

## 4.1. Altimétrie spatiale

### 4.1.1. Variations du niveau des océans

#### Résumé des activités 2012 et plan de travail 2013-01-14

##### Contexte

L'étude du niveau de la mer, sa mesure par altimétrie spatiale multi satellites et l'étude des causes de son élévation et de sa variabilité spatio-temporelle constituent un axe de recherche prioritaire de l'équipe LEGOS/GOHS. Les grands thèmes abordés sont rappelés ci-dessous :

- Contribution -avec CLS- à la mesure des variations actuelles du niveau de la mer à l'échelle globale et régionale par altimétrie multi-satellites ; validation des résultats par comparaison avec les données marégraphiques et à l'aide d'études de bilan ; analyse des sources d'erreur ; production de séries temporelles (moyenne globale et grilles) de qualité climatique
- Etude des causes de l'évolution actuelle du niveau moyen global de la mer (contributions stériques, fonte des glaces et échanges de masse d'eaux continentales) à partir de différentes sources de données in situ et spatiales ; Etude du bilan global sur la période altimétrique
- Etude de l'origine de la variabilité interannuelle du niveau moyen global de la mer ; lien avec le cycle global de l'eau
- Reconstruction des variations régionales passées (depuis 1950) du niveau de la mer (global + régional) par combinaison des données marégraphiques, altimétriques et de sorties de modèles de circulation générale océanique
- Détermination de la hausse totale relative dans les zones côtières
- Etude de la variabilité régionale du réchauffement de l'océan
- Etudes de 'Détection/Attribution' (estimation des contributions respectives de la variabilité climatique interne et du forçage anthropique)
- Contribution à la validation des modèles climatiques couplés développés pour l'IPCC AR5

#### Résumé des activités 2012

*Mesure fine du niveau de la mer global et régional par altimétrie multi satellites; réduction des sources d'erreur*

L'équipe LEGOS/GOHS contribue à valider les produits altimétriques multisatellites 'niveau de la mer' préparés par CLS, notamment dans le cadre du projet ESA CCI 'Sea Level' dont l'équipe a la responsabilité scientifique. Cette contribution à la validation consiste à : (1) comparer le niveau de la mer altimétrique à la marégraphie, (2) réaliser des études de bilan (ex : la hausse altimétrique doit être égale à la somme des contributions).

Une étude récente menée en collaboration avec CLS et MERCATOR, a cherché à expliquer les différences importantes des tendances du niveau moyen global de la mer estimé par les différents groupes impliqués dans la production de séries altimétriques de niveau de la mer (outre AVISO, Université du Colorado, NOAA, GSFC et CSIRO). En effet, alors que sur la période altimétrique complète (1993-2012) les tendances sont en bon accord (de 3.2 mm/an à 0.1 mm/an près), sur la période 2005-2010 –période choisie par l'IPCC pour estimer le bilan du niveau de la mer-, on observe un très fort désaccord : par exemple les hausses estimées par AVISO et l'Université du Colorado sont respectivement de 2.8 mm/an et de 2.1 mm/an. Une telle différence basée sur le traitement des mêmes données altimétriques est totalement inacceptable. L'étude a cherché à identifier la source de cet écart. Elle a notamment quantifié l'effet des différences de méthode de

traitement des données (moyennage des données altimétriques le long des profils pour l'Université du Colorado, calcul d'une grille régulière avant moyennage pour AVISO ; effet de la prise en compte ou non des données sur les marges continentales, etc.). Pour cela, des données de hauteur de mer synthétiques ont été générées à partir des sorties du modèle MERCATOR sur la période Jason-1 et différents tests ont été réalisés pour quantifier l'influence de la méthodologie de processing des données. L'analyse a montré que la méthode utilisée par l'Université du Colorado conduit à sous estimer la hausse du niveau de la mer. Cette étude a aussi permis de découvrir une erreur dans la prise en compte de la troposphère humide par AVISO dont l'effet est de surestimer la tendance. Au final la valeur 'la plus probable' se situe entre les deux : pour la période 2005-2010, la hausse du niveau de la mer est estimée à 2.5 mm/an. Ce résultat est important pour les travaux en cours de l'IPCC. Il a donné lieu à un article (**Henry et al., 2012a**).

#### *Mise à jour des contributions climatiques et des études de bilan*

Au cours de l'année 2012, des mises à jour des différentes contributions climatiques au niveau de la mer ont été réalisées par l'équipe grâce à l'utilisation de nouvelles versions des données de température et salinité de l'océan (JAMSTEC/Ishii et Kimoto v6.12, NOAA et Argo –via une collaboration avec K. von Schuckmann-). De nouvelles estimations de la contribution des eaux continentales ont aussi été réalisées à partir de différents produits GRACE et des modèles hydrologiques globaux (ISBA/TRIP, GLDAS, WGHM, LAD). Enfin l'utilisation de nouvelles estimations du rebond post glaciaire sur l'océan par R. Peltier et G. Spada ont permis de re-estimer la composante 'masse de l'océan' sur la période GRACE. L'utilisation des résultats les plus récents pour les bilans de masse des glaces continentales combinées avec les nouvelles estimations ci-dessus ont conduit à réévaluer le bilan ('sea level budget') pour les années récentes. Ces résultats sont présentés dans un article de revue invité (**Meyssignac and Cazenave, 2012**) et ont contribué à alimenter l'IPCC (AR5) auquel nous participons (chapitre 13 sur le niveau de la mer).

#### *Etude de la variabilité interannuelle du niveau de la mer*

Le niveau moyen de la mer présente des fluctuations de quelques millimètres durant les événements El Nino/La Nina. Durant la phase chaude (El Nino), on observe une anomalie positive alors que durant la phase froide (La Nina), l'anomalie est négative. Dans une étude récente combinant 'niveau de la mer altimétrique', données stériques, données GRACE, sorties de modèles hydrologiques et données globales de précipitation et évaporation, nous avons montré que ces fluctuations 'interannuelles' du niveau moyen global de la mer sont essentiellement dues à des variations de masse de l'océan inversement corrélées aux variations du stock d'eau total sur les continents, traduisant le fait que durant El Nino il pleut davantage sur l'océan que sur les continents, et inversement durant La Nina. Nous avons aussi montré que durant El Nino (en particulier le El Nino de 1997-1998), l'excès de masse de l'océan causant l'anomalie positive de la mer, n'est pas uniformément réparti sur le domaine océanique mais est localisé dans l'océan Pacifique tropical nord. L'excès de masse de cette région compense quasi parfaitement le déficit du stock d'eau total des continents observé à cette période. Ce résultat surprenant résulte vraisemblablement d'une réduction des courants océaniques au niveau des détroits indonésiens (zone d'écoulement des eaux du pacifique vers l'Océan Indien) favorisant l'accumulation de l'eau dans le Pacifique tropical nord. Ce travail a fait l'objet de deux publications (**Cazenave et al., 2012a et 2012b**). Il a aussi servi de base à une étude sur le cycle global de l'eau faisant intervenir les variations de masse de l'océan, les précipitations, l'évaporation et le ruissellement global (**Munier et al., 2012**).

#### *Reconstruction des variations régionales passées (depuis 1950) du niveau de la mer (global + régions) :*

Des méthodes statistiques ont été développées pour reconstruire en 2-D le niveau de la mer dans le passé (dernières décennies). L'approche consiste à combiner l'information spatiale 2-D issue soit de l'altimétrie, soit de modèles de circulation générale océanique (OGCM) sur une durée limitée, avec des séries de hauteur de mer marégraphiques in situ (séries longues mais de distribution limitée et hétérogène). Dans la littérature, plusieurs études ont cherché dans le passé à reconstruire la variabilité régionale du niveau de la mer depuis 1950 en utilisant des séries marégraphiques longues de bonne qualité et des grilles de hauteurs dynamiques issues de 8 ans

d'altimétrie ou des sorties du modèle de circulation générale océanique avec assimilation OPA/NEMO développé par P. Rogel au CERFACS. Cette année nous avons réalisé une étude qui fait le point sur les méthodes de reconstruction et leur capacité à représenter la variabilité régionale passée du niveau de la mer depuis 1950. Pour cela nous avons développé une méthode de reconstruction améliorée par rapport aux méthodes existantes (optimisant l'information statistique et tenant compte des erreurs). Sur la base de cette méthode, nous avons développé plus de 80 reconstructions afin de tester tous les paramètres en jeu dans cette approche. En particulier nous avons testé différentes grilles de hauteurs dynamiques en entrée du processus de reconstruction: l'Altimétrie et 2 modèles d'océan différents (SODA et DRAKKAR). Nous avons ainsi produit 3 nouvelles reconstructions 2-D du niveau de la mer depuis 1950 s'appuyant chacune sur une grille d'entrée différentes. Nous avons comparé ces reconstructions et nous avons montré que la reconstruction moyenne qui est calculée comme la moyenne des différentes reconstructions donne les meilleurs résultats.

1 article publié : **Meyssignac et al. (2012a)**.

#### *Impacts de la hausse du niveau de la mer*

L'équipe a réalisé plusieurs études sur la hausse 'totale' relative du niveau de la mer au cours des 60 dernières années dans plusieurs régions côtières de la planète : les îles du Pacifique tropical ouest et central (dont les Tuvalu, la Polynésie et la nouvelle Calédonie), la région des Caraïbes (dont les Antilles), La mer de Chine et l'océan Indien (dont la Réunion). Se basant sur la reconstruction du niveau de la mer réalisée par B. Meyssignac (Meyssignac et al., 2012a), l'approche a consisté à estimer l'effet combiné de la hausse moyenne globale, de la variabilité régionale basse fréquence et des mouvements verticaux de la croûte terrestre (estimés à partir de GPS et/ou DORIS). Les études réalisées ont montré que dans certains endroits la hausse du niveau de la mer est très fortement supérieure à la hausse moyenne globale ; c'est le cas de Funafuti (Tuvalu) où la hausse est 3 fois plus rapide ; c'est aussi le cas de la côte chinoise. Plusieurs articles ont été publiés par l'équipe (Becker et al., 2012, Palanisamy et al., 2012a,b, Peng et al., 2012). Cette approche a aussi servi à estimer le rôle du niveau de la mer sur l'érosion côtière en Polynésie (Le Cozannet et al., 2012).

*Analyse des causes de la variabilité régionale et attribution du signal régional de niveau de la mer : variabilité naturelle du système climatique ou signature du réchauffement anthropique ?*

Comparaisons de la reconstruction 2D du niveau de la mer et de l'altimétrie avec les données hydrographiques de température et de salinité

Nous avons analysé les jeux de données hydrographiques de température et de salinité de Ishii et Kimoto (2009) et de Levitus et al. (2012) de 1950 à aujourd'hui sur 2 profondeurs 0-300m et 300-700m. Nous avons pu mettre en évidence une augmentation significative du niveau de la mer stérique depuis les années 1970 sur la couche 0-300m et depuis les années 1990 sur la couche 300-700m. Nous avons aussi pu mettre en évidence une fluctuation basse fréquence (période autour de 20 ans) des tendances à 15 ans du niveau de la mer stérique sur la période 1950-2010 et pour la couche 0-300m. La comparaison avec le niveau de la mer global déduit de la reconstruction 2D du niveau de la mer et de l'altimétrie a permis de montrer que l'on retrouvait cette fluctuation basse fréquence dans les tendances à 15 ans du niveau de la mer global.

1 article publié : **Llovel et al. (in press)**

Comparaisons d'une reconstruction 2D du niveau de la mer en Méditerranée et de l'altimétrie avec les données hydrographiques de température et de salinité locale

En 2011 nous avons développé une reconstruction 2D du niveau de la mer dédié à la Méditerranée sur la période 1970-2010. En corrigeant cette reconstruction du niveau de la mer de l'effet stérique calculé avec les jeux de données hydrographiques de température et de salinité de Ishii et Kimoto (2009) et de Levitus et al. (2012) nous avons pu estimer cette année les variations de masse de la mer Méditerranée depuis 1970. Nous avons vérifié notre estimation sur la période récente en comparant avec l'Altimétrie corrigée du stérique sur la période 1993-2010 et en

comparant avec les données GRACE sur la période 2003-2010. L'estimation des variations de masse de la Méditerranée depuis 1970 nous a permis de montrer que l'augmentation du niveau de la mer de 1.2 mm/a que l'on y observe depuis 1970 est due à une augmentation de masse. Nous avons pu aussi en calculer la première estimation des variations du flux à Gibraltar basée sur des mesures en faisant un bilan de masse de la mer Méditerranée sur la période 1970-2010.

1 article publié : **Fenoglio-Marc et al. (2012)**.

*Comparaisons de l'altimétrie avec les modèles climatiques du projet CMIP3 : variabilité naturelle du système climatique ou signature du réchauffement anthropique ?*

En comparant l'altimétrie et la reconstruction 2D du niveau de la mer dans le Pacifique tropical nous avons pu analyser dans un contexte plus large les fortes tendances du niveau de la mer observée par les satellites sur les 17 ans de 1993 à 2010. En regardant des fenêtres de 17 ans dans la reconstructions nous avons montré que ces tendances sont en fait très probablement la manifestation d'une basse fréquence liée au mode de variabilité climatique ENSO (El Nino – Southern oscillation).

Cette basse fréquence qui a été identifiée dans la reconstruction se retrouve aussi dans les runs de contrôle des modèles de climat du projet CMIP3 (modèles de climats utilisés par le GIEC). Ces runs de contrôle qui couvrent plusieurs centaines d'année, ne contiennent pas de forçage extérieur (pas d'activité solaire, volcanique ou humaine) : ils représentent donc la variabilité interne du système climatique. Le fait que ces runs reproduisent la basse fréquence responsable des tendances altimétriques du niveau de la mer dans le Pacifique Tropical suggère une origine naturelle à ces tendances. Nous avons vérifié que les émissions anthropiques de gaz à effet de serre ne jouaient pas encore de rôle prépondérant dans ces tendances en comparant les résultats précédents avec les simulations CMIP3 du climat du XXème siècle qui contiennent tous les forçages anthropiques (activité solaire, volcanique et humaine).

1 article publié : **Meysignac et al. (2012b)**.

*Autres études sur le niveau de la mer*

Niveau de la mer dans l'océan Arctique

Dans le cadre du projet européen MONARCH auquel nous avons participé, nous avons estimé l'évolution du niveau de la mer dans l'Océan Arctique à partir de données marégraphiques et altimétriques (le niveau de la mer de cette région a fait l'objet de très peu d'études jusqu'ici). Les données altimétriques utilisées sont celles retraitées par Pierre Prandi (CNES/CLS) dans le cadre de sa thèse. L'étude a montré qu'entre 1950 et le milieu des années 1990, le niveau de la mer est dominé par la variabilité interannuelle et est piloté par l'Oscillation Arctique. A partir du milieu des années 1990, une forte hausse est observée et attribuée au réchauffement des eaux océaniques en provenance de l'atlantique nord. Cependant l'analyse des données GRACE montre aussi une importante augmentation de la composante de masse, résultant des redistributions des masses d'eau par la circulation. Ces études ont fait l'objet de 3 publications (**Henry et al., 2012b, Prandi et al., 2012a, 2012b, Koldunov et al., 2012**).

## Participants au projet

<b>Benoît Meyssignac</b>	CNES/GS/GOHS
<b>Anny Cazenave</b>	CNES Emérite
<b>Olivier Henry</b>	CNRS (CDD)
<b>Hindumathi Palanisamy</b>	CNRS (CDD depuis 2011)
<b>Simon Munier</b>	Univ. de Washington
<b>Habib Boubacar-Dieng</b>	Stagiaire Master 2 Univ. Paul Sabatier, Toulouse
<b>Thierry Delcroix</b>	OMP/LEGOS
<b>Rose-Marie Morrow</b>	OMP/LEGOS