolutions des réseaux d'observations altimétriques (niveau de la mer) et des profils in situ Argo (température et salinité). L'objectif principal était de quantifier l'apport de ces observations actuelles et futures pour l'analyse et la prévision océanique et de fournir ainsi des recommandations sur l'évolution des systèmes d'observation. Ce travail avait aussi pour objectif d'évaluer la sensibilité des résultats aux techniques d'assimilation de données et de conduire à terme à une meilleure utilisation des données satellites et in situ dans les systèmes d'analyse et de prévision océanique mis en œuvre à Mercator Océan.

Nous allons rappeler les différents objectifs découlant de cette problématique d'étude d'impacts ainsi que les expériences menées. Les résultats principaux sont ensuite présentés puis certaines limites des protocoles utilisés sont abordées. Les évolutions et perspectives à donner afin d'approfondir ces études sont enfin exposées.

Objectifs et méthodes employées

Ce travail de thèse est basé sur des OSSEs. Cette méthode permet de caractériser précisément les erreurs d'analyse et de prévision. Ces OSSEs se basent sur la simulation d'observations réalistes de l'océan à partir d'un Nature Run représentant la réalité. Nous avons alors créé des jeux de données permettant d'évaluer les impacts du nombre de satellites présents dans la constellation altimétrique, la qualité de cette mesure altimétrique et enfin le nombre de profils verticaux fournis par le réseau Argo. Nous avons mis en place un jeu d'expériences assimilant des combinaisons variables de ces trois jeux de données fournissant au système des observations en niveau de la mer pour l'altimétrie et en température et salinité pour les profils Argo.

Ces observations ont été assimilées dans les systèmes d'analyse et de prévision océanique de Mercator Océan au $1/4^\circ$ et au $1/12^\circ$ utilisant le modèle NEMO et le

système d'assimilation de Mercator nommé SAM-2 et basé sur un filtre de Kalman de type SEEK (*Singular Extended Evolutive Kalman filter*).

Le choix du Nature Run s'est porté sur une simulation libre du modèle NEMO au $1/12^\circ$. Cette résolution de grille permet une meilleure représentation de la mesoéchelle océanique (50-500km) prédominante dans la dynamique globale de l'océan. Ainsi les observations simulées à partir du Nature Run contiennent une part de cette information mesoéchelle.

En assimilant ces données dans un modèle de plus faible résolution, au $1/4^\circ$, le premier objectif a été d'évaluer la part d'information que cette configuration au $1/4^\circ$ était capable de reproduire. Les données altimétriques se sont avérées très efficaces pour observer la mesoéchelle réelle de l'océan. Trois simulations assimilant un nombre croissant de données altimétriques simulées ont été créées. Nous avons évalué l'impact de l'assimilation de données provenant d'un, deux puis trois satellites altimétriques. Ces premiers jeux de données ont simulé des observations altimétriques de type LRM (*Low Resolution Mode*) ou "conventionnelles" qui est la technologie la plus employée pour ce type de mesures actuellement. Les erreurs de mesure ont été simulées via un bruit blanc Gaussien de 3 cm rms.

Ensuite, nous nous sommes intéressés à l'impact de cette précision de mesure sur les analyses et prévisions. Dans cette optique, nous avons simulé un jeu d'observations altimétriques jumeau au précédent mais présentant un bruit de mesure d'1 cm rms. Ces mesures simulent cette fois des données de type SAR (*Synthetic Aperture Radar*). Cette technologie plus récente permet une meilleure description de l'état de surface océanique et donc une meilleure qualité d'observation de la mesoéchelle. Nous avons évalué les apports de cette nouvelle donnée dans les systèmes au $1/4^\circ$ en créant une simulation assimilant des données de type SAR provenant de trois satellites. Cette simulation a été comparée à sa simulation jumelle utilisant des données LRM. Les résultats issus de cette comparaison nous ont amené à modifier le système d'assimilation de données afin de prendre en compte l'erreur de représentativité entre un modèle au $1/4^\circ$ et un modèle au $1/12^\circ$. La comparaison entre l'impact des données de type LRM et les données de type SAR au sein des systèmes au $1/4^\circ$ n'a pas permis d'observer les améliorations attendues par l'assimilation d'observations plus précises. Nous avons alors repris les protocoles d'expériences précédents mais appliqués cette fois à une configuration de système utilisant un modèle au $1/12^\circ$.

Le dernier objectif a été d'étudier l'apport du réseau d'observations Argo en complément des données altimétriques. Les profils sont simulés à partir du Nature Run à partir des positions réelles des profils Argo de 2009 et de 2010. A partir de la simulation au $1/4^\circ$ utilisant des observations de type LRM provenant de trois satellites, nous avons créé deux nouvelles expériences, l'une assimilant la totalité des profils Argo de 2009 et la seconde dans laquelle ont été rajoutés les profils Argo de 2010 dans les courants de bord ouest et à l'équateur.

Principaux résultats

Les améliorations apportées par l'assimilation de données de hauteur de mer provenant de un, deux puis trois satellites sur les analyses et prévisions océaniques sont continues. En effet, l'apport du deuxième satellite par rapport au premier est manifeste avec une réduction relative de l'erreur de presque 30% et permet de réduire fortement les erreurs d'analyse et de prévision de hauteur de mer notamment en effaçant les structures en losange causées par la répétitivité d'un unique satellite. Le troisième satellite permet encore de réduire ces erreurs d'environ 10% par rapport au deuxième. Nous avons aussi pu observer les corrections importantes faites sur les variables non observées telles que les vitesses, la température et la salinité. Concernant la reproduction de la mesoéchelle océanique du Nature Run au $1/12^\circ$ au sein d'une configuration au $1/4^\circ$, nous avons constaté via l'utilisation de spectres d'énergie que l'augmentation du nombre de données altimétriques assimilées permettait une meilleure reproduction de la dynamique des courants de bord ouest jusqu'à des échelles de 100 à 200 km. En deçà le modèle au $1/4^\circ$ n'est plus en capacité de reproduire la dynamique du NR.

L'utilisation de données moins bruitées simulant des observations de type SAR a montré des comportements différents en fonction de la résolution du système dans lequel elles étaient assimilées. En effet, dans un système au $1/4^\circ$, en comparant avec une simulation utilisant des données LRM, nous avons observé une amélioration mineure des prévisions et analyses de la hauteur de mer mais une augmentation des erreurs de température. Nous avons émis l'hypothèse que l'assimilation des données SAR en utilisant une carte d'erreurs d'observations d'1 cm était trop contraignante pour le système et générait l'apparition de signaux non physiques sur les variables non observées. C'est pour cela que nous avons calculé une carte d'erreur de représentativité à partir du Nature Run permettant de relâcher la contrainte sur le niveau de la mer là où le modèle n'est pas capable de recréer les signaux contenus dans les observations. L'ajout de cette carte d'erreur dans la simulation SAR a permis d'obtenir des résultats équivalents en termes de hauteur de mer et de température que la simulation assimilant des données LRM. L'utilisation de cette même carte dans la simulation LRM a aussi permis de réduire significativement les erreurs de prévision en niveau de la mer et en température globalement. Cela montre bien que certaines structures de petites échelles telles que celles simulées par le modèle au $1/12^\circ$ ne sont pas compatibles avec la dynamique représentée par le modèle au $1/4^\circ$. Cela explique aussi en partie pourquoi l'utilisation d'un modèle au $1/4^\circ$ ne permet pas de tirer pleinement avantage de l'observation précise des petites échelles que permet la technique SAR.

Nous avons alors reproduit ces expériences dans une configuration à la résolution plus fine en utilisant un modèle au $1/12^\circ$. Cette fois-ci les données SAR, par rapport à la simulation utilisant des données LRM, ont montré une nette amélioration des scores de niveau de la mer (environ 20%) et de vitesse (10%). L'utilisation d'un modèle au $1/12^\circ$ permet aussi de nettes améliorations en prévision et analyse par rapport aux

configurations au $1/4^\circ$ et ce pour toutes les variables.

Enfin, l'étude basée sur des simulations utilisant conjointement des données altimétriques et des profils Argo a permis dans un premier temps d'observer les améliorations apportées par un réseau simple de profileurs. En observant le comportement des champs de température et de salinité globalement et dans les zones de fronts telles que les courants de bord ouest, nous avons constaté de meilleures analyses et prévisions des champs profonds jusqu'à 2000 m (limite des profils Argo) par rapport aux simulations n'utilisant pas ces données (environ 15% de réduction en température et 50% en salinité). Les fronts de température et de salinité sont mieux positionnés et leur variabilité s'est rapprochée de celle du Nature Run. Nous avons ensuite augmenté la densité des profileurs Argo dans les courants de bord ouest et la zone équatoriale. Cette augmentation de données n'a eu qu'un impact faible sur la qualité des analyses et des prévisions.

Discussion autour des OSSEs

Les OSSEs sont un protocole d'étude des systèmes opérationnels très théorique dans le sens où, ni le Nature Run, ni les observations assimilées ne peuvent prétendre être fidèles à leurs alter ego réels. Les conclusions issues de ce type d'étude doivent prendre en compte que les choix faits pour créer les expériences ont une nette influence sur les résultats qui en découlent.

En premier lieu, le modèle NEMO-OPA a été utilisé pour créer le Nature Run et pour les expériences d'assimilation. Bien que les grilles employées diffèrent, les paramétrisations du modèle restent inchangées. Les expériences d'assimilation reproduiront plus facilement les structures du Nature Run. Ce comportement peut donc être une source de sous-estimation des erreurs réelles lors de l'assimilation d'un certain type de données. De la même manière, dans le cas des expériences au $1/12^\circ$, nous avons utilisé exactement le même modèle pour le Nature Run et pour les OSSEs. Cela tend à augmenter les sous estimations des erreurs de prévision et d'analyse. Nous avons vérifié que les différences entre le Nature Run et les run assimilés restaient importantes (et bien représentatives des erreurs modèles) et stables dans le temps après une période d'ajustement rapide liée à l'assimilation des données. La comparaison favorable des résultats avec ceux réalisés dans le cadre d'OSEs, i.e. avec des données réelles, valide aussi le protocole utilisé.

En second lieu, un bruit a été ajouté aux observations afin de simuler une erreur de mesure. L'erreur de mesure réelle est complexe à caractériser. Ces comportements ne sauraient être simplifiés fidèlement par un unique bruit blanc gaussien. Les comportements des systèmes observés ici ne peuvent donc pas être totalement réalistes par rapport à ce qu'il est possible de constater dans la réalité. En outre il est nécessaire de prendre en compte les erreurs de représentativité qui sont également difficiles à caractériser.

Toujours concernant les observations, en utilisant les positions des profileurs Argo

des années 2009 et 2010, nous avons créé des jeux de profils complètement indépendants des courants océaniques du Nature Run. Ce choix est motivé afin d'avoir des positions d'Argo qui correspondent à une dynamique réelle du vrai océan et non à celui simulé. L'impact de cette décorrélation spatiale entre positions des profils et dynamique du Nature Run n'a pas été estimé mais il est possible qu'elle influence les résultats.

Enfin, dans ces expériences les mêmes forçages atmosphériques (fichiers opérationnels de l'ECMWF) ont servi pour le Nature Run et pour les expériences d'assimilation. Il serait sans doute utile d'estimer l'impact des erreurs sur les forçages dans de futures OSSEs. Les forçages ayant un fort impact sur l'état de surface de l'océan, ils aident dans une certaine mesure à reproduire la dynamique de surface du Nature Run dans les OSSEs. Cela n'est pas le cas dans les régions de forte variabilité mesoéchelle pour lesquelles les erreurs sont surtout liées à des différences d'état initial entre le Nature Run et les run assimilés. De plus, la SST n'a pas été assimilée afin d'isoler les contributions de l'altimétrie et de profileurs Argo, or cette SST permettrait de limiter l'impact des erreurs sur les forçages dans les résultats.

Évolutions et perspectives

Les évolutions à apporter à cette étude concernent tout d'abord certaines des limitations mentionnées précédemment.

Les résultats présentés ici sont des statistiques calculées sur une courte période de sept mois. Il conviendrait de prolonger ces expériences sur une plus longue période (plusieurs années) afin d'avoir des statistiques plus fiables et d'évaluer les erreurs d'analyse à plus basse fréquence.

En quantifiant les erreurs de prévision par rapport à la persistance (forecast skill), il a été possible d'identifier les régions les plus sensibles à l'assimilation de nouvelles données. En étendant cet horizon de prévision à un ou deux mois, il serait possible de mieux quantifier la prédictibilité de la mesoéchelle.

Nous comprenons maintenant l'importance des OSSEs en tant qu'outil afin d'évaluer les capacités des différents jeux d'observations. Ce type d'expériences doit aussi être envisagé dans un cadre de recherche et développement sur l'amélioration des schémas d'assimilation. Le paramètre variant d'une expérience à l'autre ne serait plus le jeu d'observations mais le système d'assimilation.

De manière plus générale, les OSSEs doivent aussi être orientées vers la question du futur des réseaux d'observation. Seraient alors concernés : l'altimétrie combinant mesure au nadir et à large fauchée (satellite SWOT), les satellites permettant la mesure des courants de surface ou encore les évolutions des réseaux in situ. Cette dernière problématique est actuellement étudiée à Mercator Océan à travers le projet H2020-AtlantOS. Ce projet cible les données Argo et leur densification, l'utilisation de profileurs Argo Deep plongeant à 4000 et 6000 m, les mouillages, les gliders et les lignes XBT. Le développement du réseau d'observation des grandeurs biogéochimiques (e.g

BioGeoChemical Argo) ainsi que les systèmes opérationnels associés nécessitent aussi d'être diagnostiqués à travers l'utilisation d'OSSEs.

Enfin, il est possible d'envisager de développer une activité systématique d'analyse de l'impact des observations dans les systèmes opérationnels grâce à une utilisation conjointe d'OSEs et d'OSSEs. L'intérêt de ces dernières est certain mais la difficulté de leur utilisation provient de leur calibrage. C'est via les OSEs que peuvent être construites des OSSEs réalistes qui permettront de quantifier de manière fiable les apports des différents jeux d'observations actuels et futurs dans les prévisions et analyses océaniques. Il serait en parallèle très intéressant de mettre en places d'autres outils complémentaires permettant d'estimer directement l'impact des observations dans les systèmes d'assimilation (e.g Degree of Freedom of Signal, Cardinalli, 2004).

Bibliographie

- Bell, M. J, Lefebvre, M., Le Traon, P.-Y., Smith, N. and Wilmer-Becker, K. : The Global Ocean Data Assimilation Experiment. *Oceanography* Vol.22, No.3, 14-21, 2009.
- Bell, M.J., A. Schiller, Le Traon, P. Y., Smith, N. R., Dombrowsky, E. and Wilmer-Becker, K. : An introduction to OceanView. *Journal of Operational Oceanography*, 8 (suppl.1), 2-11, 2015.
- Benkiran M., Remy, E., Greiner, E., Drillet, Y. and Le Traon, P.-Y. : An Observing System Simulation Experiment to evaluate the impact of SWOT in a regional data assimilation system (in preparation), 2016.
- Bloom, S. C., Takas, L. L., Da Silva, A. M., and Ledvina, D. : Data assimilation using incremental analysis updates. *Mon. Weather Rev.*, 124, 1256–1271, 1996.
- Boy, F., Desjonquères, J.-D., Picot, N., Moreau, T., and Raynal, M. : CryoSat-2 SAR-Mode Over Oceans : Processing Methods, Global Assessment, and Benefits, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 55, 148–158, 2017.
- Brasseur, B. and J. Verron, J. : The SEEK filter method for data assimilation in oceanography a synthesis. *Ocean Dynamics* 56 : 650–661, 2006.
- Cardinalli, C., Pezzulli, S. and Andersson, E. : Influence-matrix diagnostic of a data assimilation system. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 130, pp. 2767–2786, 2004.
- Claustre, H., Bishop, J., Boss, E., Stewart, B., Berthon, J.F., Coatanoan, C., Johnson, K., Lotiker, A., Ulloa, O., Perry, M.J., D’Ortenzio, F., Hembise Fanton D’Endon, O. and Uirz, J. : Bio-optical profiling floats as new observational tools for biogeochemical and ecosystem studies, in *Proceedings of "OceanObs'09 : Sustained Ocean Observations and Information for Society"*, Conference, Venice, Italy, 2010.
- Cronin, M. F., Bond, N. A., Farrar, J. T., Ichikawa, H., Jayne, S. R., Kawai, Y., Konda, M., Qiu, B., Rainville, L., Tomita, H. : Formation and erosion of the seasonal thermocline in the Kuroshio Extension Recirculation Gyre. *Deep Sea Research Part II : Topical*

Studies in Oceanography 85 : 62-74, 2013.

- Dibarboure, G., Pujol, M.-I., Briol, F., Le Traon, P.-Y., Larnicol, G., Nicolas, P., Mertz, F., Ablain, M. Jason-2 in DUACS : Updated System Description, First Tandem Results and Impact on Processing and Products. *Marine Geodesy*, 34(3-4), 214-241, 2011.
- Dibarboure, G., Boy, F., Desjonqueres, J. D., Labroue, S., Lasne, Y., Picot, N., Poisson, J. C. and Thibaut, P. : Investigating Short-Wavelength Correlated Errors on Low-Resolution Mode Altimetry, *Journal of Atmos. Ocean. Technol.* , vol. 31 , pp. 1337 – 1362 , 2014.
- D’Ortenzio, F., Lavigne, H., Besson, F., Claustre, H., Coppola, L., Garcia, N., Laës-Huon, A., Le Reste, S., Malardé, D., Migon, C., Morin, P., Mortier, L., Poteau, A., Prieur, L., Raimbault, P., Testor, P. : Observing mixed layer depth, nitrate and chlorophyll concentrations in the northwestern Mediterranean : A combined satellite and NO₃ profiling floats experiment, *Geophysical Research Letters*, 41(18), 6443-6451, 2014.
- Ducet N., Le Traon, P.-Y., Reverdin, G. : Global high-resolution mapping of ocean circulation from the combination of T/P and ERS-1/2. *J. Geophys. Res.*, 105, 19,477-19,498, 2000.
- Dufau C., Orszynowicz, M., Dibarboure, G., Morrow, R. and Le Traon, P.-Y., 2016. Mesoscale resolution capability of altimetry : Present and future. *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 2016.
- Faugere, Y., Dorandeu, J., Lefevre, F., Picot, N. and Femenias, P. : Envisat ocean altimetry performance assessment, *Sensors* , 6(3), 100-130, 2006.
- Fichefet T. and Morales Maqueda, M. A. : Sensitivity of a global sea ice model to the treatment of ice thermodynamics and dynamics *journal of geophysical research* , vol 102, No C6 p. 12,609-12,646 June 15,1997.
- Guinehut, S., Le Traon, P. Y, Larnicol, G., Philipps, S. : Combining Argo and remote-sensing data to estimate the ocean three-dimensional temperature fields – a first approach based on simulated observations. *J. Marine. Sys.*, 46, 85-98, 2004.
- Guinehut, S., Dhomps, A. L., Larnicol, G. and Le Traon, P. Y. : High resolution 3D temperature and salinity fields derived from in situ and satellite observations. *Ocean Sci.*, 8, 845-857, 2012.

- Halliwel, G. R., Srinivasan, A., Kourafalou, V., Yang, H., Willey, D., Le Hénaff, M., and Atlas, R., : Rigorous Evaluation of a Fraternal Twin Ocean OSSE System for the Open Gulf of Mexico, *American Meteorological Society*, 31, 105-130, 2014.
- Hamill, T. M. and Juras, J. : Measuring forecast skill : is it real skill or is it the varying climatology ? *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 132, pp. 2905–2923, 2006.
- Hernandez, F., Blockley, E., Brassington, G. B., Davidson, F., Divakaran, P., Drévillon, M., Ishizaki, S., Garcia-Sotillo, M., Hogan, P. J., Lagema, P., Levier, B., Martin, M., Mehra, A., Mooers, C., Ferry, N., Ryan, A., Regnier, C., Sellar, A., Smith, G. C., Sofianos, S., Spindler, T., Volpe, G., Wilkin, J., Zaron, E. D., and Zhang, A. : Recent progress in performance evaluations and near real-time assessment of operational ocean products, *Journal of Operational Oceanography*, 8 (sup2), 2015.
- Hurlburt, H. E., Brassington, G. B., Drillet, Y., Kamachi, M., Benkiran, M., Bourdallé-Badie, R., Chassignet, E. P., Jacobs, G. A., Le Galloudec, O., Lellouche, J.-M., Metzger, E. J., Oke, P. R., Pugh, T. F., Schiller, A., Smedstad, O. M., Tranchant, B., Tsujino, H., Usui, N. and Wallcraft, A. J. : High-Resolution Global and Basin-Scale Ocean Analyses and Forecasts. *Oceanography* , vol.22, no 3, GODAE special issues. 2009.
- Kalman, R. E. : A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Journal of Basic Engineering*, 82 : 35-45, 1960.
- Large, W., and Yeager, S. : Diurnal to decadal global forcing for ocean and seaice models : the datasets and flux climatologies. NCAR technical note, CGD division of the National Center for Atmospheric Research, 2004
- Large, W. G. and Yeager, S. : The global climatology of an interannually varying air-sea flux data set. *Climate Dynamics*, 33, 341–364, 2009.
- Le Traon, P.-Y. : A method for optimal analysis of fields with spatially variable mean. *J. Geophys. Res.*, 95 (C8), 13 543– 13 547, 1990.
- Le Traon, P.-Y. : From satellite altimetry to Argo and operational oceanography : three revolutions in oceanography. *Ocean Science*, 9, 901-915, 2013.
- Le Traon, P.-Y. : Satellite oceanography and operational oceanography, *Operational Oceanography in the 21st Century*, 2011.

- Le Traon P.-Y. : From satellite altimetry to Argo and operational oceanography : three revolutions in oceanography. *Ocean Science*, 9(5), 901-915, 2013.
- Le Traon, P.-Y., Rienecker, M., Smith, N., Bahurel, P., Bell, M., Hurlburt, H., and Dandin, P. Operational Oceanography and Prediction – a Perspective, in *Observing the Oceans in the 21st Century*, GODAE project office, Bureau of Meteorology, 529-545, 2001.
- Le Traon, P.-Y. and Morrow, R. : Chapter 3, Ocean Currents and Eddies. *International Geophysics*, 2001.
- Le Traon, P.-Y., and Dibarboure, G. : Velocity mapping capabilities of present and future altimeter missions : the role of high frequency signals, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 19 : 2077-2088, 2002.
- Le Traon, P.-Y., Klein, P., Bach-Lien, H. and Dibarboure, G. : Do Altimeter Wavenumber Spectra Agree with the Interior or Surface Quasigeostrophic Theory? *American Meteorological Society*, 38, 1137-1142, 2008.
- Le Traon P.-Y., Larnicol, G., Guinehut, S., Pouliquen, S., Bentamy, A., Roemmich, D., Donlon, C., Roquet, H., Jacobs, G., Griffin, D., Bonjean, F., Hoepffner, N., Breivick, L. A. Data assembly and processing for operational oceanography : 10 years of achievements. *Oceanography*, Vol.22, No.3, 56-69, 2009
- Le Traon, P.-Y., Antoine, D., Bentamy, A., Bonekamp, H., Breivik, L.A., Chapron, B., Corlett, G., Dibarboure, G., Digiaco, P., Donlon, C., Faugere, Y., Font, J., Girard-Ardhuin, F., Gohin, F., Johannessen, J., Kamachi, M., Lagerloef, G., Lambin, J., Larnicol, G., Le Borgne, P., Leuliette, E., Lindstrom, E., Martin, M. J., Maturi, E., Miller, L., Mingsen, L., Morrow, R., Reul, N., Rio, M., Roquet, H., Santoleri, R., and Wilkin, J. : Use of satellite observations for operational oceanography : recent achievements and future prospects. *Journal of Operational Oceanography*, 8(supp.1), s12-s27, 2015.
- Lea, D. J., Martin, M. J. and Oke, P. R. : Demonstrating the complementarity of observations in an operational ocean forecasting system. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 140, 2037-2049, 2014.
- Legler, D. M., Freeland, H. J., Lumpkin, R., Ball, G., McPhaden, M. J., North, S., Crowley, R., Goni, G. J., Send, U., and Merrifield, M. A. The current status of the real-time in situ Global Ocean Observing System for operational oceanography. *Journal of Operational Oceanography* Vol. 8, Iss. sup2, 2015.

- Lellouche, J.-M., Le Galloudec, O., Drévilion, M., Régnier, C., Greiner, E., Garric, G., Ferry, N., Desportes, C., Testut, C. E., Bricaud, C., Bourdallé-Badie, R., Tranchant, B., Benkiran, M., Drillet, Y., Daudin, A., and De Nicola, C. : Evaluation of global monitoring and forecasting systems at Mercator Océan, *Ocean Sci.*, 9, 57-81, 2013.
- Madec, G., Delecluse, P., Imbard, M., et Levy, C. : OPA8.1 general circulation model reference manual, Notes de l'IPSL, Université P. et M. Curie, B102 T15-E15, Paris, 1998.
- Morrow, R. and Le Traon, P.-Y. : Recent advances in observing mesoscale ocean dynamics with satellite altimetry. *Advance in Space Research*, 2012.
- Oke, P. R., Balmaseda, M. A., Benkiran, M., Cummings, J. A., Fujii, Y., Guinehut, S., Larnicol, G., Le Traon, P.-Y., Martin, M. J., Dombrowsky, E. : Observing System Evaluations using GODAE systems. *Oceanography Vol.22, No.3*, 144-15, 2009.
- Oke, P. R., Larnicol, G., Fujii, Y., Smith, G. C., Lea, D. J., Guinehut, S., Remy, E., Alonso Balmaseda, M., Rykova, T., Surcel-Colan, D., Martin, M. J., Sellar, A. A., Mulet, S., and Turpin, V. : Assessing the impact of observations on ocean forecasts and reanalyses : Part 1, Global studies, *Journal of Operational Oceanography*, 8 :sup1, s49-s62, 2015.
- Pascual, A., Faugère, Y., Larnicol, G. and Le Traon, P.-Y. : Improved description of the ocean mesoscale variability by combining four satellite altimeters. *Geophysical Research Letters*, vol. 33, 2006.
- Pham, D. T., Verron, J., et M. C. Roubaud, M. C. : Singular evolutive extended Kalman filter with EOF initialization for data assimilation in oceanography, *J. Marine. Sys.*, 16 , 323-340, 1998.
- Qiu, B., Cronin, M., Joyce, T., Kwon, Y.-O., Roemmich, D., Suga, T. and Talley, L. : Preparing the Next Decade for Argo in the World WBC Regions. Presentation, 4 th Argo Science Workshop Round Table, Venice-Lido, 29 Sept 2012.
- Riser, S. C., Freeland, H. J., Roemmich, D., Wijffels, S., Troisi, A., Belbeoch, M., Gilbert, D., Xu, J., Pouliquen, S., Thresher, A., Le Traon, P.-Y., Maze, G., Klein, B., Ravichandran, M., Grant, F., Poulain, P. M., Suga, T., Byunghwan, L., Sterl, A., Sutton, P. , Mork, K. A. , Velez-Belch Pedro, J., Ansorge, I., King, B., Turton, J., Baringer, M., Jayne, S. R. : Fifteen years of ocean observations with the global Argo array. *Nature Climate Change*, 6(2), 145-153, 2016.

- Roemmich, D., Boebel, O., Desaubies, Y., Freeland, H., Kuh Kim, King, B., Le Traon, P.-Y., Molinari, B., Owens, B., Riser, S., Send, U., Takeuchi, K. and Wijffels, S. Argo : The Global Array of Profiling Floats. In *Observing the Oceans in the 21st Century*, GODAE Project Office, Bureau of Meteorology, pages 248-258, 2001.
- Roemmich, D., Belbeoch, M., Belchi, P. J. V., Freeland, H., Gould, W. J., Grant, F., Ignaszewski, M., Klein, B., Mork, K.A., Owens, W.B., Pouliquen, S., Ravichandran, M., Riser, S., Sterl, A., Suga, T., Suk, M.-S., Sutton, P., Thierry, V., Le Traon, P.-Y., Wijffels, S., Xu, J. Argo : the challenge of continuing 10 years of progress. *Oceanography*, Vol.22, No.3, 46-55,2009.
- Smith, N., and Lefebvre, M. : The Global Ocean Data Assimilation Experiment (GODAE). Paper presented at *Monitoring the Oceans in the 2000s : An Integrated Approach*, Biarritz, France, October 15–17, 1997.
- Stammer, D. Global Characteristics of Ocean Variability Estimated from Regional TOPEX/ POSEIDON Altimeter Measurements. *American Meteorological Society*, 27, 1743-1769, 1997.
- Talagrand, O. : A posteriori verification of analysis and assimilation algorithms. Workshop on *Diagnosis of Data Assimilation Systems*, Reading, UK ,2-4 November 1998.
- Thibaut, P., Dibarboure, G., Poisson, J.-C., Labroue, S., Dufau, C., Lasne, Y., Boy, F., Desjonqueres, J.D., Picot, N. : Short wavelength correlated errors on low-resolution mode altimetry, presentation, OSTST Boulder, 2013.
- Turpin, V., Remy, E., and Le Traon, P. Y. : How essential are Argo observations to constrain a global ocean data assimilation system? *Ocean Sci.*, 12, 257-274, 2016.
- Tranchant, B., Testut, C.-E., Renault, L., Ferry, N., Birol, F., and Brasseur, P. : Expected impact of the future SMOS and Aquarius ocean surface salinity missions in the Mercator Ocean operational systems : New perspectives to monitor ocean circulation. *Remote Sens. Environ.*, 112, 1476–148, 2008.
- Ubelmann, C. : Étude de scénarios d’altimétrie satellitaire pour le contrôle de la circulation océanique dans l’océan Atlantique tropical par assimilation de données. PhD Thesis, Université Joseph Fourier, Grenoble. 2009.
- Yashayaev, I. and Loder, J. W. : Enhanced production of Labrador Sea Water in 2008. *Geophysical Research Letters*, vol. 36, 2009.

Liste des figures

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | (a) Positionnement des points de calcul des différentes variables. T se situe au centre de la maille. C'est le point scalaire où sont calculées la température, la salinité, la densité, la pression et la divergence horizontale. (u,v,w) indiquent les points vectoriels de vitesse et f les points de vorticité planétaire et relative. (b) Position de la bipolarité Nord de la grille ORCA. | 16 |
| 2.2 | Principe de la mesure altimétrique. | 19 |
| 2.3 | Traces de Jason1 (a) Jason2 (b) et Envisat (c) sur une semaine | 23 |
| 2.4 | Etat de la flotte Argo en Décembre 2016 (vert : Bio-Argo, bleu clair : Deep-Argo, bleu : Argo et rouge : Equivalent Argo).(Source : www.jcommops.org). | 24 |
| 2.5 | Principe de la mesure de profils Argo. (Source : www.naos-equipex.fr). | 25 |
| 2.6 | Représentation schématique de l'IAU pour trois cycles consécutifs. BEST représente l'analyse. (Lellouche et al 2013). | 29 |
| 2.7 | Carte d'écart-type d'erreurs de SSH (en m) utilisée afin de définir la matrice à la côte dans les simulations au $1/4^\circ$ | 31 |
| 3.1 | Histogrammes des erreurs ajoutées aux données altimétriques simulées et lois normales théoriques associées pour Jason1. | 39 |
| 3.2 | Bruitage des observations issues des trois altimètres pour la semaine du 8 au 14 Juillet 2009. | 40 |
| 3.3 | Prescription de JCOMMOPS quant à l'augmentation du nombre de profils dans les courants de bord ouest ainsi qu'à l'équateur. (Source : www.jcommops.org). | 41 |
| 3.4 | Positions des profils Argo issues des positions réelles pour les années 2009 (sur l'ensemble du globe) et 2010 (uniquement dans les zones concernées par l'étude) sous forme de densité sur un an (nombre de profils verticaux) par boîtes de $3^\circ \times 3^\circ$ | 42 |
| 3.5 | Profils théoriques (courbes bleues) et observations simulées et bruitées (points noirs) pour un profil réalisé le 30 juillet 2009 par 147.66°W et $44,29^\circ\text{S}$ | 43 |

| | | |
|------|---|----|
| 3.6 | Variances du niveau de la mer en cm^2 des simulations libres au cours de l'année 2009. | 45 |
| 3.7 | Norme des vitesses en cm.s^{-1} dans le Gulf Stream à l'état initial des simulations (7 janvier 2009). | 46 |
| 3.8 | États initiaux en température ($^{\circ}\text{C}$) de la bande équatoriale Pacifique pour les trois simulation libres. | 48 |
| 3.9 | Carte d'écart-type de l'erreur de représentativité de niveau de la mer en cm calculée à partir des champs du Nature Run. | 51 |
| 3.10 | Positions des observations altimétriques assimilées. | 54 |
| 3.11 | Incrément en niveau de la mer (SL) (<i>cm</i>). | 55 |
| 3.12 | Incréments de surface pour la température (T), la salinité (S) et la vitesse zonale (U). | 55 |
| 3.13 | Incréments de surface pour le niveau de la mer (SL), la température (T), la salinité (S) et les vitesses zonale (U) et méridienne (V). Points noirs : positions des observations assimilées de SL. | 56 |
| 3.14 | Incréments à 318m pour la température (T), la salinité (S) et les vitesses zonales (U) et méridiennes (V). | 58 |
| 3.15 | Incréments de niveau de la mer (cm) dans le Gulf Stream pour les simulations Exp0 (a) et Exp1 (b) et incrément théorique (c). | 59 |
| 3.16 | Incréments de niveau de la mer (cm) dans le Pacifique Sud pour les simulations Exp0 (a) et Exp2 (b) et incrément théorique (c). | 60 |
| 3.17 | Incréments rejetés de niveau de la mer (cm) dans le Pacifique Sud pour les simulations Exp0 (a) et Exp2 (b). | 62 |
| 4.1 | a) Satellites tracks over 35 days in the North Atlantic. Blue : Jason 2 ; Black : Envisat ; Red : Jason 1. b) Argo profiles over the year 2009. . . | 71 |
| 4.2 | Global Mean Square Error (MSE) of the relative SL compared to NR in cm^2 for the FR (a), Sat1 (b,c), Sat2 (d,e) and Sat3 (f,g). 7-day forecast on the left column and analyses on the right. | 74 |
| 4.3 | Time evolution of the global MSE of SL in cm^2 for both analyses (plain lines) and 7-day forecasts (dashed lines) for Sat1(blue), Sat2(green) and Sat3(red) | 75 |
| 4.4 | GS 7-day forecast MSE of SL in cm^2 for Sat1 (a), Sat2 (b) and Sat3 (c). | 76 |
| 4.5 | GS analyses MSE of SL in cm^2 for Sat1 (a), Sat2 (b) and Sat3 (c). | 77 |
| 4.6 | AC 7-day forecast MSE of SL in cm^2 for Sat1 (a), Sat2 (b) and Sat3 (c). | 78 |
| 4.7 | AC analyses MSE of SL in cm^2 for Sat1 (a), Sat2 (b) and Sat3 (c). | 79 |
| 4.8 | KU 7-day forecast MSE of SL in cm^2 for Sat1 (a), Sat2 (b) and Sat3 (c). | 80 |
| 4.9 | KU analyses MSE of SL in cm^2 for Sat1 (a), Sat2 (b) and Sat3 (c). | 81 |

| | | |
|------|--|-----|
| 4.10 | Sea Level error energy spectrum in the GS (a), AC (b) and KU (c) for FR (black), Sat1 (blue), Sat2 (green) and Sat3 (red). Analyses are in plain line and 7-day forecast in dashed line. | 82 |
| 4.11 | Global MSE in $\text{cm}^2.\text{s}^{-2}$ of U compared to NR in cm for the FR (a), Sat1 (b,c), Sat2 (d,e) and Sat3 (f,g). 7-day forecast on the left column and analyses on the right. | 84 |
| 4.12 | Global 7-day forecast RMSE of zonal (a) and meridional (b) velocities profiles in $\text{cm}.\text{s}^{-1}$ for RF (black), Sat1 (blue), Sat2 (green) and Sat3 (red). | 86 |
| 4.13 | Global 7-day forecast RMSE of temperature (a) and salinity (b) profiles respectively in $^{\circ}\text{C}$ and psu for RF (black), Sat1 (blue), Sat2 (green) and Sat3 (red). | 86 |
| 4.14 | Global 7-day forecast RMSE of temperature (a) and salinity (b) profiles respectively in $^{\circ}\text{C}$ and psu for RF (black), Sat3 (blue) and Argo1 (red). | 87 |
| 4.15 | 7-day forecast RMSE of temperature in $^{\circ}\text{C}$ for Sat3 (left) and Argo1 (right) at the surface (a,b), 318m (c,d), 902m (e,f), and 1941m (g,h). | 89 |
| 4.16 | Positions des profils Argo en 2009 (rouge) et 2010 (bleu) assimilées dans la simulation Argo2. | 91 |
| 4.17 | Profils de RMSE globaux en analyse (traits pleins) et prévision à 7 jours (pointillés) pour Sat3, Argo1 et Argo2 en température (T) (a) et salinité (S) (b). Le Free Run est donné pour comparaison | 92 |
| 4.18 | Profils régionaux de RMSE de température (T) pour Run Free, Sat3, Argo1 et Argo2 ($^{\circ}\text{C}$). | 93 |
| 4.19 | Profils régionaux de RMSE de salinité (S) pour Run Free, Sat3, Argo1 et Argo2 (psu). | 94 |
| 4.20 | Cartes de RMSE en prévision de température (T) dans le Gulf Stream à 318m ($^{\circ}\text{C}$). | 95 |
| 4.21 | Cartes de RMSE en prévision de salinité (S) dans le Gulf Stream à 318m (psu). | 96 |
| 4.22 | Diagramme température/salinité, sur la période de juin à décembre, jusqu'à 2000 m, dans la boîte (41°N - 51°N ; 41°O - 31°O), les points indiquent la profondeur de 318 m. | 96 |
| 4.23 | Position moyenne de juin à décembre du front (isotherme 14°C à 318 m) dans le Gulf Stream. La ligne rouge représente le front des différentes simulations et la ligne noire le front du Nature Run. | 98 |
| 4.24 | Section verticale, en latitude et en température (T) dans le Gulf Stream (57°O). Les isothermes noires indiquent le Nature Run. | 99 |
| 4.25 | Forecast Skill pour le niveau de la mer (SL) pour les simulations Sat1 (a), Sat2 (b) et Sat3 (c). | 103 |
| 4.26 | Cartes de variabilité d'erreur de prévision (a) et de persistance (b) pour le niveau de la mer (SL) en cm^2 pour la simulation Sat3. | 104 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 5.1 | RMSE en prévision à 7 jours (a,c) et en analyse (b,d) pour la température à 318 m (T) pour Sat3 (LRM) (a) et Sat3_s (SAR) (b) (°C). | 111 |
| 5.2 | Incréments calculés par SAM-2 pour la température de surface (T) pour Sat3 (LRM) (a) et Sat3_s (SAR) (b) (°C). | 112 |
| 5.3 | Incréments rejetés calculés par SAM-2 pour la température de surface (T) pour Sat3 (LRM) (a) et Sat3_s (SAR) (b) (°C). | 112 |
| 5.4 | Mean Square Error of sea level (SL) for the Free Run (cm ²). | 118 |
| 5.5 | Mean Square Error of seal level (SL) for the CONV (a) and SAR (c) analyses and CONV (b) and SAR (d) forecasts for the global high resolution 1/12° Mercator Ocean system (cm ²). | 119 |
| 5.6 | Forecast Skill en niveau de la mer (SL) pour les simulations Sat3 (a) et Sat3_s (b) (système au 1/4°). | 123 |
| 5.7 | Forecast Skill en niveau de la mer (SL) pour les simulations CONV (a) et SAR (b) (système au 1/12°). | 124 |

Liste des tableaux

| | | |
|-----|---|-----|
| 3.1 | Les différentes simulations libres, leurs dates d'initialisation et les forçages atmosphériques utilisés. | 44 |
| 3.2 | Récapitulatif des expériences d'assimilation en fonction de leur grille et des données utilisées. | 52 |
| 3.3 | Récapitulatif des expériences de sensibilité menées. | 53 |
| 4.1 | Computed simulations and assimilated data set. | 72 |
| 4.2 | Assimilated simulation relative Sea Level MSE in percent of the Free Run MSE. | 74 |
| 4.3 | Assimilated simulation relative zonal velocity (U) meridional velocity (V) and MSE in percent of the Free Run MSE. | 85 |
| 4.4 | RMSE en température (T) et salinité (S) à 318 m pour les simulations Argo1, Argo2 et Sat3 en % de la RMSE du Free Run. | 93 |
| 4.5 | Forecast skills globaux pour le niveau de la mer dans le système d'assimilation au 1/4° | 102 |
| 5.1 | RMSE pour la température (T) à 318 m en prévision à 7 jours et en analyses pour Sat3 (LRM) et Sat3_s (SAR) (°C). | 110 |
| 5.2 | MSE pour le niveau de la mer (SL) en prévision à 7 jours et en analyse pour Sat3 (LRM), Sat3_r (LRM+repr.), Sat3_s (SAR) et Sat3_sr (SAR+repr.) (cm ²). | 112 |
| 5.3 | RMSE pour la température de surface (T) en prévision à 7 jours et en analyse pour Sat3_r (LRM+repr.) et Sat3_sr (SAR+repr.) (°C). | 113 |
| 5.4 | Mean Squared Errors (MSEs) for Sea Level (SL), zonal (U) and meridional (V) velocity analysis and 7-day forecast errors. Free Run MSEs (i.e. free run minus nature run) are also given. Units are cm ² for SL and cm ² s ⁻² for U and V. | 120 |
| 5.5 | Reduction (in percentage) of Mean Squared Errors (MSEs) between SAR and CONV for Sea Level (SL), zonal (U) and meridional (V) velocity analysis forecast errors. Statistics are given for three WBC regions : Gulf Stream (GS), Kurohio (KU) and Algulhas Current (AC). | 120 |

| | | |
|-----|---|-----|
| 5.6 | Forecast skills en niveau de la mer (SL) les simulations Sat3 (LRM,1/4°), Sat3_s (SAR, 1/4°) CONV (LRM, 1/12°) et SAR (SAR,1/12°). | 122 |
|-----|---|-----|

Title : Impact of future and current altimetry and in situ networks on the oceanic analysis and forecasts

Author : Simon Verrier, directed by Pierre-Yves Le Traon

Defended the 20th of March 2017 at Observatoire Midi Pyrénées, Toulouse, France

Abstract :

Two series of Observing System Simulation Experiments (OSSEs) are carried out with global data assimilation systems at $1/4^\circ$ and $1/12^\circ$ resolution using simulated altimetry (satellite) and in situ (Argo float) data derived from a $1/12^\circ$ resolution free run simulation. The objectives are to quantify how well different data sets can constrain a global data assimilation system. The positive impact of multiple altimeter data is clearly evidenced on sea level and ocean currents. The addition of Argo has a major impact to improve temperature and demonstrates the essential role of Argo together with altimetry to constrain a global data assimilation system. Results derived from these OSSEs are consistent with those derived from experiments with real data (observing system evaluations/OSEs) but they allow a more detailed characterization of errors on analyses and forecasts.

Keywords :

Oceanography, operational systems, altimetry, Argo float, OSSE, OSE, analysis, forecast, $1/4^\circ$, $1/12^\circ$

Titre : Impact des missions altimétriques et des réseaux de mesure in situ actuels et futurs sur l'analyse et la prévision océanique

Discipline : Océanographie

Auteur : Simon Verrier, sous la direction de Pierre-Yves Le Traon

Unité de recherche : Mercator Océan, 10 Rue Hermès, 31520 Ramonville-Saint-Agne

Soutenue le 20 Mars 2017 à l'Observatoire Midi Pyrénées

Résumé :

Deux séries d'OSSEs (Observing System Simulation Experiments) sont menées avec deux systèmes globaux d'assimilation de données au $1/4^\circ$ et au $1/12^\circ$, utilisant des observations altimétriques (satellites) et in situ (flotteurs Argo) simulées à partir d'une simulation libre au $1/12^\circ$. Les objectifs sont d'évaluer la capacité des différents jeux d'observations à contraindre un système global d'assimilation de données. L'impact positif de plusieurs satellites est clairement identifié autant sur le niveau de la mer et les courants de surface. L'ajout des flotteurs Argo améliore significativement les champs de température et démontre le rôle essentiel de la flotte Argo associée à l'altimétrie afin de contraindre un système d'assimilation global. Ces résultats issus d'OSSEs sont cohérents avec des résultats obtenus à partir de données réelles (OSEs - *Observing System Evaluations*) tout en permettant une meilleure description des erreurs faites sur les analyses et les prévisions.

Mots clé :

Océanographie, Systèmes opérationnels, altimétrie, flotte Argo, OSSE, OSE, analyse, prévision, $1/4^\circ$, $1/12^\circ$