

Validation des données altimétriques par comparaison aux mesures in-situ T/S

pour TOPEX/Poseidon, Jason-1, Envisat et Jason-2



Reference : CLS.DOS/NT/10-017

Nomenclature : SALP-NT-MA-P2-21799-CLS

Issue : 1rev 1

Date : June 15, 2010



Historique des versions :		
Version :	Date :	Objet :
1.0	22 janvier 2010	Création
1.1	15 juin 2010	Mise à jour

Acteurs de la présente version :		
Rédigé par :	J.F. Legeais M. Ablain G. Valladeau	CLS CLS CLS
Vérifié par :	DT / AQM	CLS
Approuvé par :	J.P. Dumont	CLS
Application autorisée par :		

Analyse documentaire :	
Situation du document :	
Mots-clés :	
Liens hypertexte :	

Liste de diffusion :		
Organisme	Format de diffusion	Destinataires
CLS/DOS	1 electronic copy	G.DIBARBOURE
	1 electronic copy	S.GUINEHUT
	1 electronic copy	V.ROSMORDUC
	1 electronic copy	P.ESCUDIER
	1 electronic copy	J.DORANDEU
DOC/CLS	1 electronic copy	DOCUMENTATION
CNES	1 cd-rom	T.GUINLE
CNES	1 cd-rom	P.BOUBE
CNES	1 cd-rom	D.CHERMAIN
CNES	1 electronic copy	E.BRONNER
CNES	1 electronic copy	J.LAMBIN
CNES	1 electronic copy	N.PICOT
CNES	1 electronic copy	A.LOMBARD

Liste des tableaux et figures

List of Tables

List of Figures

1	<i>Répartition spatiale des données Argo au 6 septembre 2009</i>	2
2	<i>A gauche: Répartition géographique des mesures issues des flotteurs profilants du réseau Argo. A droite: Évolution du nombre de mesures issues du réseau Argo depuis 2002</i>	3
3	<i>Evolution temporelle de la proportion de l'océan couverte par les flotteurs profileurs Argo, concernant l'océan global et les deux hémisphères.</i>	3
4	<i>Cartographie des coefficients de régression calculés entre l'altimétrie et les profils T/S entre 0 et 900 mètres de profondeur</i>	6
5	<i>Histogramme des différences de SLA brutes et valides pour la mission Jason-1</i>	8
6	<i>Impact de l'utilisation des GDR C vs GDR B: moyenne (à gauche) et écart-type (à droite) de la SLA altimétrique totale colocalisée aux mesures in-situ jusqu'à la fin des GDR B (cycle 232).</i>	9
7	<i>Ecart-type de la SLA in-situ stérique avec les bases de données utilisées en 2008 et 2009.</i>	10
8	<i>Différence entre SLA altimétrique et in-situ sur toute la colonne d'eau et pour la partie stérique pour les missions Jason-1 (à gauche) et Envisat (à droite).</i>	12
9	<i>Différence de SLA altimétrique totale et in-situ totale pour les missions Jason-1 et 2, Envisat et Topex-Poséidon. Sur le domaine global (en bas), l'hémisphère nord (à gauche) et l'hémisphère sud (à droite).</i>	13
10	<i>Différence de SLA altimétrique totale et in-situ totale pour les missions Jason-1 et PVA avec soustraction des signaux annuels et semi-annuels issus de la mission Jason-1. Les pentes associées aux nuages de points sont indiquées ainsi que les signaux filtrés à 130 jours.</i>	15
11	<i>Différences des variances (carrés des écart-types filtrés à 130 jours) PVA / Jason-1 des différences entre SLA altimétrique totale et SLA in-situ totale.</i>	15
12	<i>Différence des cartes de variance des différences de SLA altimétrique totale et in-situ totale entre les PVA et Jason-1 en global (à gauche) et restreinte aux régions de variabilité océanique (énergie cinétique) < 50 cm².</i>	16
13	<i>A gauche: différence de SLA altimétrique totale et in-situ totale pour les missions Jason - 1, Jason - 2 et Topex-Poséidon avec soustraction des signaux annuels et semi-annuels issus de la mission J1. Pour cette dernière mission, la pente associée au nuage de points est indiquée ainsi que le signal filtré à 130 jours (courbe rouge). A droite: idem pour la mission Envisat avec la date du changement d'orbite GDR-B / GDR-C indiqué.</i>	17
14	<i>Différence de SLA altimétrique totale et in-situ totale pour les missions Jason-1 et Envisat avec suppression des signaux annuels et semi-annuels issus de la mission J1 et filtrage à 130 jours (à gauche) et restriction jusqu'en août 2008 (à droite).</i>	17
15	<i>Cartographie de la moyenne des différences de la SLA altimétrique totale / SLA in-situ totale pour Jason-1 (à gauche) et Envisat (à droite).</i>	18

16	<i>Cartographie de la moyenne des différences de la SLA altimétrique totale / SLA in-situ totale pour Jason-1 (à gauche) et Envisat (à droite) en référençant les anomalies à une période temporelle commune.</i>	19
17	<i>Différence Jason-1 / Envisat sur les différences entre SLA altimétrique totale et SLA in-situ totale en référençant les anomalies à une période temporelle commune.</i>	20
18	<i>A gauche: écart-types de la différence entre SLA altimétrique totale et SLA in-situ totale pour les missions Jason - 1, Jason - 2 et Topex-Poséidon. Le signal filtré à 130 jours est indiqué pour Jason-1 (courbe rouge). A droite: idem pour la mission Envisat. Les deux courbes des signaux filtrés sont superposées en bas.</i>	21
19	<i>Différence des variances (carrés des écarts-type filtrés à 130 jours) Jason-1 / Envisat des différences entre SLA altimétrique totale et SLA in-situ totale en global (cf figure 18 en bas) et restreinte aux régions de variabilité océanique (énergie cinétique) < 50 cm².</i>	22
20	<i>Cartographie de la variance des différences de la SLA altimétrique totale / SLA in-situ totale. A gauche: Jason-1, à droite: Envisat.</i>	23
21	<i>Différence des 2 cartes de variance précédentes entre Jason-1 et Envisat en global (à gauche) et restreinte aux régions de variabilité océanique (énergie cinétique) < 50 cm².</i>	23
22	<i>Suivis par cycle de $\Delta VAR(SLA)_{Alti}$ avec l'orbite GDR-C et GDR-B pour Jason-1 (à gauche) et Envisat (à droite).</i>	26
23	<i>Cartes de la différence de variance $\Delta VAR(SLA)_{Alti}$ avec l'orbite GDR-C et GDR-B pour Jason-1 (à gauche) et Envisat (à droite).</i>	27
24	<i>Cartes de la différence de variance $\Delta VAR(SLA)_{Alti}$ avec l'orbite GDR-C et GDR-B pour Jason-1 (à gauche) et Envisat (à droite) en excluant les zones de forte variabilité (énergie cinétique turbulente \dot{z} 50cm²).</i>	27
25	<i>Histogramme du nombre de flotteurs profileurs associés à la différence de variance $\Delta VAR(SLA)_{Alti}$ avec l'orbite GDR-C et GDR-B pour Envisat en excluant les zones de forte variabilité (énergie cinétique turbulente > 50cm²).</i>	28

Liste des AC et AD

Liste des documents applicables ou de référence

Contents

1. Introduction	1
2. Description des données in-situ	2
2.1. Bases de données utilisées	2
2.2. Couverture spatio-temporelle	2
3. Description et amélioration de la chaîne CalVal altimétrie/in-situ TS	5
3.1. Description de la chaîne	5
3.1.1. Vue d'ensemble	5
3.1.2. Hauteurs dynamiques totale et stérique	5
3.1.3. Colocalisation des données in-situ et altimétriques	7
3.1.4. Validation des mesures in-situ et altimétriques intercalibrées	7
3.1.5. Calcul des statistiques globales	7
3.2. Améliorations apportées en 2009	8
3.2.1. Base de données altimétriques	8
3.2.2. Base de données in-situ T/S	9
3.2.3. Missions altimétriques "virtuelles"	10
3.2.4. Évaluation des nouveaux standards altimétriques	11
4. Analyse des différences de SLA entre les données altimétriques et les profils T/S	12
4.1. Analyses des moyennes des différences de SLA	12
4.1.1. Utilisation des hauteurs dynamiques sur toute la colonne d'eau	12
4.1.2. Analyse du signal annuel par mission et par hémisphère	13
4.1.3. Impact de l'échantillonnage spatio-temporel	14
4.1.4. Analyses temporelles inter missions	16
4.1.5. Analyses spatiales	18
4.2. Analyses des variances des différences de SLA	20
4.2.1. Analyses temporelles	20
4.2.2. Analyses spatiales	22
5. Évaluation des nouveaux standards altimétriques	25
5.1. Vue d'ensemble	25
5.2. Application à la comparaison des orbites GDR-C/GDR-B	25
5.2.1. Suivis par cycle de $\Delta VAR(SLA)_{Alti}$	25
5.2.2. Cartographie de $\Delta VAR(SLA)_{Alti}$	26
5.2.3. Histogramme par flotteurs profileurs de $\Delta VAR(SLA)_{Alti}$	27
6. Conclusions	29
7. Références	31
8. Annexes	32
8.1. Annexe: Étapes de traitement de la chaîne CalVal altimétrie/in-situ T/S	32
8.2. Annexe: Poster OSTST comparaisons altimétrie/DHA	34
8.3. Annexe: Poster OSTST performance des retraitement GDR-C Jason-1	36

1. Introduction

Ce document est la synthèse pour l'année 2009 des activités de validation des données altimétriques au moyen de profils in-situ de Température / Salinité (T/S) issus des flotteurs lagrangiens du réseau Argo. Ce travail a été réalisé dans le cadre du contrat SALP et bénéficie de l'apport d'un projet mené à CLS dans le cadre d'un contrat Ifremer / Coriolis.

L'utilisation de mesures in-situ tel que les profils T/S (ou les marégraphes) pour la validation de l'altimétrie peut permettre d'atteindre trois objectifs:

- Détecter d'éventuelles anomalies dans les mesures altimétriques du niveau de la mer que la comparaison inter missions ne permet pas. Ces anomalies peuvent être des biais et des dérives du niveau moyen des océans.
- Evaluer la qualité des mesures altimétriques et de leurs corrections par analyse de la cohérence entre les deux types de données. C'est en effet un moyen externe et indépendant de mesurer le gain apporté par les nouveaux standards altimétriques dans le calcul de la hauteur de mer (nouvelles corrections géophysiques, algorithmes de retracking, éphémérides ou MSS...).
- Qualifier les mesures in-situ elles-mêmes et y détecter d'éventuelles anomalies.

La comparaison à des données externes indépendantes peut également permettre de fournir une meilleure connaissance de l'erreur sur la mesure altimétrique et ainsi contribuer aux travaux visant à mieux déterminer le budget d'erreur global de la mesure altimétrique (cf tâche 2.11 du projet SLOOP, [6]).

La comparaison entre les mesures altimétriques et in-situ nécessite de s'assurer de la bonne homogénéité des contenus physiques étudiés. Contrairement aux mesures marégraphiques qui sont (presque) directement comparables à l'altimétrie, les profils T/S permettent uniquement le calcul de la hauteur stérique sur les 900 premiers mètres de l'océan (notée DHA pour Dynamic Height Anomaly), c'est à dire approximativement la partie barocline. Pour la comparer à la SLA altimétrique, il faudra, via une méthode détaillée dans le rapport, se ramener à des contenus physiques comparables. Par ailleurs, l'intérêt des profils T/S réside dans leur complémentarité avec les données marégraphiques. En effet, bien que l'échantillonnage temporel soit moins bon (1 mesure tous les 10 jours par capteur en moyenne contre 1 mesure par heure pour les marégraphes), la couverture spatiale des profils T/S est au contraire nettement meilleure puisqu'une très grande partie de l'océan global est couverte.

Lors des deux années précédentes, l'intérêt et la pertinence de la validation des données altimétriques par comparaison aux profils T/S ont été démontré et les travaux menés ont permis d'améliorer à la fois la méthode de traitement et les interprétations scientifiques liées aux contenus altimétriques et in-situ. En 2009, des évolutions ont eu lieu sur les données et sur leur traitement, ce qui a permis d'approfondir les analyses qui sont présentées dans ce document. Les évolutions portent notamment sur les données altimétriques et les missions utilisées, la quantité et la qualité des mesures in-situ servant de référence et la méthode de comparaison des deux types de données.

Enfin, les études qui ont été menées cette année ont été axées autour des trois principaux objectifs cités ci-dessus et dans un contexte d'automatisation des traitements afin de pérenniser l'activité.

2. Description des données in-situ

2.1. Bases de données utilisées

Les données in-situ utilisées dans le cadre de ce projet sont les profils T/S issus du réseau Argo. Argo est un ensemble de flotteurs profilants mesurant la température et la salinité sur les 2000 premiers mètres de l'océan pour la plupart d'entre eux (le choix de la profondeur de référence pour déterminer les hauteurs dynamiques impactera donc le nombre de profileurs utilisés selon qu'ils aient atteint cette profondeur). Ceci permet de suivre de manière continue les principales caractéristiques de l'océan à l'aide d'une mise à disposition des mesures quelques heures seulement après leur collecte. Aujourd'hui plus de 3000 de ces flotteurs couvrent de manière presque globale l'ensemble de la surface des océans (figure 1). Les profils T/S utilisés pour la génération d'une base de données in-situ (au sens hauteurs dynamiques déduites de profils T/S ou DHA) sont issus du centre de données Coriolis (<http://www.coriolis.eu.org>). Ces profils peuvent être obtenus en temps réel ou en temps différé. La base de données contenant ces mesures est disponible et accessible dans une base de données interne à CLS pour la DHA concernant la période Janvier 2002 - Août 2009.

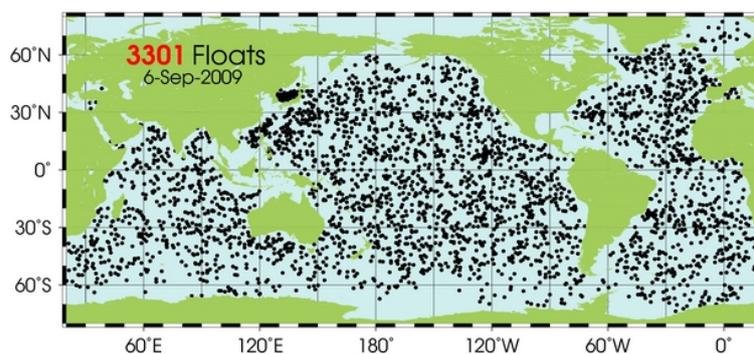


Figure 1: Répartition spatiale des données Argo au 6 septembre 2009

2.2. Couverture spatio-temporelle

Contrairement aux réseaux marégraphiques, les profils T/S couvrent l'ensemble des océans du globe. Ceux-ci sont récupérés par le centre Coriolis tous les 10 jours puis mis à disposition soit au bout de 24 heures soit en temps différé 5 mois plus tard. Le temps de mise à disposition s'explique principalement par le contrôle qualité et la calibration effectués sur les profils de Température/Salinité dans le cadre des études de MSL Argo. La figure 2 présente la répartition spatio-temporelle des mesures Argo pour la période 2002 - août 2009, date de la dernière mise à jour de la base de données.

Les profils T/S permettent d'avoir une couverture globale étant donné le nombre de mesures disponibles sur l'ensemble de cette période (près de 300 000). La carte présentée sur la figure 2 à gauche permet de rendre compte de la répartition spatiale des données Argo à travers des moyennes par boîte de 1° de latitude x 3° de longitude. Les zones les mieux échantillonnées (courant du Kuroshio et Golfe de Gascogne), présentent plus de 150 profils par boîte entre janvier 2002 et août 2009.

Le nombre de profils n'a cessé d'augmenter depuis 2002 (figure 2, à droite) pour s'approcher de 90 000 en 2008 (la dernière classe ne tient compte que des mesures disponibles en janvier-août 2009 et le nombre total de mesures en 2009 faiblement devrait dépasser à terme celui de 2008), ce qui est un atout majeur pour les missions les plus récentes (Jason-1, Envisat et Jason-2).

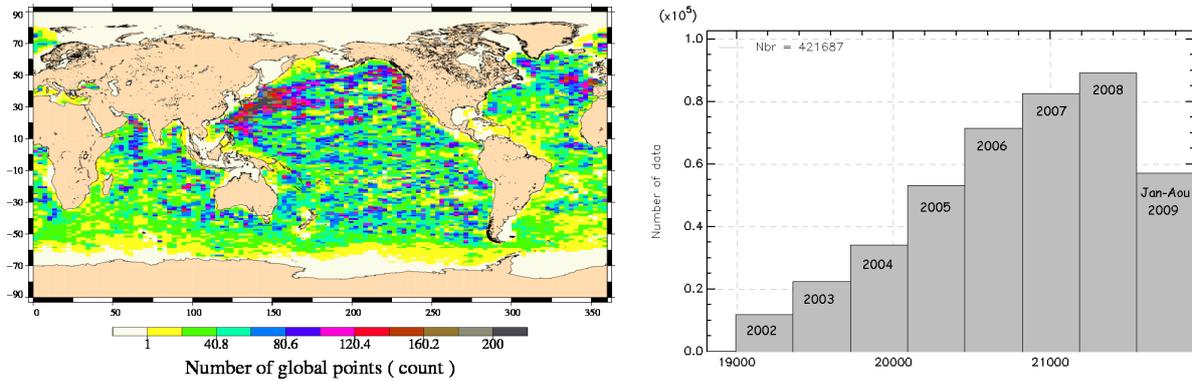


Figure 2: A gauche: Répartition géographique des mesures issues des flotteurs profilants du réseau Argo. A droite: Évolution du nombre de mesures issues du réseau Argo depuis 2002

Néanmoins, la distribution spatiale des profils n'a pas toujours été suffisamment dense pour permettre des analyses statistiquement correctes (notamment en raison d'un manque de données de salinité avant 2003). La figure 3 précise qu'en considérant un seuil de 80% de l'océan global couvert par les flotteurs, seules les analyses menées sur les données au-delà de mi-2004 sont considérées comme pertinentes. C'est le cas des résultats présentés dans ce rapport. A noter que la proportion d'océan échantillonné dans l'hémisphère nord est inférieure à celle de l'hémisphère sud à cause de l'absence de mesures dans l'océan arctique.

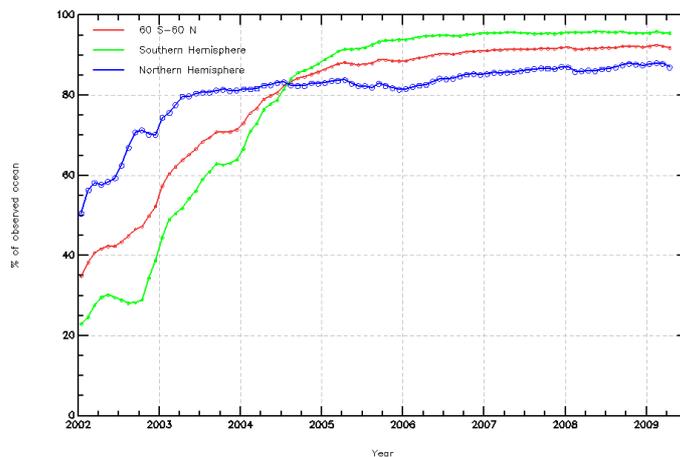


Figure 3: Evolution temporelle de la proportion de l'océan couverte par les flotteurs Argo, concernant l'océan global et les deux hémisphères.

Le grand nombre de profils T/S disponible constitue une source de données indépendantes, adaptée

à la comparaison aux mesures altimétriques, en particulier sur le domaine hauturier, où les marégraphes ne sont pas assez nombreux. Une chaîne de traitement a donc été développée et l'ambition majeure de celle-ci, à travers sa pérennité, est de permettre la validation de l'ensemble des missions altimétriques.

3. Description et amélioration de la chaîne CalVal altimétrie/in-situ TS

3.1. Description de la chaîne

3.1.1. Vue d'ensemble

Ce chapitre présente la méthode visant à comparer les données altimétriques et les anomalies de hauteur dynamique (DHA). Ces dernières représentent l'élévation du niveau de la mer intégré entre un niveau de référence (900 m pour les données Argo utilisées) et la surface de l'océan. Le schéma de fonctionnement (annexe 8.1.) présente les principales étapes de la méthode de comparaison, ici résumées:

1. Calcul de la DHA in-situ totale (référéncée à la période 2003-2008): l'utilisation d'une grille de coefficients de régression permet d'extrapoler la hauteur dynamique stérique à toute la colonne d'eau
2. Colocalisation des données in-situ et altimétriques : les données altimétriques sont interpolées dans l'espace et le temps aux dates et positions des mesures in-situ à partir de grilles de SLA moyennées sur 10 jours afin d'avoir une densité spatiale de données suffisante
3. Validation des mesures in-situ et altimétriques intercalibrées afin de ne conserver que les mesures comparables
4. Calcul des statistiques globales de différences de biais de hauteur de mer, ainsi que de la cohérence des mesures (variance des différences)

3.1.2. Hauteurs dynamiques totale et stérique

De manière générale, la mesure altimétrique est une estimation de l'élévation totale de la colonne d'eau (surface - fond). Par comparaison, la DHA fournie par les flotteurs profileurs représente uniquement l'élévation stérique des 900 premiers mètres de la colonne d'eau. Pour comparer ces deux types de données, il est nécessaire de ramener ces mesures à des contenus physiques similaires. Jusqu'à l'année dernière, il a été choisi d'extraire la partie du signal altimétrique cohérente à une hauteur dynamique référencée à 900m telle que fournie par les profils T/S. Le principe de calcul de la SLA altimétrique stérique s'appuie sur les travaux de Guinehut, 2002 ([4]). Cela consiste à multiplier les données altimétriques par une grille de coefficients de régression.

Le but de notre approche étant de qualifier les données altimétriques et afin de pouvoir comparer les résultats à des sources extérieures, nous choisissons d'analyser les résultats en terme de SLA concernant toute la colonne d'eau. Ce sont donc les anomalies de hauteurs dynamiques stériques issues des mesures in-situ qui sont extrapolées sur la verticale en les divisant par cette même grille de coefficients, puis comparées à la SLA altimétrique totale. La méthode de calcul de la grille de coefficients de régression comprend les étapes suivantes:

- Extraction des profils T et T/S issus de la base de données Coriolis

- Interpolation des profils de salinité quand seuls les profils de température sont mesurés via un diagramme (θ/S) ou une relation $S(z)$ climatologique en fonction de la zone géographique
- Calcul des hauteurs dynamiques à partir des profils T/S par rapport à un niveau de référence fixé à 900 m
- Interpolation des SLA altimétriques multi-missions temps différé (DUACS) aux positions et dates des mesures in-situ. L'interpolation des cartes est linéaire en temps et bilinéaire en espace
- Calcul des coefficients de régression entre les hauteurs dynamiques et les SLA altimétriques colocalisées

Ces coefficients sont estimés sur une grille de 2° de résolution en utilisant toutes les observations disponibles dans un rayon de 2° de latitude par 10° de longitude. La figure 4 montre que les valeurs de ces coefficients dépassent 0.8 aux basses latitudes et décroît en-deça de 0.4 à 50° Nord et Sud. La structure spatiale du coefficient de régression dépend principalement de la stratification verticale et du paramètre de Coriolis. Aux hautes latitudes où la stratification est faible et le paramètre de Coriolis est fort, le couplage vertical est fort et les mouvements barotropes dominant. Inversement, aux basses latitudes où la stratification est importante et le paramètre de Coriolis est faible, le couplage vertical est réduit et la circulation barocline domine.

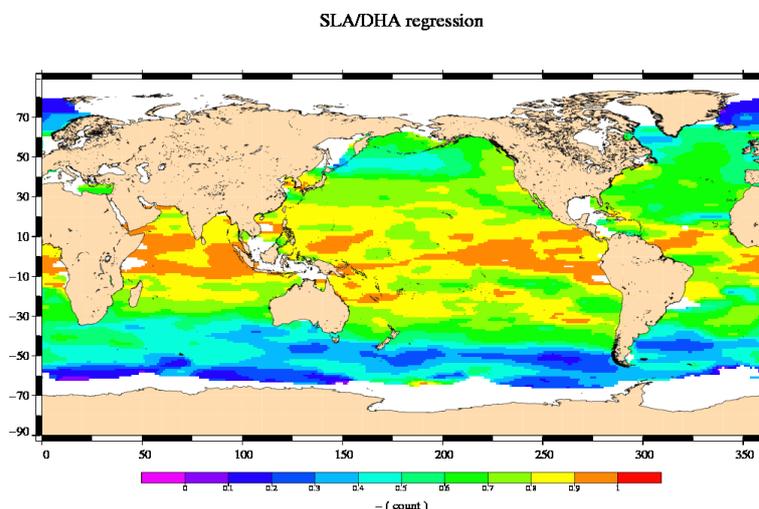


Figure 4: Cartographie des coefficients de régression calculés entre l'altimétrie et les profils T/S entre 0 et 900 mètres de profondeur

Cette méthode constitue un moyen de comparer les contenus physiques de l'altimétrie et des profils T/S. Cela reste néanmoins une approche approximative car d'une part la grille de coefficients de régression est basée sur une relation linéaire entre les SLA totale et stérique, et d'autre part les variations saisonnières ou inter-annuelles ne sont pas modélisées. Dans le cadre cette activité, il sera très utile de reporter toute amélioration relative à ce sujet. Afin d'obtenir une estimation plus

.....

précise de ces coefficients de régression, des cartes d'évolutions saisonnières voire mensuelles de ceux-ci pourront être calculées ainsi que l'erreur associée à la régression en chaque point. De plus la mise à jour de la grille de coefficients avec les nouveaux standards altimétriques qui apparaîtront à l'avenir permettra d'affiner les résultats obtenus. Mais au-delà de ces évolutions dont les impacts sont estimés relativement faibles, l'utilisation de grilles de coefficients de régression variant dans le temps (grilles annuelles) permettrait de mieux prendre en compte l'évolution du niveau moyen. En effet, les évolutions temporelles des niveaux moyens associés au champ de masse et à la partie stérique (dont la somme donne le MSL total) sont estimées linéaires. Or certaines études suggèrent que ce n'est pas le cas sur la période étudiée. Une carte de coefficients qui évoluerait dans le temps permettrait donc de mieux prendre en compte cette non linéarité et la qualité du suivi du niveau moyen serait donc fortement améliorée par une telle évolution. Par ailleurs, les contenus stériques et de la colonne d'eau totale sont plus proches l'un de l'autre dans les zones de fortes valeurs du coefficient de régression. Il serait donc intéressant de tester si les résultats obtenus sont meilleurs en restreignant les analyses à ces dernières régions seulement.

3.1.3. Colocalisation des données in-situ et altimétriques

La couverture spatiale des données altimétriques sur un cycle est meilleure que celle des profils T/S. Mais pour permettre une comparaison adaptée des données, des grilles de SLA altimétrique moyenne sont calculées tous les 10 jours afin d'avoir une couverture spatiale suffisante. La colocalisation des deux jeux de données est ensuite réalisée à partir de ces grilles par interpolation bilinéaire de l'altimétrie aux dates et positions des mesures in-situ.

3.1.4. Validation des mesures in-situ et altimétriques intercalibrées

Afin de fiabiliser les analyses statistiques, la chaîne de traitement effectue au préalable une double validation des SLA altimétriques et in-situ:

- d'abord par un critère sur la différence entre la SLA altimétrique stérique et la SLA in-situ. Le choix de ce critère de validation s'appuie sur l'histogramme des différences de SLA altimétrique / in-situ (figure 5) et est fixé à 20 cm. Ainsi ce critère prend la forme suivante: $|SLA_{alti} - SLA_{hydro}| \leq 0.2m$.
- ensuite par un critère s'appuyant sur les résultats tirés de l'altimétrie afin de fixer un seuil sur la valeur de l'anomalie maximale de hauteur de mer pour les mesures in-situ. Dans la chaîne de traitement, des anomalies supérieures à 1.5 m en valeur absolue sont considérées comme aberrantes et ne rentrent pas en compte dans les calculs statistiques: $|SLA_{hydro}| \leq 1.5m$

L'impact de l'editing sur ces deux critères est représenté sur la figure 5 (courbe rouge et barres bleues).

3.1.5. Calcul des statistiques globales

A partir des grandeurs stockées dans la base de données d'intercalibration altimétrie/in-situ, le traitement se poursuit en calculant des statistiques cycle par cycle pour une mission altimétrique donnée. Ces statistiques permettent par la suite de générer de nombreux diagnostics utiles à la

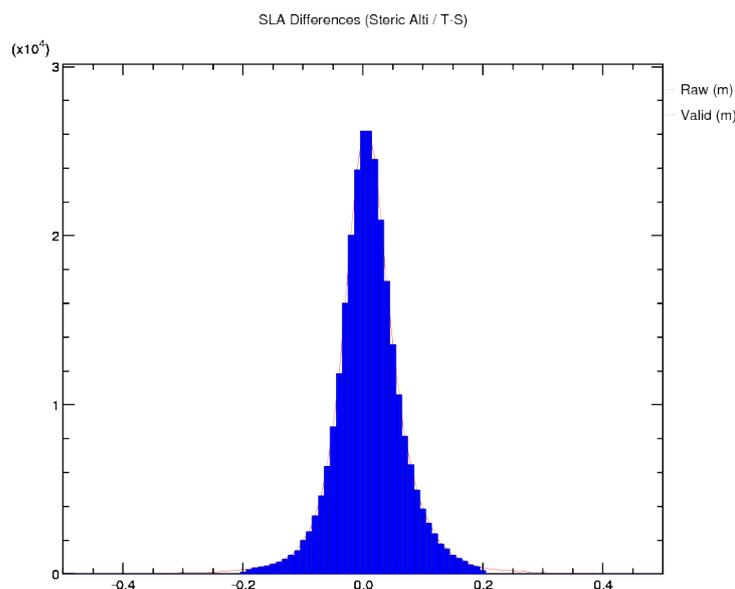


Figure 5: *Histogramme des différences de SLA brutes et valides pour la mission Jason-1*

validation des données altimétriques, tels que les suivis de statistiques élémentaires (moyenne, écart-type, nombre de données, minimum, maximum), la mesure de l'impact de la variabilité océanique ou du moyennage par boîte, les cartographies point par point et par boîte ainsi que les histogrammes des différences de SLA entre les jeux de données altimétrique et in-situ.

La méthode et les premiers résultats avaient été présentés lors de l'OSTST 2008 (cf poster en annexe 8.2.)

3.2. Améliorations apportées en 2009

Par rapport aux objectifs fixés dans le bilan annuel 2008 (cf [9] et [10]), des évolutions ont eu lieu en 2009 concernant les bases de données altimétrique et in-situ (T/S) ainsi que la chaîne de traitement. Plusieurs axes dans l'analyse des résultats ont pu être approfondis. Les évolutions sont présentées ci-dessous et les résultats sont décrits dans la section suivante.

3.2.1. Base de données altimétriques

Les analyses menées en 2008 avec la mission Jason-1 portaient sur les données GDR-B. Les données GDR-C sont disponibles à partir du cycle 233 (03/05/2008) et les cycles précédents ont également été retraités. Les analyses ont donc portées sur les données GDR-C sur toute la période Jason-1. La figure 6 montre le biais entre les moyennes des données GDR B et C (à gauche). Le signal annuel n'a pas été retranché sur ces suivis. Les écarts-type des SLA altimétriques sont similaires sur la période (à droite).

Concernant la mission Envisat, la SLA altimétrique était calculée en 2008 avec la correction de troposphère humide modélisée. Nous utilisons aujourd'hui la correction de troposphère radiométrique. A noter qu'à partir du cycle 69 (26/05/2008), l'orbite utilisée est l'orbite POE des GDR-C alors qu'il s'agit de celle des GDR-B auparavant.

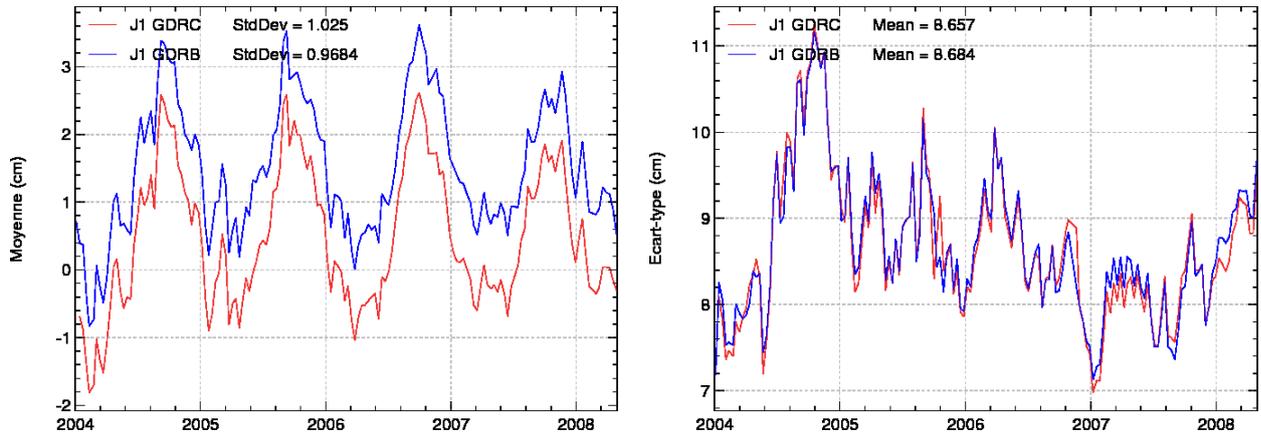


Figure 6: *Impact de l'utilisation des GDR C vs GDR B: moyenne (à gauche) et écart-type (à droite) de la SLA altimétrique totale colocalisée aux mesures in-situ jusqu'à la fin des GDR B (cycle 232).*

La mission Jason-2 ayant débuté en juillet 2008, la chaîne de traitement a été élargie à cette mission et la SLA altimétrique correspondante a été comparée aux mesures in-situ. Les résultats sont présentés dans la section suivante.

3.2.2. Base de données in-situ T/S

Les données in-situ des flotteurs profileurs ARGO sont transmises aux deux centres de données principaux (Global Data Assembly Center) aux Etats-Unis et en France. Nous récupérons les données diffusées par ce dernier (Centre Coriolis, Ifremer) sous forme de fichiers netcdf qui sont stockés dans notre base de données interne en conservant l'ensemble des informations contenues dans ces fichiers. Le projet ARMOR, dans le cadre duquel s'insère cette activité, s'appuie sur ces travaux. Ainsi la mise à disposition des données in-situ T/S est devenue commune à l'ensemble des activités gérées à CLS (CalVal, ARMOR, PISTACH...).

Bien que la récupération de données du centre Coriolis soit automatique, la mise à jour des tables requiert une étape supplémentaire de contrôle qualité des données recensées (dans le cadre d'un retour d'expérience vers le centre Coriolis). Ce contrôle qualité s'inscrit aussi dans le cadre du projet ARMOR et depuis cette année, il est effectué tous les trimestres, permettant une mise à jour régulière de la base de données. Dans le cadre de notre chaîne de traitement, une image de la base de données est réalisée à une date fixe afin de ne pas être dépendant d'éventuelles évolutions. Les analyses ont ainsi porté sur des données disponibles jusqu'en août 2009.

L'utilisation des mesures en temps différé dans la chaîne de traitement prédomine sur celles acquises en temps réel (la moitié des profileurs) et seules les mesures validées lors du contrôle qualité Argo sont prises en compte. Néanmoins, un contrôle qualité supplémentaire a été mis en place en amont du stockage dans notre base de données in-situ (la méthode est décrite dans le document [5]). Le principe repose sur la comparaison des SLA altimétriques aux anomalies de hauteur dynamique déduites des profils Argo de température et salinité. En étudiant à la fois la corrélation et la moyenne des différences entre ces 2 jeux de données, les mesures altimétriques permettent de déduire d'éventuelles erreurs dans les séries temporelles des flotteurs Argo. Environ 4% des capteurs ont ainsi été retirés des traitements grâce à ce contrôle qualité supplémentaire.

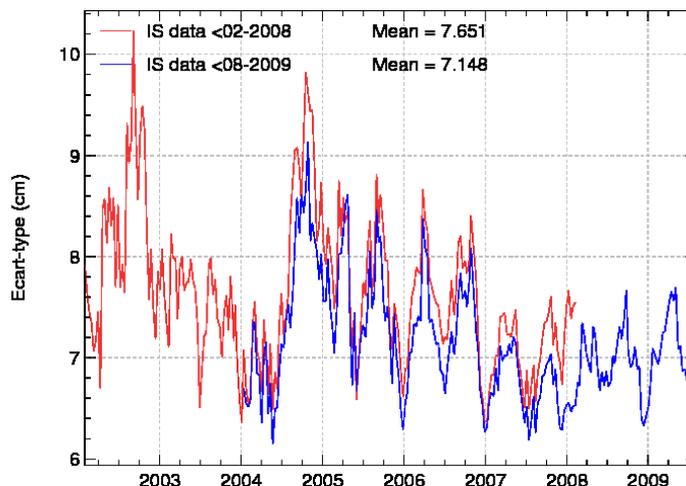


Figure 7: *Ecart-type de la SLA in-situ stérique avec les bases de données utilisées en 2008 et 2009.*

Outre l'allongement de la série temporelle des mesures, les évolutions de la base de données in-situ en 2009 portent également sur l'augmentation du nombre de mesures en temps différé et l'amélioration de la sélection des données lors du calcul de la SLA in-situ via un flag de qualité sur la date et la position des mesures. L'impact de ces évolutions est visible sur la figure 7 qui présente les suivis de la SLA in-situ stérique issus de l'ancienne (2008) et de la nouvelle (2009) base de données et montre une **baisse de l'écart-type de 0.3 cm** (s'élevant à 0.4 cm sur la période commune aux deux séries temporelles, 2004-2008). Les variations temporelles observées (pour les deux séries) peuvent s'expliquer par l'augmentation du nombre de profils ARGO mais aussi le traitement de ces données.

3.2.3. Missions altimétriques "virtuelles"

Parmi les améliorations de la chaîne apportées en 2008, 2 missions altimétriques "virtuelles" ou pseudo-missions avaient été créées. Il s'agit d'une part de la mission Envisat mais avec un découpage par cycles de 10 jours, permettant de s'affranchir des différences de répétitivité et d'obtenir une meilleure comparaison des résultats entre missions (notamment Topex/Poséidon, Jason-1 et Jason-2). Ce découpage s'était montré satisfaisant dans le cadre de notre étude (cf bilan annuel 2008: [9]). Il faut néanmoins garder à l'esprit lors des analyses qu'avec un découpage à 10 jours, la couverture spatiale n'est pas identique d'un cycle à l'autre.

D'autre part, les produits grillés SSALTO / DUACS multimissions (appelés dans ce rapport *PVA* pour *Produit à Valeur Ajoutée*) sont traités comme une pseudo-mission altimétrique au sein de la chaîne de comparaison altimétrie / in-situ TS. Ces produits sont calés sur les missions de référence qu'ont été successivement Topex-Poséidon, Jason-1 et Jason-2 et sont disponibles jusqu'en février 2009 (temps différé). Dans la chaîne de traitement, les cartes *PVA* sont directement interpolées linéairement en temps et bilinéairement en espace aux positions des profils Argo. Les *PVA* présentent une résolution spatio-temporelle plus élevée (1/3° à 7 jours) que les données mono-mission. Leur utilisation permet de réduire l'erreur de la méthode de colocalisation avec les données in-situ. Cela permet de quantifier l'amélioration de la cohérence aux mesures in-situ par rapport à des données altimétriques mono-mission.

Par ailleurs cette pseudo-mission peut permettre de comprendre les éventuelles anomalies observées

avec des produits de niveau 2 en terme de différences de SLA. Cela contribue donc à la validation de notre méthode de comparaison des mesures in-situ aux données altimétriques mono-mission, tel que doit le faire la chaîne de traitement développée dans le cadre du contrat SLAP.

A noter que notre méthode de comparaison de l'altimétrie à des données externes indépendantes sera adaptée et pertinente pour évaluer l'apport des nouveaux *PVA* générés fin 2009.

3.2.4. Évaluation des nouveaux standards altimétriques

La possibilité d'évaluer l'apport d'un nouveau standard altimétrique (corrections géophysiques de la SSH, orbite...) sur la qualité de la mesure altimétrique a été développée en 2008 et testée en comparant les orbites Jason-1 GDR-B et GDR-C (cf bilan annuel 2008: [9]). Des diagnostics tels que des différences de variances sont générés pour estimer la fiabilité d'une nouvelle version de correction de la SSH. Cette méthode d'évaluation de nouveaux standards altimétriques à travers la comparaison aux mesures in-situ a été développée sous forme de "banc de test" afin de compléter les études Cal/Val classiques. Les diagnostics peuvent être ajustés en fonction des études ou des projets utilisant la chaîne de traitement. Par analogie au projet PISTACH utilisant la chaîne de comparaison aux données in-situ marégraphiques, cette méthode pourra être utilisée dans le cadre du projet SLOOP ou d'autres projets visant à mesurer l'impact d'un nouveau standard altimétrique en plein océan par comparaison à des jeux de données indépendants de type in-situ. Néanmoins, l'utilisation de notre méthode pour comparer des standards tels que les modèles de marée GOT4.7 et GOT00 ne devrait pas fournir de résultats probants car ces deux modèles ne se différencient essentiellement qu'en domaine côtier et sont similaires en domaine hauturier où se trouvent les mesures in-situ.

4. Analyse des différences de SLA entre les données altimétriques et les profils T/S

Nous présentons dans cette partie l'analyse des différences de hauteurs de mer entre les mesures altimétriques et les profils T/S. D'une part, l'analyse des moyennes des différences donne des informations sur de potentielles dérives ou sauts de l'évolution du MSL altimétrique ainsi que d'éventuels biais géographiques systématiques. D'autre part, l'analyse de la variance des différences de SLA permet d'étudier la cohérence temporelle et spatiale afin de compléter l'analyse précédente. En raison du nombre trop faible de mesures in-situ en début de période (cf chapitre 2.2.), les comparaisons altimétrie / in-situ sont réalisées à partir de juillet 2004.

4.1. Analyses des moyennes des différences de SLA

4.1.1. Utilisation des hauteurs dynamiques sur toute la colonne d'eau

Tel que précisé dans la partie 3, nous choisissons de comparer les deux sources de données en terme de SLA concernant toute la colonne d'eau. Ce sont donc les anomalies de hauteurs dynamiques stériques issues des mesures in-situ qui sont extrapolées sur la verticale, puis comparées à la SLA altimétrique totale.

La figure 8 révèle que la différence entre SLA altimétrique et in-situ présente des signaux similaires (contenu spectral similaire) selon que l'on considère toute la colonne d'eau ou que la partie stérique telle que vue par les profileurs mais avec des amplitudes différentes (le lien entre toute la colonne d'eau et sa partie stérique est assurée par la grille de coefficients de régression). Cette différence d'amplitude est non seulement due au fait que la référence des profils T/S à 900m ne permet pas nécessairement d'échantillonner entièrement le contenu stérique de la colonne d'eau, mais surtout au fait que le signal mesuré par les profileurs ne contienne pas l'information liée au champ de masse (contenu barotrope), ce que permet de voir l'altimétrie.

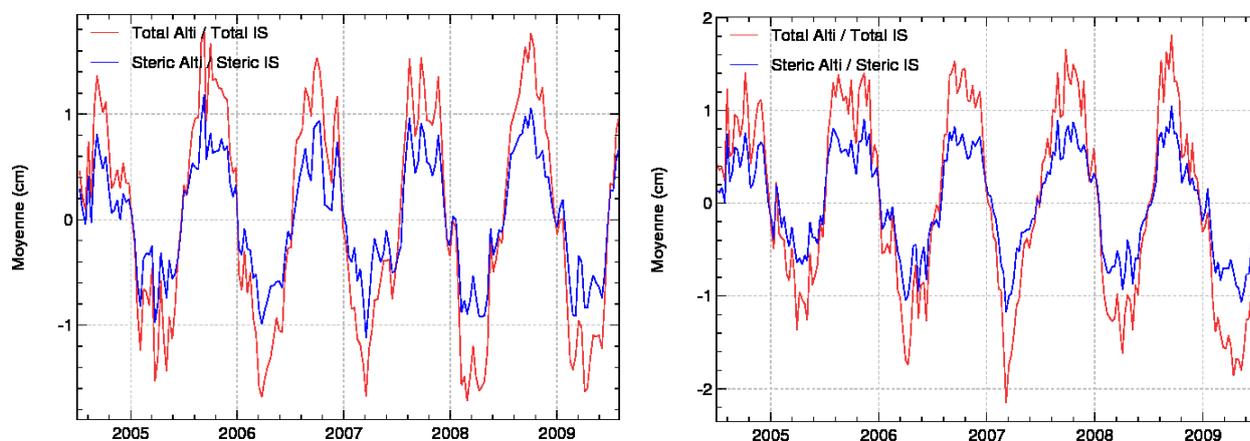


Figure 8: *Différence entre SLA altimétrique et in-situ sur toute la colonne d'eau et pour la partie stérique pour les missions Jason-1 (à gauche) et Envisat (à droite).*

Tel que mentionné dans la partie 3, la méthode d'estimation des coefficients de régression permettant la relation entre les signaux stérique et barotrope est perfectible. Néanmoins, une meilleure estimation de ces coefficients ne modifierait pas la différence d'amplitude observée entre les courbes de la figure 8 car il subsistera toujours une différence liée au champ de masse.

4.1.2. Analyse du signal annuel par mission et par hémisphère

Le suivi temporel de la différence entre la SLA altimétrique totale et in-situ totale (figure 9 en bas) révèle un fort signal annuel d'amplitude atteignant 3 cm quelque soit la mission altimétrique considérée. On remarque sur la figure 8 du paragraphe précédent que l'utilisation de la grille de coefficients de régression pour passer du signal stérique au signal barotrope n'a pas d'impact sur l'existence ou non du signal annuel observé sur les différences de hauteurs. Cette différence entre la hauteur de toute la colonne d'eau (altimétrie) et de la partie stérique (profils T/S) extrapolée sur la verticale présente un minimum au printemps et un maximum en automne, de même que le suivi de la composante non stérique de l'océan (champ de masse) (cf. Leuliette & Miller, 2009 [7]).

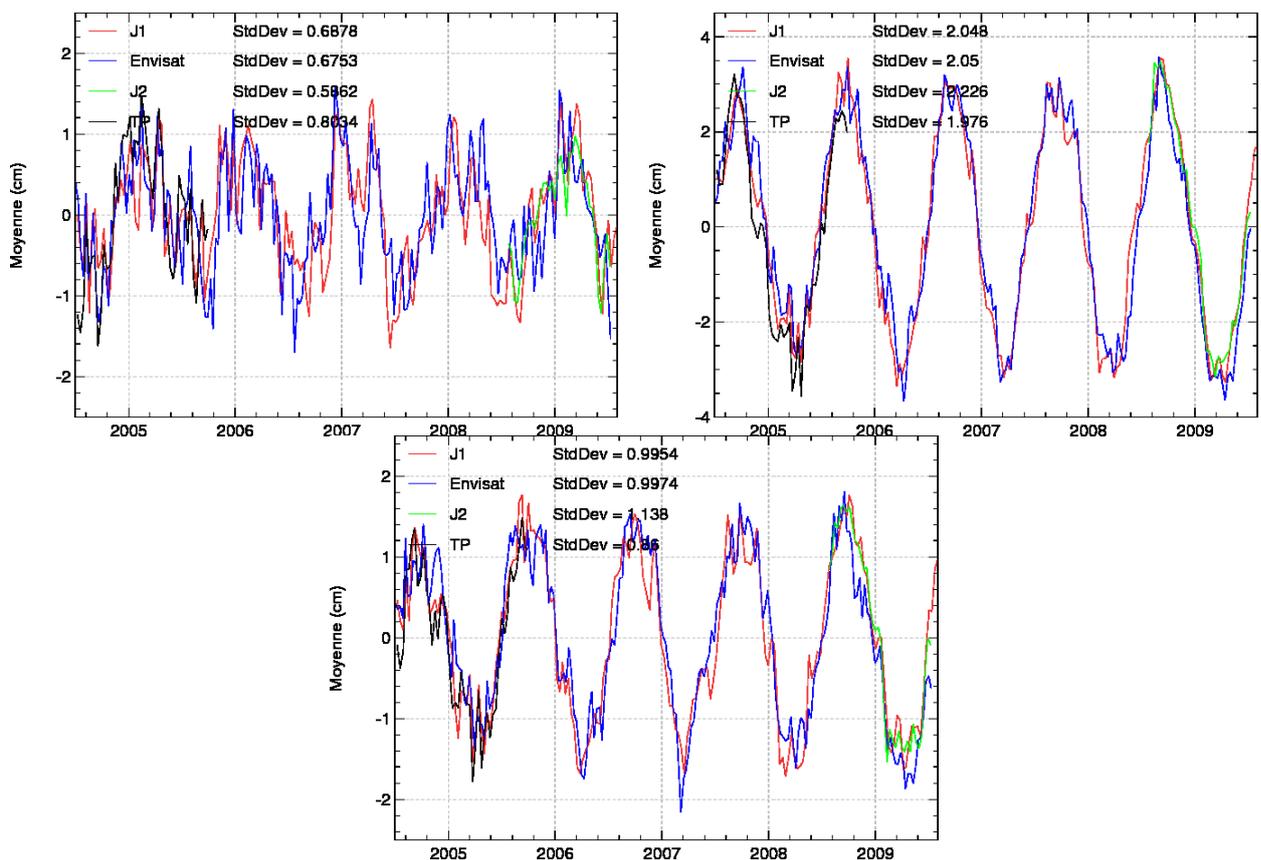


Figure 9: Différence de SLA altimétrique totale et in-situ totale pour les missions Jason-1 et 2, Envisat et Topex-Poseidon. Sur le domaine global (en bas), l'hémisphère nord (à gauche) et l'hémisphère sud (à droite).

L'existence de ce signal est liée au fait que:

- Les profils T/S référencés à 900m ne permettent pas nécessairement d'échantillonner complètement le contenu stérique de la colonne d'eau (variations du champ de densité plus en profondeur)

et les mesures in-situ ne *captent* donc pas entièrement le signal annuel stérique. Cette contribution à l'erreur est néanmoins considérée comme faible.

- Les mesures in-situ ne voient que le signal lié au changement de densité mais ne sont pas sensibles aux variations du champ de masse (ie variations non stériques du niveau de la mer) qui sont prises en compte par l'altimétrie. Différentes études (Chen et al. 1998 [1]; Leuliette & Miller 2009 [7]) montrent que ces variations non stériques du niveau de la mer présentent un cycle annuel. Or les coefficients de régression utilisés dans notre étude pour extrapoler les DHA à toute la colonne d'eau ne permettent pas de prendre en compte ce cycle annuel. Il reste donc un signal annuel résiduel dans le suivi temporel des différences entre SLA altimétrique et hauteurs stériques in-situ.

En distinguant les contributions de ce signal annuel liées aux hémisphères nord et sud (figure 9 à gauche et à droite) on observe une contribution majoritaire de l'hémisphère austral où l'amplitude du signal atteint 6 cm et est en phase avec celui dans l'océan global. A noter que le signal restreint à l'hémisphère nord est beaucoup plus bruité, en opposition de phase (due à la redistribution inter hémisphérique du champ de masse au sein du cycle hydrologique global) et avec une amplitude plus faible de 3 cm. L'amplitude plus grande dans l'hémisphère sud pourrait être liée au fait que le coefficient de régression y est en moyenne plus faible (cf figure 4) ie que la différence entre le signal mesuré par l'altimétrie et par les profileurs est la plus forte. La forte variabilité océanique et la plus faible densité de mesures dans ces zones contribuent également à cette différence. La différence entre altimétrie et mesure in-situ est donc susceptible d'introduire un signal annuel plus fort que dans l'hémisphère nord. La restriction de ces diagnostics aux zones de forts coefficients de régression permettrait de préciser cette hypothèse.

4.1.3. Impact de l'échantillonnage spatio-temporel

Les produits grillés SSALTO / DUACS multimissions (*PVA*) sont calés sur les missions de référence qu'ont été successivement Topex-Poséidon, Jason-1 et Jason-2. Ces produits (temps différé) sont disponibles jusqu'en février 2009 et leur résolution spatio-temporelle est plus élevée ($1/3^\circ$ à 7 jours) que les données mono-mission. Leur utilisation permet de réduire l'erreur de la méthode de colocalisation avec les données in-situ et donc de quantifier l'amélioration de la cohérence aux mesures in-situ par rapport à des données altimétriques mono-mission.

La figure 10 permet d'évaluer l'impact de l'utilisation de ces produits sur la moyenne des différences de SLA altimétrique / in-situ en comparant les résultats avec ceux de la mission Jason-1. Les données non filtrées (points bleus et noirs) ont des distributions homogènes et les séries présentent des écart-types similaires (0.33 cm pour J1 et 0.34 cm pour les PVA). Une différence de pente de 0.93 mm/an apparaît entre les deux suivis.

Afin d'estimer l'amélioration de la cohérence aux mesures in-situ, la figure 11 montre le suivi de la différence de variance des différences de SLA entre les PVA et la mission Jason-1. Soit le calcul de:

$$\Delta VAR(SLA)_{Alti} = VAR(SLA_{PVA} - SLA_{TS}) - VAR(SLA_{J1} - SLA_{TS})$$

Les valeurs négatives indiquent que les produits *PVA* sont plus cohérents avec les mesures in-situ que les mesures Jason-1, ce qui est le cas sur toute la période étudiée avec une moyenne très élevée de 31.6 cm². Les *PVA* étant calés sur la mission Jason-1, les erreurs de colocalisation aux mesures

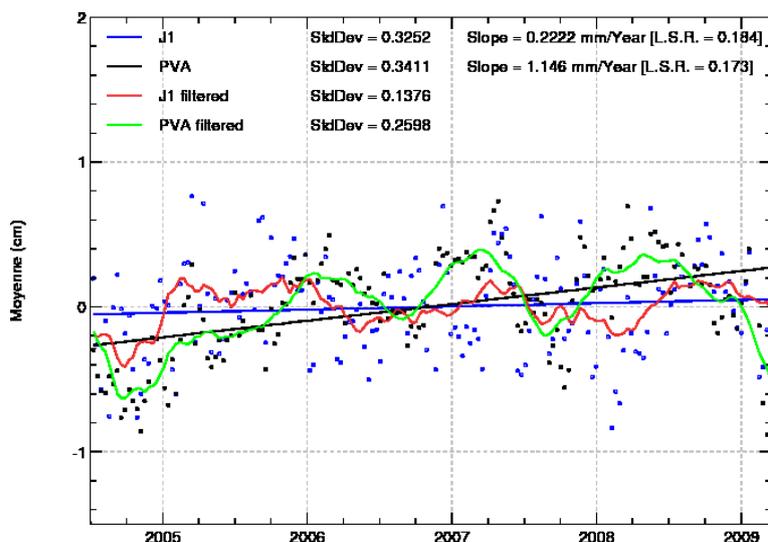


Figure 10: *Différence de SLA altimétrique totale et in-situ totale pour les missions Jason-1 et PVA avec soustraction des signaux annuels et semi-annuels issus de la mission Jason-1. Les pentes associées aux nuages de points sont indiquées ainsi que les signaux filtrés à 130 jours.*

in-situ s'annulent entre elles lors de la comparaison. L'apport d'informations provenant de plusieurs altimètres et la résolution spatio-temporelle meilleure expliquent l'amélioration très importante de la cohérence aux mesures in-situ.

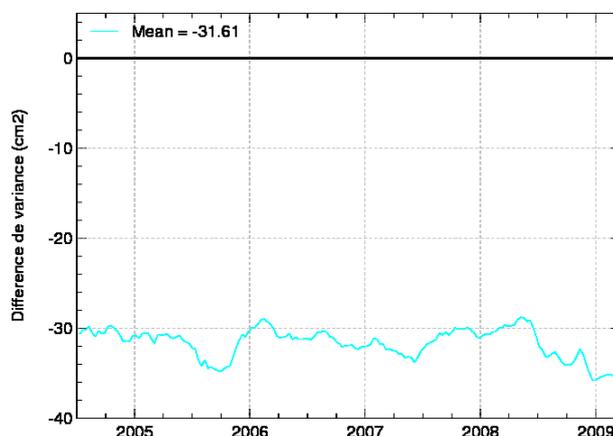


Figure 11: *Différences des variances (carrés des écart-types filtrés à 130 jours) PVA / Jason-1 des différences entre SLA altimétrique totale et SLA in-situ totale.*

La distribution spatiale du gain en variance est présentée sur la figure 12 (à gauche). Des valeurs négatives sont trouvées sur tout l'océan avec des différences de variances dépassant 40 cm^2 en faveur des PVA. Ces très fortes valeurs sont trouvées dans les zones de forte variabilité océanique, tel que montré sur la carte de droite (restriction aux zones de variabilité $\leq 50 \text{ cm}^2$). Cela s'explique par le fait que dans notre méthode, l'erreur de colocalisation des données altimétriques et in-situ est plus élevée dans ces régions à cause des changements rapides qui ont lieu dans ces parties de l'océan. Or, la meilleure résolution spatio-temporelle des PVA comparée à celle des données mono-mission

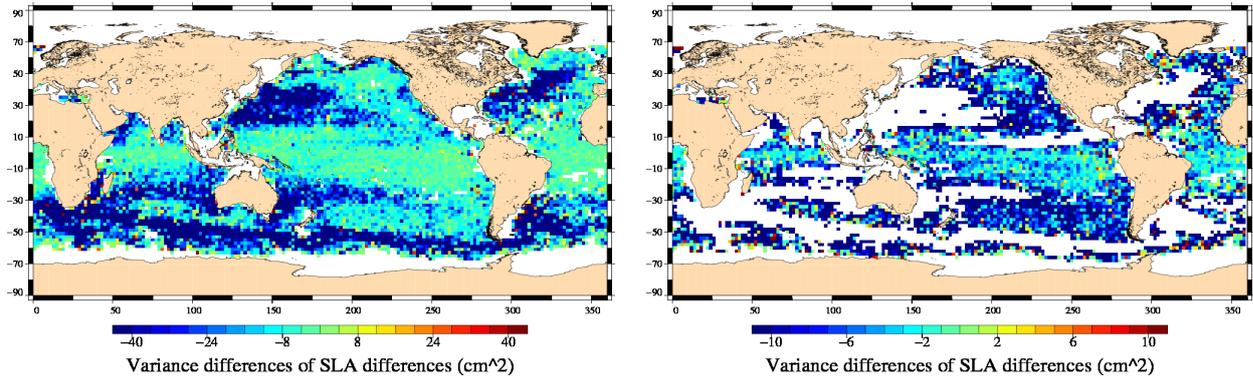


Figure 12: *Différence des cartes de variance des différences de SLA altimétrique totale et in-situ totale entre les PVA et Jason-1 en global (à gauche) et restreinte aux régions de variabilité océanique (énergie cinétique) < 50 cm².*

permet justement de réduire cette erreur de colocalisation, ce qui explique la forte amélioration de la cohérence des données dans ces zones.

Notre méthode de comparaison de l'altimétrie aux profils in-situ sera donc un moyen pertinent et efficace pour quantifier l'amélioration apportée avec les nouveaux produits PVA qui seront diffusés début 2010.

4.1.4. Analyses temporelles inter missions

Le suivi des différences entre les SLA altimétriques totales et in-situ totales (DHA) a déjà été montré sur la figure 9 (en bas) pour les quatre missions altimétriques TOPEX/Poseidon, Jason-1, Envisat ¹ et Jason-2. Afin de mieux détecter d'éventuels biais ou dérive, les graphiques de la figure 13 présentent les mêmes suivis après soustraction sur le signal de la différence des signaux annuels et semi-annuels issus de la mission Jason-1 ².

Les périodes temporelles considérées pour Topex/Poséidon (1.3 an) et Jason-2 (1 an) sont trop courtes pour pouvoir calculer des tendances statistiquement significatives et seules les pentes associées aux séries Jason-1 et Envisat sont indiquées. Les erreurs formelles associées (toutes deux de 0.16) sont des erreurs mathématiques décrivant le bruit de mesure autour de la droite. Ces erreurs sont déterminées sans connaissance a priori des erreurs *physiques* associées aux signaux, ie sans connaissance de l'auto corrélation temporelle des signaux.

Les quatre séries temporelles ont des écart-types similaires variant entre 0.32 cm et 0.37 cm. Les différences de SLA associées aux missions Topex-Poséidon et Jason-2 sont très proches des estimations issues de Jason-1. Cela corrobore les résultats de type Cal/Val. Concernant la mission Envisat (figure 13, à droite), les différences de SLA ont une amplitude du même ordre de grandeur que celles associées aux trois autres missions.

La figure 14 (à gauche) présente les courbes filtrées associées à Jason-1 et Envisat visibles sur les deux graphes de la figure 13. Une différence de pente de 0.55 mm/an est observée entre les deux missions. Néanmoins, les pentes associées à ces deux séries temporelles deviennent très proches

¹mission Envisat avec un sous-cycle à 10 jours afin d'avoir des statistiques comparables

²les résultats sont similaires en retranchant les signaux annuels et semi-annuels estimés à partir de plusieurs missions

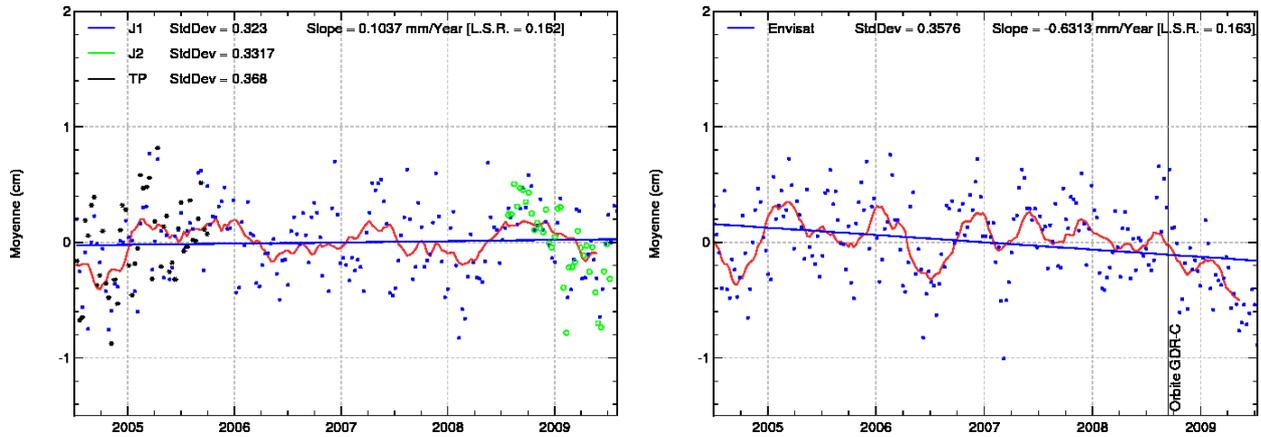


Figure 13: *A gauche: différence de SLA altimétrique totale et in-situ totale pour les missions Jason - 1, Jason - 2 et Topex-Poséidon avec soustraction des signaux annuels et semi-annuels issus de la mission J1. Pour cette dernière mission, la pente associée au nuage de points est indiquée ainsi que le signal filtré à 130 jours (courbe rouge). A droite: idem pour la mission Envisat avec la date du changement d'orbite GDR-B / GDR-C indiqué.*

(0.16 mm/an et 0.08 mm/an respectivement) lorsqu'on restreint la période d'étude à mi 2008 tel que montré sur la figure 14 (à droite). A noter que la série temporelle associée à la mission Envisat originale à 35 jours présente la même évolution récente. Une bonne cohérence apparaît donc entre les données des deux missions, excepté à partir de mi 2008 où une différence apparaît.

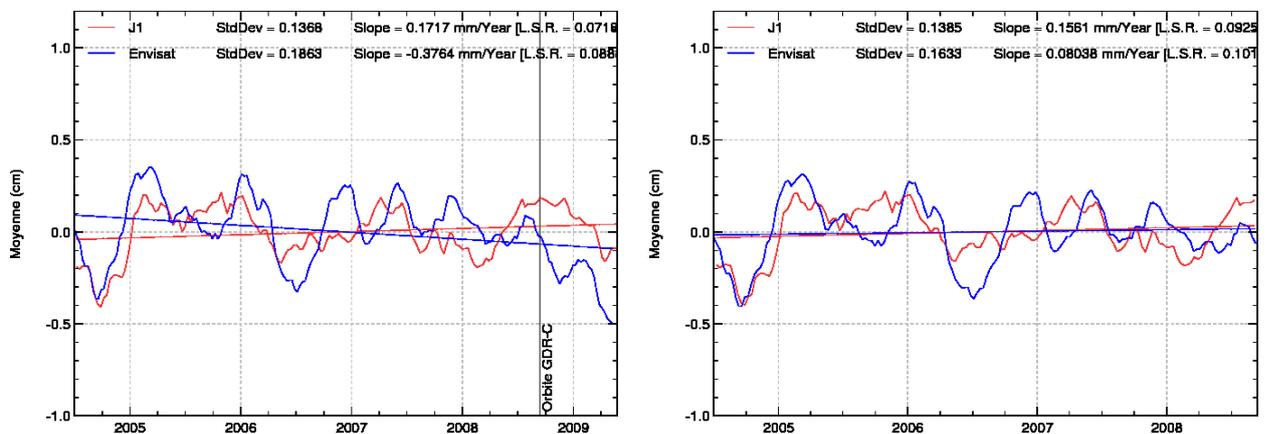


Figure 14: *Différence de SLA altimétrique totale et in-situ totale pour les missions Jason-1 et Envisat avec suppression des signaux annuels et semi-annuels issus de la mission J1 et filtrage à 130 jours (à gauche) et restriction jusqu'en août 2008 (à droite).*

Ces résultats sont en accord avec ceux issus des études de type CalVal. En effet, des travaux en cours sur la comparaison des suivis du niveau moyen des mers (MSL) avec les missions Jason-1 et Envisat révèle également une différence d'évolution à partir des cycles Envisat 69-72. A cette période a eu lieu un changement de standard (orbite) qui s'est effectué en deux temps: passage de l'orbite GDR-B à GDR-C au cycle 69 et passage de l'orbite GDR-C à GDR-C' au cycle 72. Il semblerait que ce changement d'orbite soit à l'origine de l'évolution observée dans la comparaison

aux mesures in-situ. Des investigations Cal/Val sont en cours pour déterminer si seul ce changement d'orbite est à l'origine de l'évolution observée et dans quelle mesure l'introduction de biais régionaux dans le calcul de la SLA altimétrique permet de compenser le saut observé (cf. bilan annuel Envisat, [8]). Ces résultats confirment l'utilité de la comparaison de l'altimétrie à des mesures externes indépendantes pour détecter des anomalies.

4.1.5. Analyses spatiales

Différentes études ont déjà montré la présence de biais de SSH géographiquement corrélés significatifs pour les missions altimétriques. Ces biais ont été détectés grâce à la comparaison des missions altimétriques, en particulier pendant la phase de vérification de la mission Jason-1 en 2003 et de la mission Jason-2 en 2008. L'amélioration des standards altimétriques a également permis d'homogénéiser les missions altimétriques entre elles. Pour autant, cela ne signifie pas que des biais de SSH systématiques plus importants ne soient pas présents. Deux systèmes altimétriques peuvent voir les mêmes erreurs, surtout si ces biais sont dûs au calcul d'orbite. L'utilisation de mesures in-situ telles que les profils T/S constituent donc une source de données externes indépendantes qui peut permettre de détecter ces biais.

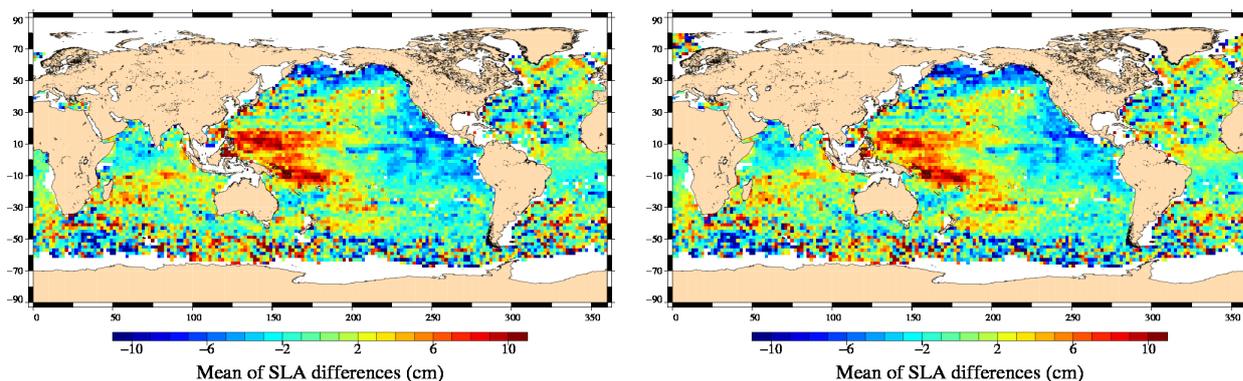


Figure 15: Cartographie de la moyenne des différences de la SLA altimétrique totale / SLA in-situ totale pour Jason-1 (à gauche) et Envisat (à droite).

La cartographie de la moyenne des différences de SLA altimétrique totale et in-situ totale a donc été réalisée sur la période étudiée pour Jason-1 et Envisat (figure 15) après avoir centré les cartes sur la moyenne des différences. Les deux missions présentent des distributions similaires avec des différences à l'échelle globale variant entre ± 10 cm. Un biais d'un tel ordre de grandeur est notamment observé avec les deux missions entre le Pacifique équatorial est et ouest. Des résultats similaires avaient été relevés lors des études réalisées en 2008, sans que d'investigations supplémentaires n'aient pu être menées.

La méthode de comparaison des données explique en partie ce biais. En effet, les anomalies de niveau de la mer issues de l'altimétrie sont calculées en retranchant à la SSH la surface moyenne océanique (MSS) CLS01 déterminée entre 1993 et 1999 (7 ans) alors que les anomalies de hauteurs dynamiques issues des profils T/S sont référencées à la hauteur dynamique moyenne vue par les profileurs entre 2003 et 2007 (5 ans). Afin de rapporter les deux calculs à une période de référence commune, les hauteurs altimétriques Jason-1 ont été moyennées sur cette dernière période puis

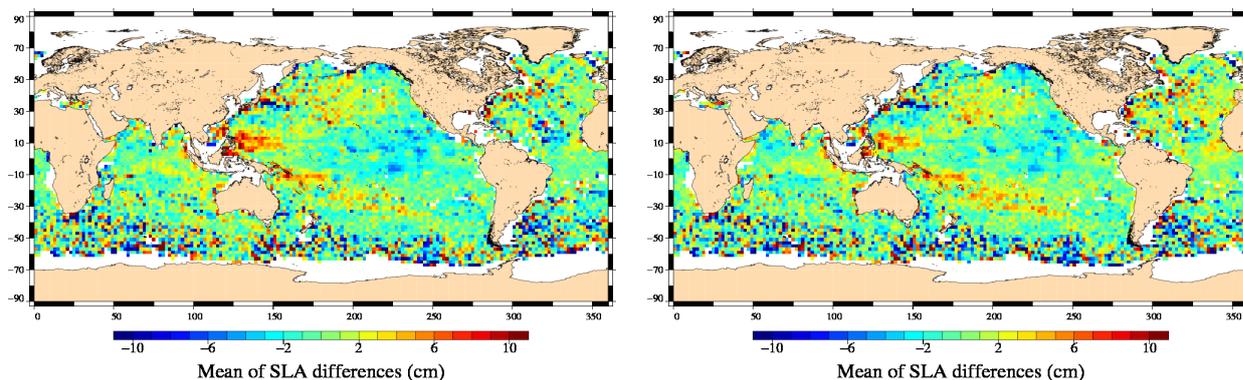


Figure 16: Cartographie de la moyenne des différences de la SLA altimétrique totale / SLA in-situ totale pour Jason-1 (à gauche) et Envisat (à droite) en référençant les anomalies à une période temporelle commune.

utilisées comme référence aux SLA altimétriques. Les résultats sont présentées sur les cartes de la figure 16 qui sont les mêmes que sur la figure 15 mais avec une référence prise sur la même période temporelle. Le signal observé précédemment est très fortement atténué pour les deux missions mais on trouve encore des biais résiduels dans les trois bassins Atlantique, Pacifique et Indien et notamment entre Pacifique ouest et est. Plusieurs facteurs peuvent les expliquer:

- Une réelle erreur systématique liée aux altimètres peut résider, mais étant donnée la distribution spatiale de ces biais, il semble qu'il reste encore un signal physique (notamment dans les zones équatoriales). Cela peut être lié à la référence temporelle commune utilisée qui pourrait être améliorée notamment en prenant une référence multi missions.
- La grille de coefficients de régression établissant la relation entre les parties stérique et totale de la colonne d'eau peut prendre en compte une partie de ces biais. En effet ces coefficients peuvent être erronés dans certaines zones et / ou la relation linéaire entre la SLA totale et stérique peut ne pas suffire pour bien modéliser le passage de l'une à l'autre des SLA. Ces coefficients de régression seraient améliorés en les calculant avec les mêmes standards altimétriques et sur la même période altimétrique que ceux utilisés ici.

Par ailleurs, alors que les standards utilisés pour la série Jason-1 sont homogènes (GDR-C), ce n'est pas le cas pour la série de données de Envisat, ce qui peut dégrader la précision de ce type d'analyse. Néanmoins, les biais avaient été observés en 2008 avec les GDR B de Jason-1 (cf bilan annuel 2008 [9]) et sont toujours visibles aujourd'hui avec les GDR C. L'utilisation de la version GDR C des produits Envisat sur toute la période devrait permettre à l'avenir de disposer de séries de données homogènes et de préciser cette analyse.

La différence entre les deux cartes de la figure 16 montre finalement le biais de la SLA entre Jason-1 et Envisat colocalisé aux profils T/S (figure 17) et en utilisant une référence temporelle commune pour le calcul des anomalies. Cette carte est équivalente aux résultats de l'intercalibration réalisée entre ces deux missions dans les chaînes Cal/Val mais avec une colocalisation des données aux mesures in-situ. On retrouve un biais est / ouest dans le Pacifique de ± 2 cm déjà observé dans des études globales. Un biais de -2 cm est également visible dans l'Atlantique nord subtropical. Ces biais sont en partie expliqués par les différences de traitement entre les deux missions et notamment

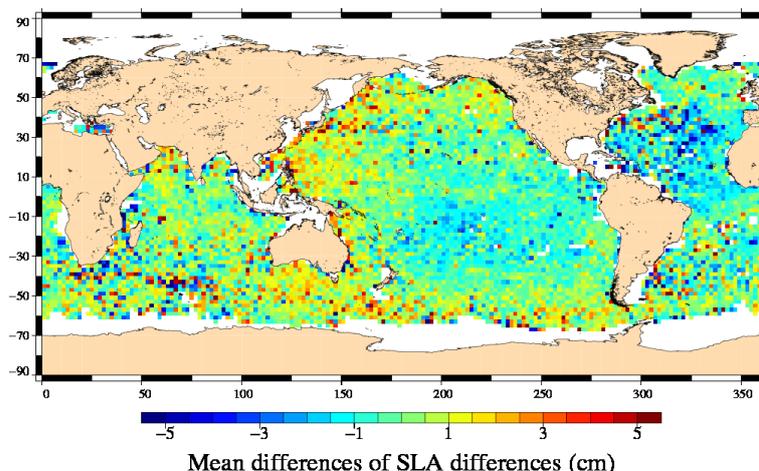


Figure 17: *Différence Jason-1 / Envisat sur les différences entre SLA altimétrique totale et SLA in-situ totale en référant les anomalies à une période temporelle commune.*

les versions différentes des produits GDR utilisés pour Envisat.

4.2. Analyses des variances des différences de SLA

4.2.1. Analyses temporelles

La figure 18 (à gauche) présente les suivis des écart-types des différences de SLA altimétrique totale / in-situ totale pour les missions Jason-1 et 2 et Topex-Poséidon.

Les valeurs associées aux missions Jason-1 & 2 et T/P apparaissent homogènes aux autres, ce qui corrobore les analyses de type Cal/Val. Le même suivi est présenté pour EnviSat sur le graphique de droite. Les moyennes des écart-types de Jason-1 et Envisat sont très proches sur les 5 ans étudiés (8.24 cm et 8.25 cm respectivement). Les séries temporelles filtrées à 130 jours sont présentées pour ces deux missions sur le graphique du bas. La valeur de ces écart-types de différence de SLA diminue jusqu'en 2008, en lien avec l'augmentation de la couverture spatiale et temporelle des profils in-situ T/S au cours de cette période. En revanche, les valeurs augmentent à partir de mi 2008 de 8.0 cm à plus de 8.6 cm. Or l'écart-type de la SLA altimétrique seule est relativement constant sur la fin de la période pour les deux missions alors que l'écart-type de la SLA in-situ présente une augmentation (~ 1 cm) (non montrés). L'augmentation observée en fin de période sur la figure 18 (en bas) serait donc due à l'augmentation de la variabilité des mesures in-situ mais celle-ci n'est pas expliquée à ce jour. L'évènement La Nina de 2008 pourrait jouer un rôle dans cette variation. Une évolution dans le traitement des données n'est pas à exclure et est à vérifier. Une autre hypothèse est que les anomalies de hauteur dynamique issues des profils T/S sont calculées avec une référence sur la période 2003-2007. Les données plus récentes sont susceptibles de se trouver en dehors de cette moyenne et de faire augmenter l'écart-type tel qu'observé. Une adaptation de la période de référence utilisée permettrait de valider cette hypothèse.

De plus, les coefficients de régression assurant la relation entre les SLA altimétrique et in-situ ont été déterminés avec des mesures altimétriques sur une période durant laquelle celles-ci étaient bi-

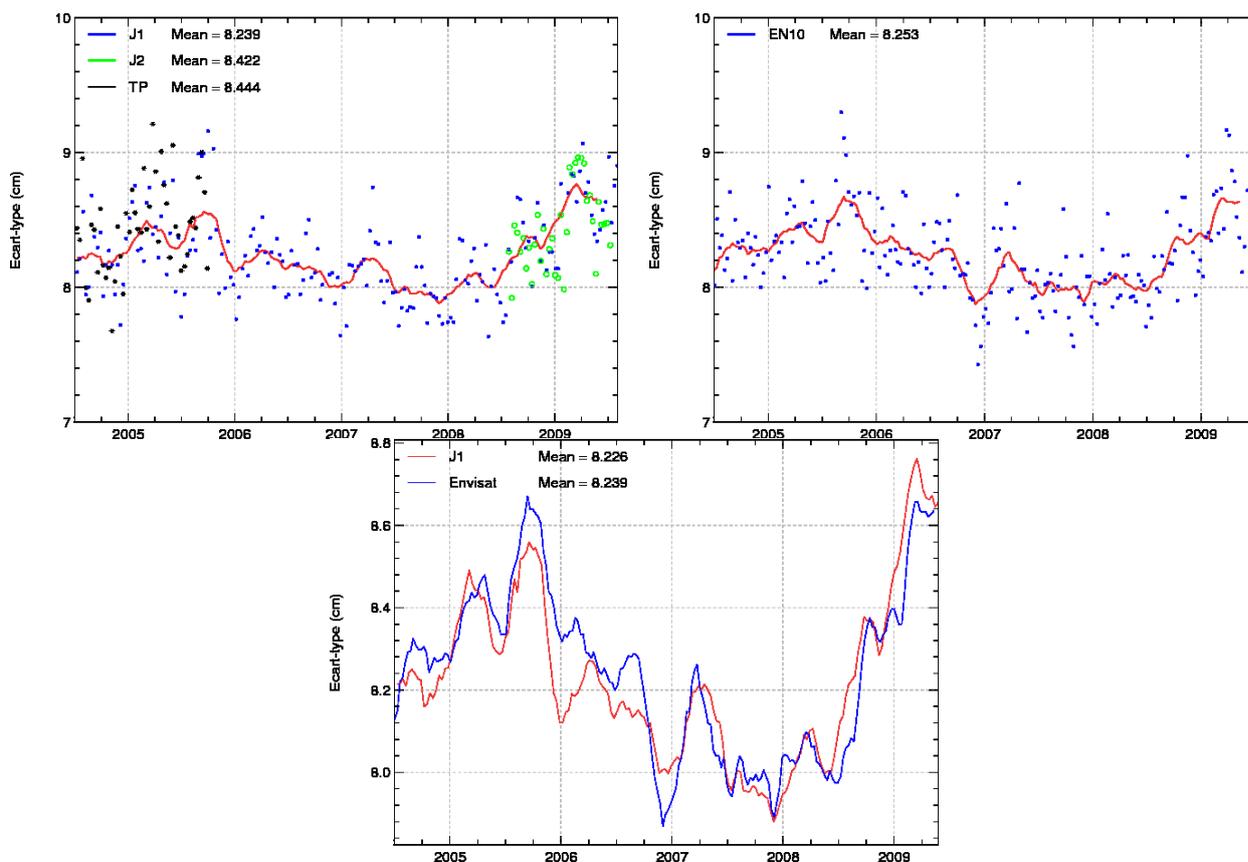


Figure 18: *A gauche: écart-types de la différence entre SLA altimétrique totale et SLA in-situ totale pour les missions Jason - 1, Jason - 2 et Topex-Poséidon. Le signal filtré à 130 jours est indiqué pour Jason-1 (courbe rouge). A droite: idem pour la mission Envisat. Les deux courbes des signaux filtrés sont superposées en bas.*

aisées par rapport à la MSS d'une valeur connue. Or ces coefficients sont utilisés dans cette étude avec des mesures altimétriques biaisées par rapport à la MSS d'une valeur différente (car la période est différente). Cette inadéquation entre la période où les coefficients de régression sont calculés et celle où ils sont utilisés est susceptible d'avoir un impact lors du calcul de la variance des différences de SLA altimétrique et in-situ. Cet impact est estimé relativement faible mais il peut influencer l'allure des courbes de la figure 18 (en bas).

Par ailleurs depuis le cycle 260 (02-2009), Jason-1 a changé d'orbite pour se placer sur son inter-trace. La MSS retranchée pour le calcul de la SLA est de moins bonne qualité sur cette inter-trace (car moins de données étaient disponibles pour sa détermination). Cela serait susceptible d'entraîner un saut de l'écart-type des différences de SLA à cette date mais cela n'est pas observé (figure 18, à gauche et en bas). Cela pourrait être dû au fait qu'avant la colocalisation avec les mesures in-situ, les données altimétriques sont moyennées par boîtes ($1^\circ \times 3^\circ$), ce qui lisse l'effet du changement d'orbite. A noter que ce saut est observé pour Jason-1 dans la comparaison aux mesures marégraphiques (cf. bilan annuel Calamar, [11]) car l'altimétrie est dans ce cas colocalisée aux marégraphes sans aucun lissage.

Afin d'estimer laquelle des deux missions Jason-1 et Envisat est plus cohérente aux mesures in-situ,

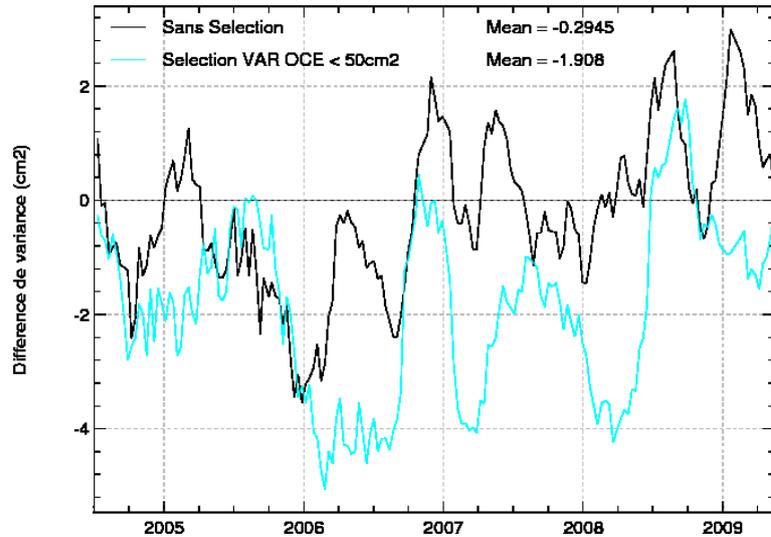


Figure 19: Différence des variances (carrés des écarts-type filtrés à 130 jours) Jason-1 / Envisat des différences entre SLA altimétrique totale et SLA in-situ totale en global (cf figure 18 en bas) et restreinte aux régions de variabilité océanique (énergie cinétique) $< 50 \text{ cm}^2$.

nous présentons sur la figure 19 la différence J1 / EN des variances des différences de SLA (courbe noire). Il s'agit du suivi temporel de la variance spatiale moyennée par cycles de 10 jours. La moyenne de -0.3 cm^2 sur la période considérée suggère que les deux missions sont aussi proches des mesures in-situ. En revanche, la fiabilité de la méthode de comparaison des données est plus faible dans les zones de forte variabilité océanique et afin de ne pas dégrader le signal par les résultats dans ces régions, la courbe bleu clair sur la même figure présente le même suivi temporel mais restreint aux zones de faible variabilité océanique ($\leq 50 \text{ cm}^2$). La valeur moyenne de -1.9 cm^2 suggère que les données Jason-1 sont plus cohérentes avec les mesures in-situ que les données Envisat sur la période de 5 ans étudiée. Néanmoins, une incertitude assez importante demeure sur ce type de diagnostic et il faut noter qu'il s'agit de l'évolution temporelle de la variance spatiale et non la moyenne spatiale de suivis de variance (cf. paragraphe suivant).

4.2.2. Analyses spatiales

La figure 20 présente les cartes de variance des différences de SLA altimétrique totale / in-situ totale pour les 2 missions Jason-1 et Envisat. Les distributions spatiales sont très similaires pour les deux missions et les fortes valeurs ($> 50 \text{ cm}^2$) apparaissent dans les zones de forte variabilité océanique (Gulf Stream, Kurushio, Courant des Aiguilles et courant circumpolaire). Ceci est à mettre directement en relation avec l'erreur de la méthode pour colocaliser les données altimétriques avec les mesures in-situ, qui est dépendante de la variabilité océanique. Les fortes valeurs trouvées dans le cas d'Envisat entre Islande et Norvège pourraient être liées aux faibles valeurs du coefficient de régression dans cette zone (et donc aux fortes différences entre les signaux mesurés par l'altimétrie et par les mesures in-situ).

Afin de préciser laquelle des deux missions est plus cohérente avec les mesures in-situ et donc a priori de meilleure qualité, nous présentons sur la figure 21 (à gauche) la différence de variance obtenue entre les deux premières cartes (Jason-1 - Envisat), soit:

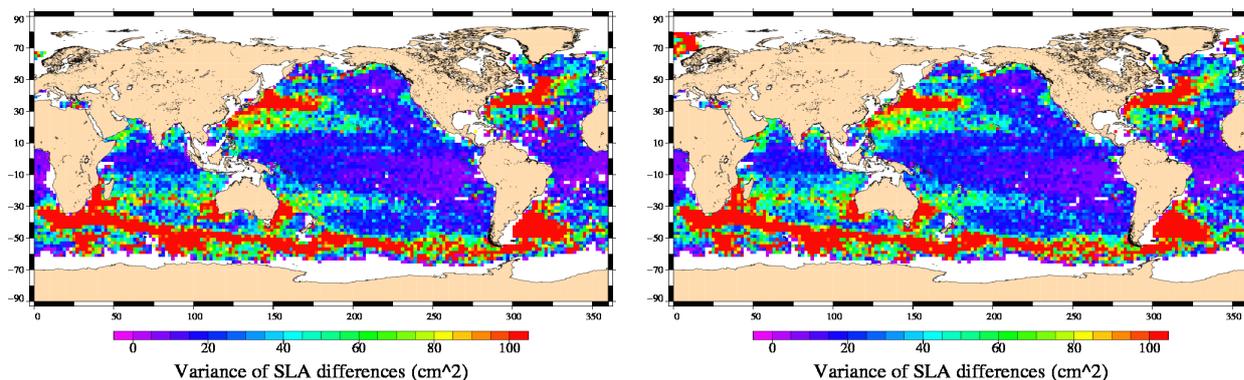


Figure 20: Cartographie de la variance des différences de la SLA altimétrique totale / SLA in-situ totale. A gauche: Jason-1, à droite: Envisat.

$$\Delta VAR(SLA)_{Alti} = VAR(SLA_{J1} - SLA_{TS}) - VAR(SLA_{EN} - SLA_{TS})$$

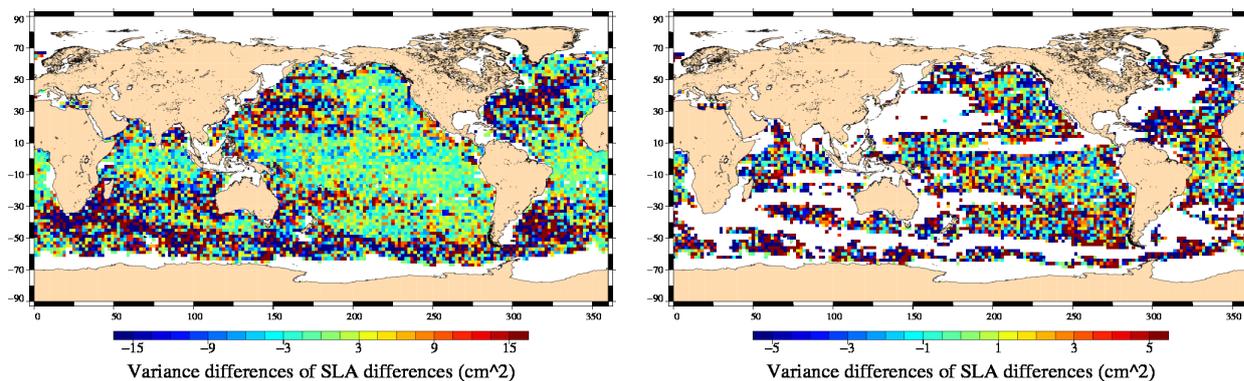


Figure 21: Différence des 2 cartes de variance précédentes entre Jason-1 et Envisat en global (à gauche) et restreinte aux régions de variabilité océanique (énergie cinétique) < 50 cm².

Les valeurs négatives indiquent que les mesures Jason-1 sont plus cohérentes avec les mesures in-situ que les mesures Envisat. Il s'agit de la moyenne des séries temporelles de variance en chaque point de la carte ³. On constate en premier lieu qu'un fort signal aléatoire domine dans les zones de forte variabilité océanique. Afin de s'affranchir des erreurs de colocalisation des données dans ces régions, le même signal restreint aux régions de faible variabilité est présenté sur la carte de droite avec une dynamique plus fine. Une très légère domination de valeurs négatives apparaît mais il est difficile de ressortir la meilleure cohérence d'une mission ou d'une autre. A noter que les erreurs de colocalisation des mesures associées à chacune des missions s'ajoutent dans ce calcul. La différence d'échantillonnage spatio-temporel entre les deux missions contribue à voir des erreurs de colocalisation différentes, augmentant donc les différences de variance et limitant la détection d'une meilleure cohérence pour l'une ou l'autre des missions. En revanche, si on utilise ce même diagnostic

³ce qui n'est donc pas comparable avec le suivi présenté sur la figure 19 qui est le suivi temporel de la variance spatiale moyennée par cycle de 10 jours

pour une même mission mais avec des standards altimétriques différents, l'erreur de colocalisation n'intervient plus, permettant d'accorder plus de confiance dans les différences de variance observées.

5. Évaluation des nouveaux standards altimétriques

5.1. Vue d'ensemble

Un des objectifs de la méthode de comparaison altimétrie / profils T/S concerne l'estimation de l'amélioration des données altimétriques à partir des mesures in-situ. Cette partie vise à démontrer la capacité de la méthode de comparaison à mesurer l'impact de nouveaux standards altimétriques comme de nouvelles corrections géophysiques, de nouvelles orbites ou de nouveaux algorithmes dans les traitements sols. Le principe de la méthode, comparable à celui développé dans le cadre de l'activité de validation des données altimétriques par comparaison aux mesures marégraphiques, repose sur l'analyse de la cohérence entre les hauteurs in-situ et altimétrique en utilisant successivement les nouveaux et les anciens standards, soit le calcul:

$$\Delta VAR(SLA)_{Alti} = VAR(SLA_{Alti(NewStandards)} - SLA_{TS}) - VAR(SLA_{Alti(OldStandards)} - SLA_{TS})$$

Des valeurs négatives de $\Delta VAR(SLA)_{Alti}$ indiquent que les nouveaux standards améliorent le calcul de la SSH. Cette statistique est suivie temporellement afin de détecter les changements apportés par ces nouveaux standards. La distribution spatiale de la différence de variance est également étudiée ainsi que l'histogramme de cette statistique par flotteur profileur.

Dans la continuité des analyses menées en 2008, nous utilisons les données in-situ T/S pour tester la performance de la nouvelle orbite des produits GDR-C disponible pour la mission Jason-1 mais également aujourd'hui pour la mission Envisat.

5.2. Application à la comparaison des orbites GDR-C/GDR-B

L'orbite GDR-C est de type SLR/DORIS/GPS comme celle des GDR-B mais utilisant le nouveau modèle de champ de gravité EIGEN-GL04C (remplaçant EIGEN-CG03C), qui prend en compte des variations temporelles (annuelle et semi-annuelle) sans dérive, la contribution atmosphérique du champ de gravité et les effets de marée polaire. De plus, le système de référence utilisé est l'ITRF2005.

5.2.1. Suivis par cycle de $\Delta VAR(SLA)_{Alti}$

La figure 22 présente le suivi par cycle de la différence de variance avec successivement les orbites GDR-B et GDR-C. La moyenne de ces différences est de $-0.3cm^2$ pour Jason-1 et $-0.1cm^2$ pour Envisat, indiquant une faible amélioration en moyenne de la cohérence entre mesures altimétriques et in-situ avec l'orbite GDR-C. Les valeurs moyennes diffèrent légèrement entre les deux missions mais pour cette étude, l'erreur d'orbite POE GDR-C a été prise en compte dans le calcul de la SLA altimétrique pour Envisat alors que ce n'est pas le cas pour Jason-1. Ces diagnostics devront donc être générés à nouveau en prenant en compte des calculs homogènes de la SLA altimétrique.

De plus, un signal annuel est observé pour les deux missions avec une amplitude dépassant 1

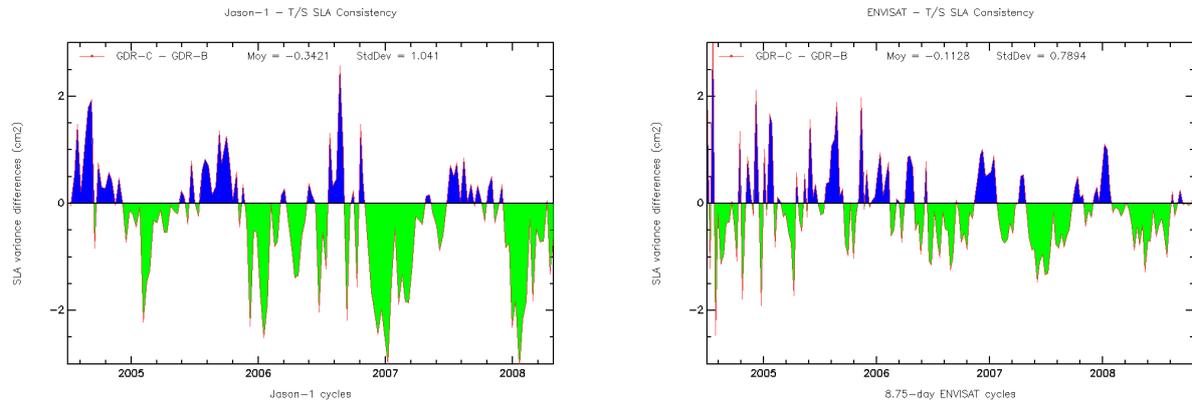


Figure 22: *Suivis par cycle de $\Delta VAR(SLA)_{Alti}$ avec l'orbite GDR-C et GDR-B pour Jason-1 (à gauche) et Envisat (à droite).*

cm^2 , indiquant une amélioration de la cohérence entre les deux types de mesures avec les GDR-C mais aussi ponctuellement une détérioration. Ce signal est également visible lors des comparaisons GDR-B / GDR-C dans les analyses de type CalVal (cf. bilan des retraitements GDR-C Jason-1, [3]; poster en annexe 8.3., [2]; et bilan annuel Envisat, [8]) mais aussi lors de la comparaison des mesures altimétriques aux mesures in-situ marégraphiques (cf. bilan annuel CalVal Altimétrie/Marégraphie 2009, [11]). Ce signal annuel a pour origine le modèle de champ de gravité utilisé dans les GDR-C qui prend en compte les variations temporelles. Le fait que ce signal soit visible par d'autres méthodes renforce la validité et l'intérêt de la calibration de l'altimétrie par les mesures in-situ.

5.2.2. Cartographie de $\Delta VAR(SLA)_{Alti}$

La différence de variance $\Delta VAR(SLA)_{Alti}$ est cartographiée afin d'identifier les régions où la cohérence entre les SLA altimétrique et in-situ est améliorée avec l'orbite GDR-C. La figure 23 présente ces cartes pour Jason-1 (à gauche) et Envisat (à droite) avec des moyennes respectives de $+0.1 cm^2$ et $-2.9 cm^2$ respectivement. La distribution spatiale des différences de variance est plus homogène dans le cas de Jason-1 que pour Envisat où de fortes différences ($> 15cm^2$) sont observées régionalement. A noter qu'utiliser des boîtes plus grandes pour le calcul des statistiques ($5^\circ \times 5^\circ$ au lieu de $2^\circ \times 2^\circ$) ne modifie pas la distribution globale de ces fortes valeurs. La plus grande homogénéité observée dans le cas de Jason-1 indique que l'évaluation est meilleure statistiquement pour cette mission.

De même que précisé plus haut (cf partie 4.2.2.), l'erreur de la méthode de colocalisation des deux types de mesures est plus élevée dans les zones de forte variabilité océanique. Afin d'avoir une plus grande confiance dans ces diagnostics, nous présentons sur la figure 24 les mêmes cartes de différences de variance restreinte aux zones de faible variabilité océanique. Les moyennes obtenues sont de $+0.1 cm^2$ pour Jason-1 et $-2.9 cm^2$ pour Envisat et l'amplitude des valeurs observées est plus variable avec cette dernière mission. Cela serait dû au fait que les données Envisat sont découpées par cycles de 10 jours pour permettre la comparaison avec la mission Jason-1. Ce découpage entraîne une plus forte variabilité spatiale de l'échantillonnage des données Envisat, ce qui explique les fortes valeurs observées.

Néanmoins, ces cartes ne mettent pas nettement en évidence de régions privilégiées où la cohérence

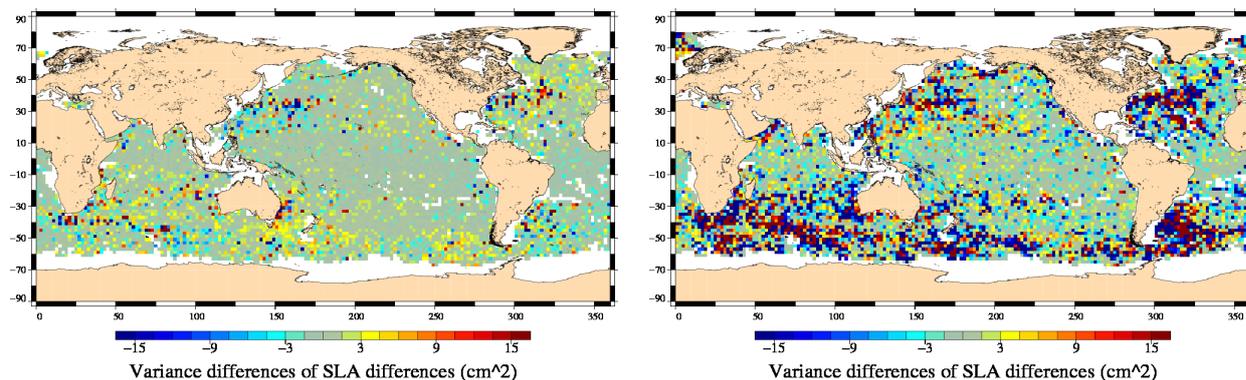


Figure 23: Cartes de la différence de variance $\Delta VAR(SLA)_{Alti}$ avec l'orbite GDR-C et GDR-B pour Jason-1 (à gauche) et Envisat (à droite).

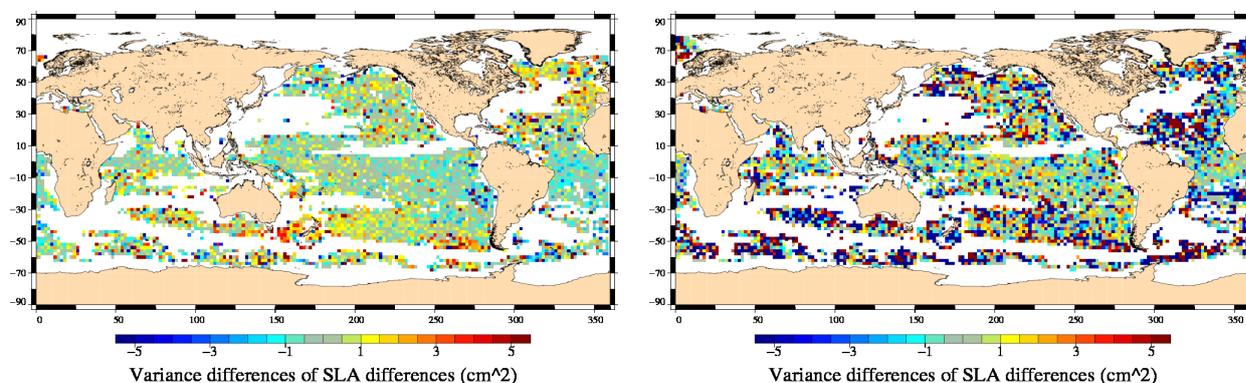


Figure 24: Cartes de la différence de variance $\Delta VAR(SLA)_{Alti}$ avec l'orbite GDR-C et GDR-B pour Jason-1 (à gauche) et Envisat (à droite) en excluant les zones de forte variabilité (énergie cinétique turbulente $\geq 50cm^2$).

entre les deux types de données serait améliorée avec l'orbite GDR-C, tel que l'on pourrait s'y attendre. En effet les diagnostics CalVal de gain en variance sur les données altimétriques seules montrent des zones d'améliorations assez importantes avec la nouvelle orbite Jason-1 (cf. bilan des retraitements [3]). Mais ces résultats sont cohérents avec les suivis temporels obtenus plus haut puisqu'en chaque boîte des cartes est calculée la moyenne temporelle de la différence de variance qui est proche de zéro en global (cf. figure 22). Concernant les résultats avec Envisat, l'analyse de la même carte obtenue avec le découpage original de la mission à 35 jours permettrait de préciser la validité de ces résultats. De plus l'utilisation des produits Envisat homogènes sur toute la période (retraitements GDR-C disponibles en 2010) devrait permettre de fournir des résultats plus fiables.

5.2.3. Histogramme par flotteurs profileurs de $\Delta VAR(SLA)_{Alti}$

Afin de préciser les résultats précédents, nous présentons sur la figure 25 l'histogramme du nombre de flotteurs profileurs associés à la différence de variance $\Delta VAR(SLA)_{Alti}$ pour la mission Envisat. Les statistiques ont été calculées en excluant les zones de forte variabilité où l'incertitude est plus grande, ce qui a permis d'exclure des valeurs extrêmes. Le nombre de flotteurs profileurs restant est de 2779 et la moyenne obtenue est de $-1.6 cm^2$, ce qui confirme l'amélioration de la cohérence

entre les deux types de données avec l'orbite GDR-C.

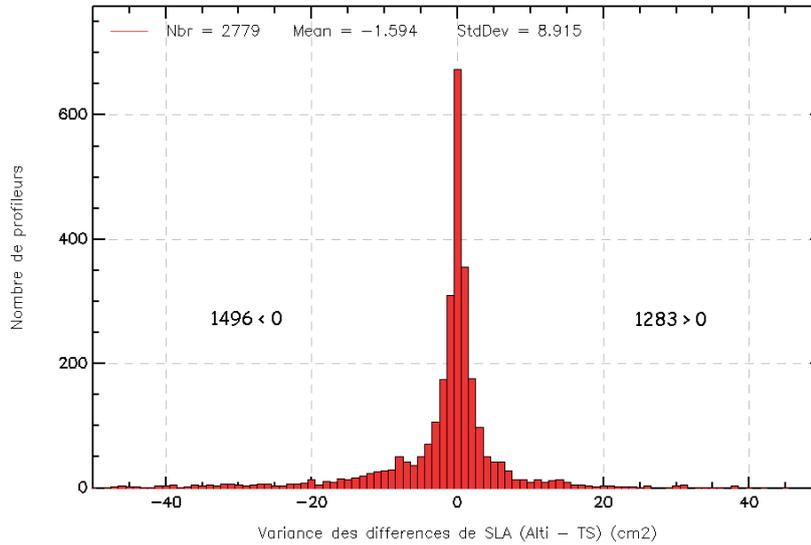


Figure 25: *Histogramme du nombre de flotteurs profileurs associés à la différence de variance $\Delta VAR(SLA)_{Alti}$ avec l'orbite GDR-C et GDR-B pour Envisat en excluant les zones de forte variabilité (énergie cinétique turbulente $> 50cm^2$).*

On note un nombre relativement important de capteurs pour lesquels la réduction de variance est comprise entre -5 et -20 cm². Ces valeurs relativement élevées pourraient être liées à des profils acquis durant les phases négatives du suivi de $\Delta VAR(SLA)_{Alti}$ (cf. figure 22). De plus, ces statistiques sont basées sur une série de profils acquis par chacun des flotteurs profileurs de la base de données. Il serait donc intéressant de tracer à nouveau cet histogramme en se restreignant aux flotteurs n'ayant acquis qu'un nombre statistiquement suffisant de profils.

6. Conclusions

Dans ce rapport, nous avons montré que la comparaison des données altimétriques avec les profils T/S est un moyen prometteur de validation des mesures altimétriques. Les améliorations apportées sur la base de données in-situ ainsi que sur la chaîne de traitement ont permis de fiabiliser les traitements réalisés dans un cadre opérationnel au même titre que les chaînes de traitement Cal/Val des missions altimétriques (compte de développement, compte d'exploitation, automatisation des traitements, utilisation du noyau informatique des chaînes de traitement Cal/Val). Cet aspect opérationnel de la chaîne de traitement est essentiel pour reproduire les analyses de façon systématique dans le cadre de retraitements des données altimétriques, et ainsi pérenniser cette activité à long terme.

La comparaison de la SLA in-situ avec les SLA altimétriques des missions Topex-Poséidon, Jason-2 mais surtout Jason-1 et Envisat sur la période 2004-2009, a révélé une bonne cohérence entre toutes ces missions, ce qui est cohérent avec les résultats des études de type Cal/Val. L'analyse des différences de SLA a permis de mettre en évidence l'introduction d'un biais sur les données Envisat en été 2008 lors du passage de l'orbite GDR-B à GDR-C. Ces éléments servent d'éléments de comparaison aux études Cal/Val en cours qui visent à préciser l'origine de ce biais.

Parmi les évolutions apportées cette année, l'emploi d'une référence temporelle commune pour le calcul des anomalies de hauteur altimétrique et in-situ a permis de réduire fortement les biais régionaux observés sur les cartes de moyenne des différences. Il restera néanmoins à vérifier si cette référence commune permet également de réduire la variance de ces différences. Par ailleurs, l'utilisation de données altimétriques multi missions plutôt que mono mission a permis de réduire l'erreur de colocalisation des mesures (en particulier dans les zones de forte variabilité océanique) et d'améliorer fortement la cohérence avec les mesures in-situ par rapport aux données mono-mission (réduction de variance de plus de 30 cm²). Notre méthode sera donc adaptée pour évaluer l'amélioration apportée par les nouveaux produits. De plus, les données externes et indépendantes que sont les profils T/S permettent d'estimer la qualité de nouveaux standards altimétriques à partir de leur impact sur la cohérence de l'altimétrie avec les mesures in-situ. La méthode a ainsi permis de montrer la meilleure qualité de l'orbite GDR-C par rapport à la version GDR-B, aussi bien pour la mission Jason-1 que Envisat. La méthode sera également adaptée pour qualifier l'évolution apportée par le retraitement complet des mesures Envisat en version GDR-C prévu en 2010. De plus, elle est également utilisée pour compléter des études Cal/Val particulières telles que l'analyse en cours de potentielles hétérogénéités spatiales de la dérive du MSL Envisat.

Concernant la détection de dérives dans l'altimétrie, des travaux en cours à CLS ont permis de montrer que la période d'étude de 5 ans (2004-2008) est relativement courte et entraîne une incertitude sur la pente associée au suivi de la SLA in-situ de 0.5 mm/an. En admettant l'erreur négligeable sur la pente de la SLA altimétrique, l'incertitude sur la pente de la différence entre SLA et DHA est également de cet ordre de grandeur. Une période d'étude plus longue réduira l'incertitude et fournira à l'avenir des résultats pertinents de plus en plus précis. De plus, les contenus physiques des grandeurs comparées ne sont pas strictement identiques et la régression assurant la relation entre les parties totale et stérique de la colonne d'eau est encore perfectible (relation linéaire, variations temporelles...), ce qui augmente l'incertitude sur les pentes calculées. Néanmoins, celles obtenues avec Jason-1 et Envisat révèlent une bonne cohérence entre les deux missions qui corrobore les analyses Cal/Val. Mais une limitation importante dans la méthode actuelle sur la bonne détection de dérives vient du fait que les évolutions temporelles des niveaux moyens associés au

champ de masse et à la partie stérique (dont la somme donne le MSL total) sont estimées linéaires. Or des études suggèrent que ce n'est peut-être pas le cas sur la période étudiée. L'utilisation de grilles de coefficients de régression variant dans le temps (grilles annuelles) permettrait de mieux prendre en compte cette évolution du niveau moyen. De plus, la grille de coefficients de régression utilisée aujourd'hui pourrait également être améliorée en la déterminant sur une période et avec des standards altimétriques en adéquation avec la période d'étude. Ces éléments n'étant à l'origine pas issus des activités CalVal, ces évolutions pourront avoir lieu en synergie avec d'autres études (contrat Ifremer/Coriolis).

Désormais l'activité de comparaison des données altimétriques avec les profils T/S a dépassé son stade expérimental. Néanmoins, des travaux sont encore nécessaires pour améliorer certaines étapes de la comparaison des données. D'autres travaux permettront de faire évoluer la base de données in-situ, de compléter la chaîne de traitement avec des diagnostics pertinents et plus précis, et d'enrichir encore les analyses pour mieux qualifier les missions altimétriques.

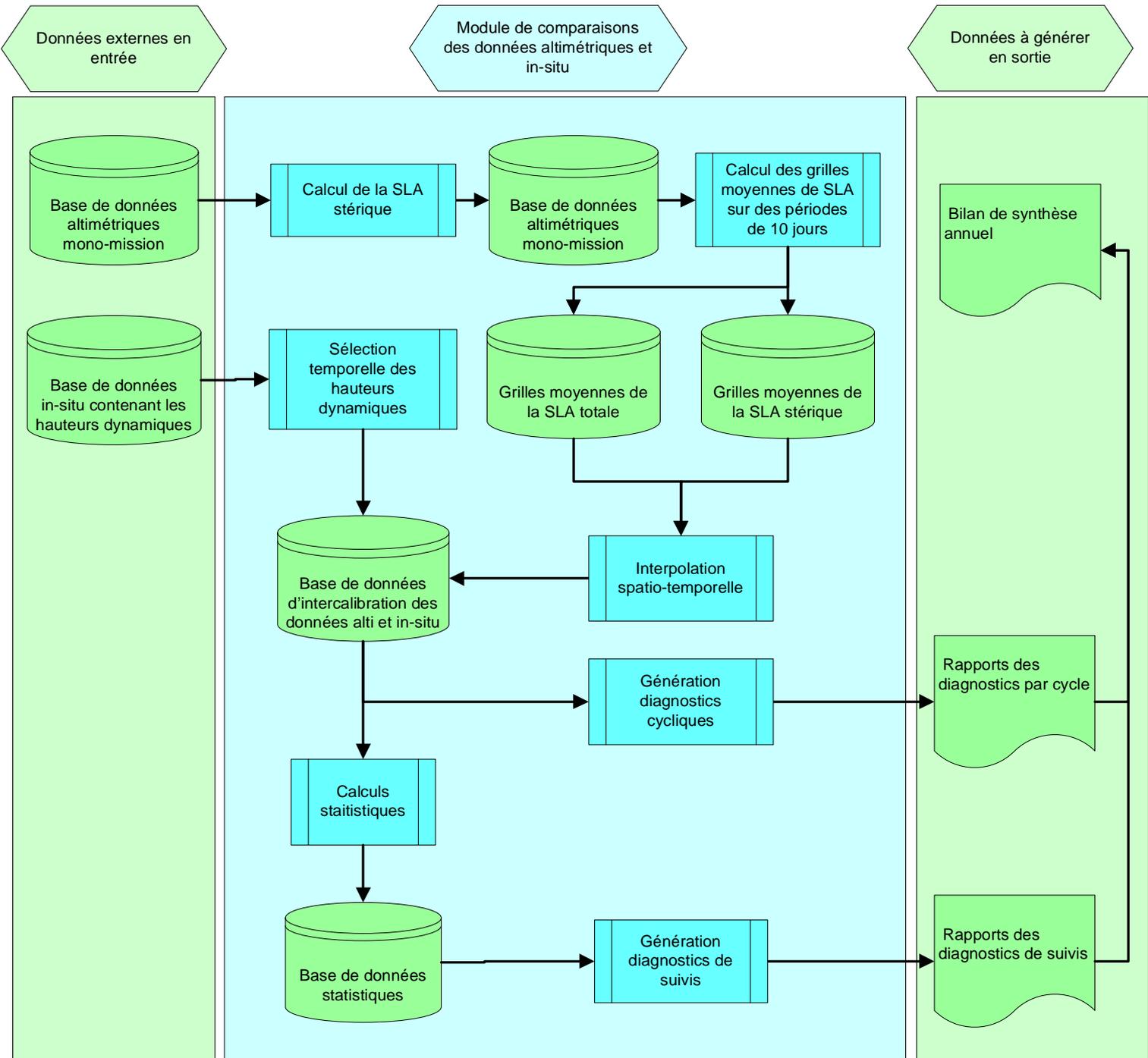
7. Références

References

- [1] Chen J.L., C.R. Wilson, D.P. Chambers, R.S. Nerem, B.D. Tapley. Seasonal global water mass budget and mean sea level variations. *Geophys. Res. Letters*. Vol. 25; No. 19; pp 3555-3558, 1998.
- [2] Commien L., S. Philipps, M. Ablain, N. Picot, 2008: SSALTO CALVAL performance assessment Jason-1 GDR "C"/GDR "B". OSTST, Nice, 2008.
- [3] Commien L., S. Philipps, 2009: Reprocessing of Jason-1 GDR-C. Technical Note CLS.DOS/NT/09-198, Contract N° SALP-RP-MA-EA-21731-CLS.
- [4] Guinehut, S., 2002: Vers une utilisation combinée des données altimétriques et des mesures des flotteurs profilants. Thèse de doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier, Toulouse
- [5] Guinehut S., C. Coatanoan, A.-L. Dhomps, P.-Y. Le Traon and G. Larnicol, 2008: On the use of satellite altimeter data in Argo quality control, *J. Atmos. Oceanic. Technol*, in press., 2008
- [6] Legeais JF., C. Dufau: Rapport d'étude Tâche 2.11: Analyse de l'erreur sur la mesure altimétrique, 2009. CLS-DOS-NT-09-166; SALP-NT-P-EA-21714-CLS.
- [7] Leuliette E. W. and L. Miller. Closing the sea level rise budget with altimetry, Argo and GRACE. *Geophys. Res. Letters*. Vol. 36, 2009.
- [8] Ollivier A., Y. Faugere, 2009: Envisat validation and cross calibration activities. Yearly report. Technical Note CLS.DOS/NT/10-018, Contract N° SALP-RP-MA-EA-21800-CLS.
- [9] Valladeau G., Ablain M. 2008: Bilan annuel CalVal In-Situ. Validation des données altimétriques par comparaison aux mesures in-situ T/S. Note technique CLS.DOS/NT/09-018, Contrat SALP-NT-MA-P2-21635-CLS.
- [10] Valladeau G., M. Ablain, F. Lefèvre, S. Guinehut, A. Cazenave, A. Lombard, 2008: Assessment of global mean sea level from altimeters cross-calibration with in-situ measurements (TOPEX/Poseidon, Jason-1 and Envisat). OSTST, Nice, 2008
- [11] Valladeau G., Ablain M. 2009: Bilan annuel CalVal altimétrie / marégraphie. Validation of altimetric data by comparison with tide gauge measurements. Ref. CLS/DOS/NT/09-115. Contrat SALP-NT-MA-EA-21691-CLS.

8. Annexes

8.1. Annexe: Étapes de traitement de la chaîne CalVal altimétrie/in-situ T/S



8.2. Annexe: Poster OSTST comparaisons altimétrie/DHA

Assessment of global mean sea level from altimeters cross-calibration with in-situ measurements (TOPEX/Poseidon, Jason-1 and Envisat)

G. Valladeau (1), M. Ablain (1), F. Lefèvre (1), S. Guinehut (1), A. Cazenave (2), A. Lombard (2)
 (1) Collecte Localisation Satellite (CLS), Toulouse, France.
 (2) Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), Toulouse, France.
 E-mail: guillaume.valladeau@cls.fr

Overview

Measurements from space altimetric missions (TOPEX/Poseidon (T/P) and Jason-1) are believed to provide a reliable estimation of the Mean Sea Level (MSL) trend (to date 3.1 mm/year since 1993 without post glacial rebound). However, some potential drifts have been identified due to geophysical corrections, orbit solutions and the uncertainty to link the different MSL time series.

As in-situ datasets (tide gauges, Temperature/Salinity (T/S) profiles) provide independent measurements of sea surface height variations, methods have been developed to assess the global MSL trend from such data. The basic idea of the data processing is that differences between in-situ and altimetric measurements should not have any drift or bias over long time scales.

First, altimetric data are compared with tide gauge measurements using 4 different tide gauge networks (GLOSS/CLIVAR, SONEL, BODC database and OPPE). Second, an innovative method using the whole set of free-drifting profiling floats of the ARGO network is used. In this case, altimetric data are compared to sea level heights computed from T/S profiles for the 2004-2008 time period.

Both in-situ datasets complement each other since the first one (tide gauges) concerns coastal areas while the second one (T/S profiles) is widespread enough to detect potential drifts in the open ocean.

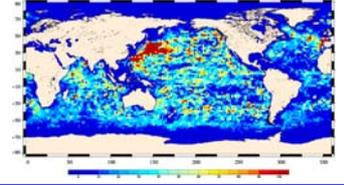
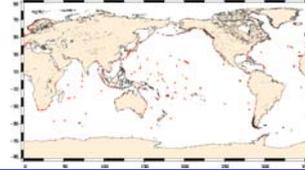
Inventory of data used in both methods

Tide gauge networks:

- 4 different tide gauge networks (GLOSS/CLIVAR "fast" sea level, SONEL, BODC, OPPE)
- ~320 tide gauges not uniformly widespread
- Only ~130 reliable time series
- Near real time data
- Time period: 1993-2008

T/S profiles network:

- Argo profiling floats array
- Distributed by the Coriolis data center
- 3,000 free-drifting profiling floats
- Near real time data
- Time period: 2004-2008



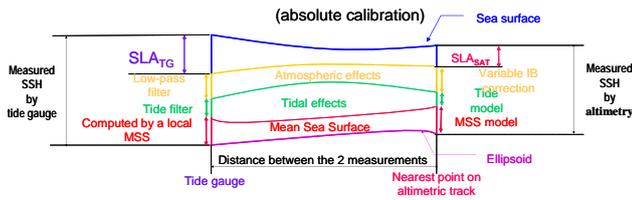
Altimeter and Tide gauges SSH cross-calibration

Methodology

1/ SSH calculation :

- The SSH reference is not the same: the Mean Sea Surface has to be removed from altimetric SSH
- Tidal effects (due to the distance between 2 measurements) have to be removed from both SSHs
- Atmospheric effects have to be removed for the same reason
- Vertical movements are corrected on tide gauge measurements using vertical velocities of the Earth's crust recorded by ground stations

$$\text{Bias} = \text{SLA}_{\text{SAT}} - \text{SLA}_{\text{TG}} \text{ (+/- errors on models and measurements)}$$



2/ Collocation of altimetric and in-situ data by interpolation on the altimeter time series of the 4 closest altimetric tracks

3/ Editing of tide-gauges time series using the cross-comparison from all the altimeters in order to remove tide gauges with an abnormal behavior (jump, very strong drift).

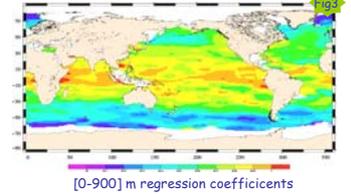
Altimeter and T/S profiles SSH cross-calibration

Methodology

1/ SSH calculation

The physical content of T/S profiles and altimeter SSH is not the same since the T/S profiles contain only the steric part of the altimeter SSH. Thus a method has been developed to compare equivalent physical content applying a regression coefficients grid in the altimeter SSH calculation (fig. 3) as described by Guinehut et al., 2006.

To date, this method does not allow us to know perfectly the altimeter steric part (for instance the regression coefficients grid does not depend on time). Thus, we performed our comparisons using total and steric altimeter SSH content in order to estimate the reliability of the method.

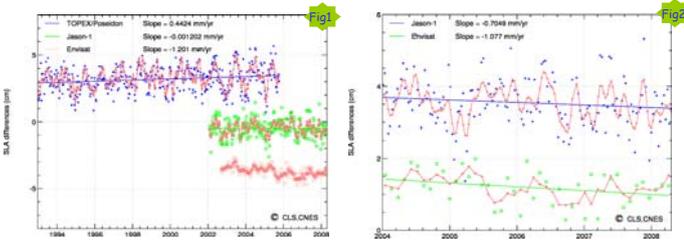


2/ Collocation of altimetric and in-situ data are performed by interpolation of altimeter data (from averaged SSH grid over a 10-day period) on in-situ measurements

3/ Validation of T/S profiles using the cross-comparison from all the altimeters in order to remove T/S profiles with an abnormal behavior (jump, very strong drift).

Estimation of MSL drift

Global MSL drift (derived from Jason-1 and T/P) estimated from tide gauges comparisons is $+0.3 \text{ mm/yr} \pm 0.5 \text{ mm/yr}$



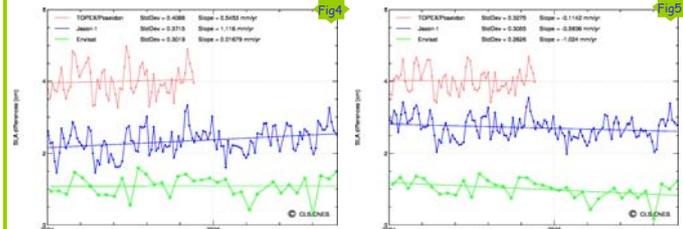
Trends of differences between altimetric and in-situ tide gauge SLA for TOPEX/Poseidon, Jason-1 and Envisat space missions over all the altimeter period (on left) and from 2004 only (on right).

The MSL altimeter drift estimate is very weak (almost null for Jason-1 and close to $+0.4 \text{ mm/yr}$ for T/P, see fig. 1). Merging both altimeter missions over the whole period, the global MSL drift becomes close to $+0.3 \text{ mm/yr}$.

For Envisat, a negative MSL drift close to -1.2 mm/year is detected from 2002 to 2008 (fig. 1). But focusing only on the end of the period (from 2004), the Envisat MSL drift is now weaker close to -1 mm/yr (fig. 2). Over this period, Jason-1 and Envisat global MSL are in better agreement though a negative trend is displayed (-0.7 mm/yr for Jason-1 and -1.1 mm/yr for Envisat).

The precision of the MSL drift estimation is in the order of 0.5 mm/yr considering the longest altimeter period. It is depending on the accuracy of the collocation method between altimeter and in-situ measurements but also on the accuracy of the vertical movements correction.

Estimation of MSL drift



Differences between total altimetric and in-situ SLA for TOPEX/Poseidon (red curve), Jason-1 (blue curve) and Envisat (green curve)

Considering all the ARGO data period from 2002 onwards, Jason-1 and T/P SLA comparisons with T/S profiles are very well correlated. A rise is observed from 2002 to 2004 (not shown here). It is completely due to the strong evolution of T/S sampling. The SLA comparison with Envisat from 2002 to 2004 does not show this evolution. This highlights the abnormal behavior of Envisat MSL at the beginning of the mission.

Thus, the MSL drift has to be estimate only from 2004. It is not very relevant for T/P since less than 2 years of T/P data are available. Concerning Jason-1, the $+1.12 \text{ mm/yr}$ drift obtained using total SLA content becomes -0.58 mm/yr using the altimeter steric content. In the meantime, Envisat MSL drift is respectively $+0.02 \text{ mm/yr}$ and -1.02 mm/yr , showing in both cases and MSL trend lower than for Jason-1.

The uncertainty associated to the absolute value of the MSL drift estimated here has to be thoroughly studied (it is preliminary results here). However, the most interesting result is the capability of this new method to detect the relative drift between different altimeter missions.

Conclusion

This study aims at demonstrating the capability of these both methods to detect drift or abnormal jump in the SSH provided by altimeters. The calculation of the trend and the comparison with in-situ results can lead to assess the error on the global MSL trend and thus estimate the absolute drift. The cross-comparison between altimeter missions is able to accurately detect the MSL relative bias. Here, we underline the drift of Envisat MSL, especially at the beginning of the time period (2002-2004). Finally, these both methods are complementary as the tide gauge one samples coastal areas with a good time resolution while the T/S has a better space sampling (open ocean) but a lower time resolution.

References :

- Guinehut, Le Traon and Larnicol, 2006: *What can we learn from Global Altimetry/Hydrography comparisons?*
- Poster, S. Guinehut, C. Coatanoan, A-L Dhomp, P-Y Le Traon and G. Larnicol: *On the use of Satellite Altimeter Data in ARGO Quality Control*

8.3. Annexe: Poster OSTST performance des retraitement GDR-C Jason-1

SSALTO CALVAL performance assessment Jason-1 GDR "C"/GDR "B"

L. Commien¹, S. Philipps¹, M. Ablain¹, N. Picot²

¹CLS, Space Oceanography Division, Toulouse, France
²CNES, Centre National d'Études Spatiales, Toulouse, France



Context

Jason-1 data have been processed in GDR version C from cycle 233 onward. The beginning of the dataset is currently being reprocessed in version C. The present poster analyses the global impact of the new GDR-C version on the system performances for the yet reprocessed cycles (196 to 232), and also focuses on the specific impact of new precise orbit and JMR data on the mean sea level calculation from the whole series.

Three datasets are available. GDRs have been reprocessed from cycle 196 to 232. This first dataset is used to assess the performances of the system (crossover SSH and along-track SLA statistics). New precise orbit, taking into account the time-varying part of the gravity field is available from cycle 1 to 239. Improved calibration of JMR data from cycles 1 to 212 is also used in this study. These are the main evolutions from version B to version C, along with the use of high resolution dynamic atmospheric correction, new SSH calculation and range estimation, introduction of a pseudo time-tag bias correction, and more accurate rain and ice flags.

Global performances of GDR-C

GDRs have been reprocessed from cycle 194 to 232 (except for cycle 195). The performances prove to be very satisfying.

Crossover analysis

The crossover ascending/descending incoherencies are reduced with GDR-C: the map of mean crossover differences is more homogenous than with GDR-B, especially in the Atlantic. This shows a better coherence between ascending and descending tracks (Fig.1), mainly due to new orbit calculation and the introduction of a pseudo time-tag bias correction.

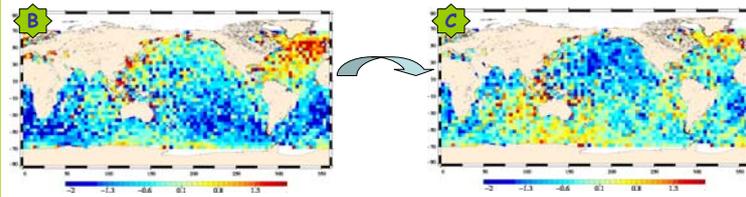


Fig. 1: Mean [cm] of SSH at crossovers, for GDR-B (left) and GDR-C (right).

The variance difference is negative almost everywhere ($\text{var}(\text{SSH}_{\text{GDR-C}}) - \text{var}(\text{SSH}_{\text{GDR-B}})$), from 1 to 8cm^2 , which is a clear improvement of GDR-C (Fig.2, left). Temporally, the variance gain is about 1cm^2 , which is low but still an improvement too (right).

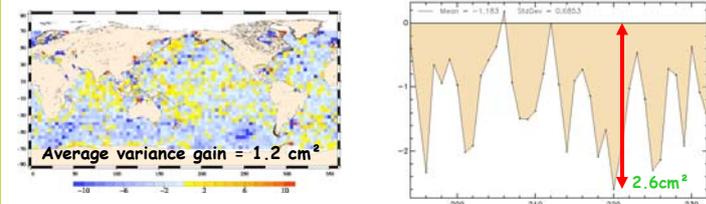
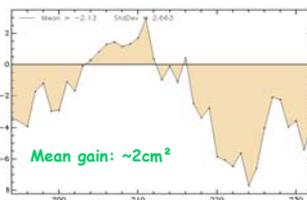


Fig. 2: Variance differences (C-B) of crossover SSH. Spatially (left) and temporally (right), from cycle 194 to 232 [cm^2]

Along-track analysis

The variance difference of along-track SLA between both GDR versions, highlights an annual signal (Fig.3). Most of the time, the variance is reduced with GDR-C ($\sim 2\text{cm}^2$), but the variance reduction reaches almost 8cm^2 . This is mainly related to the orbit change (see below).

Fig. 3: SLA variance differences "C" - "B" [cm^2] from cycles 194 to 232.



Analysis of new orbit over the whole period

GDR-C orbit is a SLR/DORIS/GPS orbit as GDR-B but uses the EIGEN-GL04C gravity field. Contrary to the GDR-B orbit, GDR-C POE takes into account annual and semi-annual time variability and atmospheric contribution of the gravity field, and ocean pole tide effects. The new reference frame used is ITRF2005, contrary to GDR-B (ITRF2000). Figure 4 shows the mean differences between GDR-C and GDR-B orbits for cycles 1 to 239. The main feature is north/south bias, due to the change of reference frame.

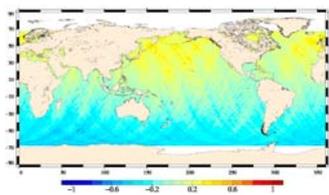


Fig. 4: Mean differences "C" - "B" [cm] of orbits from cycles 1 to 239.

Mean differences at crossovers are geographically more homogeneous, proving a better coherence with version C (not shown). The SSH variance at crossovers decreases slightly. Temporally, a slight improvement is noticed, the quality of both products is equivalent regarding the crossovers performances, with variance reduction similar to the statistics shown on the global performances of GDR-C box (above).

Figure 5 shows a peculiar annual pattern on along-track SLA variance differences. The variance is significantly decreased, reaching 6cm^2 , which approximately corresponds to 7% of the signal's total variance. Note that this improvement enlarges with time. This highlights the add of the time-varying part of the gravity field in the new orbit calculation. This feature has also been observed when comparing the altimetry to in situ measurements (tide gauges and ARGO T/S profiles).

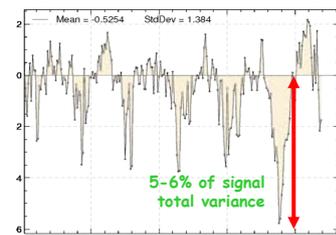


Fig. 5: Cycle per cycle variance differences [cm^2] of along-track SLA. ("C" - "B"), with selections on latitude $[50^\circ\text{N}; 50^\circ\text{S}]$ and bathy <math> < 1000\text{m}</math>.

Impact on MSL

JMR contribution

An improved JMR calibration is used, which corrects for scale error, provides additional reduction of yaw state effects and avoids small shifts that may have occurred after the last two safehold events.

The new radiometer wet troposphere correction has minor effects on mean sea level trends (Fig. 6).

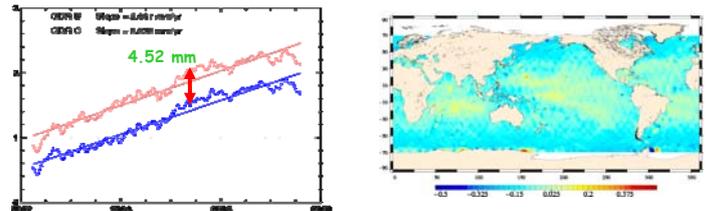


Fig. 6: Filtered MSL trends with "C" and "B" radiometer wet tropospheric correction (left) and local slopes differences (right) [mm/year].

Orbit contribution

The orbit change has geographic impacts on MSL trends, as shown on Figure 7. This north/south difference is due to the ITRF change (2000/2005, see the box about orbit changes). The observed bias usually ranges between -1.5 and 1.5mm/yr , the positive bias (C-B) being found in the northern hemisphere. There is a 0.066mm/yr decrease of the global slope using GDR-C orbit (2.5% of signal amplitude).

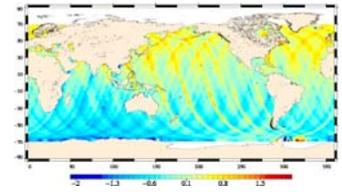


Fig. 7: Differences of MSL trends between "C" and "B" orbits, 2002-2008 [mm/year].

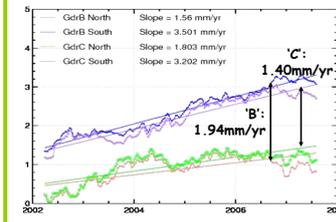


Fig. 8: Cycle per cycle MSL trends [cm] for "B" and "C" by hemisphere.

The slope divergence between north and south, shown on Fig.8, is slightly reduced with GDR-C: in version B, there was a 1.94mm/yr slope difference between north and south, which has dropped to 1.40mm/yr with version C. The impact is significant, since the slope difference corresponds to $\sim 14\%$ of the signal north, and $\sim 9\%$ south. However, the expected N/S slope divergence reduction is low compared to what was observed when using the GSFC ITRF2005 orbit (see Ablain's poster : Error estimation of the global and regional mean sea level trends).

GDR-C/GDR-B linking

A global and hemispheric bias was calculated using the mean of the last 4 GDR-B cycles, 229 to 232. Attention should be paid to the fact that applying a fixed bias is sufficient for global MSL studies but NOT when considering local (hemispheric) MSL evolutions.

The applied bias differs when using radiometer (-9.5mm) or model wet tropospheric correction (-5.75mm). The correction, when applied to GDR-C, fits very well with GDR-B MSL.

The map of mean SLA differences from cycle 229 to 232 shows geographically correlated biases (Fig.9, left), related to the change of reference frame (ITRF2000/2005). This map should always be subtracted from the GDR-C-computed MSL maps before watching temporal evolution of MSL trends if local analyses are performed. The same map can also be used for global MSL (Fig.9, right). This has already been taken into account in the AVISO Mean Sea Level products.

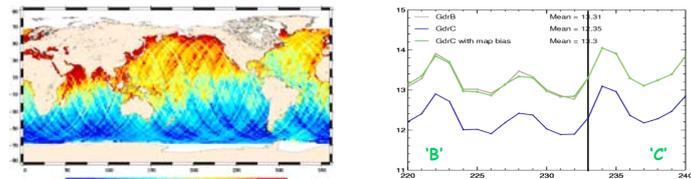


Fig. 9: Mean [cm] along-track differences for cycle 229 to 232 (left) and MSL GDR-C/B linking when subtracting the map (right).

Conclusion

With a year of reprocessed data, the first assessment of GDR-C Jason-1 data is satisfying, showing better SSH performances at crossover and also along-track. Particularly, the CNES POE orbit enables to decrease the SLA variance significantly, mainly thanks to the time-varying part of the gravity field used in its calculation.

The GDR-B/C MSL bias is not homogeneous geographically and should be corrected using a map, a feature already available on the AVISO website. The new JMR correction has almost no impact on mean sea level trends, and the orbit reduces the north/south drift of MSL trends, although a stronger impact could have been expected.