

Variabilité de surface océanique à partir des données des altimètres Topex, Jason-1 et Jason-2

M. HADDAD, H. TAIBI, R. RAMDANI et E. H. BAYOUD

Centre des Techniques Spatiales, 1 Avenue de Palestine. BP 13 Arzew. Oran 31200. Algérie
haddad_mahdi@yahoo.fr, taibihabib@gmail.com, rabeh.ram@gmail.com, houribayoud@gmail.com

ملخص: يلخص هذا المقال دراسة تغيرات المستوى المتوسط لسطح البحر، على المستوى الإجمالي وعبر المحيطات الثلاثة (المحيط الهادئ، المحيط الأطلسي والهندي)، وتمثيلها بواسطة نماذج رياضية.

تم استعمال التقنيات الثلاثة SSA - Spectrum Analysis و Dynamic Harmonic Regression-DHR، Singular Seasonal-Trend Decomposition Based on Loess-LOESS لمعالجة السلاسل الزمنية لشذوذ ارتفاع سطح البحر، التي تم قياسها من قبل مختلف البعثات الساتلية لقياس الارتفاعات (توبكس / بوسيدون، جايسون-1 و جايسون-2) خلال الفترة الممتدة ما بين 1993 و 2010. وقد سمحت لنا هذه التقنيات استخراج من السلاسل الزمنية لشذوذ ارتفاع سطح البحر، و اشارات مستقلة و قابلة للتحليل ممثلة في التركيبة الرئيسية للاتجاه، تركيبة التغيرات الفصلية و تركيبة "الضجيج".

كنتائج محددة لهذا البحث: قدرت زيادة ارتفاع المستوى المتوسط الإجمالي للمحيطات و البحار بـ 3.17 ملم سنويا خلال الفترة 1993-2010. إذا استمرت هذه الزيادة، يمكن ان يصل ارتفاع المستوى المتوسط الإجمالي الى ما يعادل 30 سم مع نهاية القرن مما يؤدي إلى آثار سلبية على المناطق الساحلية. و تعتبر مساهمة المحيط الهندي الأهم بقيمة 3.78 ملم سنويا خلال الفترة المعتبرة.

في سياق ظاهرة الاحتباس الحراري تسمح الاتجاهات الدقيقة بتسليط الضوء على الارتفاع البيئي لمستوى سطح المحيطات تحت التأثير المشترك للتمدد الحراري، ذوبان الجليد و هطول الأمطار،... الخ.

الكلمات الأساسية: قياس الارتفاعات بواسطة السواتل، تغيرات مستوى سطح البحر، المستوى المتوسط، السلاسل الزمنية، التركيبة الرئيسية للاتجاه، تركيبة التغيرات الفصلية.

Résumé: Cet article résume l'étude de la variabilité du niveau moyen à l'échelle globale et à l'échelle des trois océans (Pacifique, Atlantique et Indien) à partir des données d'altimétrie spatiale, ainsi que sa représentation par un modèle mathématique.

Les trois méthodes d'analyse: Singular Spectrum Analysis -SSA, Dynamic Harmonic Regression -DHR et Seasonal-Trend Decomposition Based on Loess - LOESS ont été appliquées sur des séries d'anomalies moyennes de hauteur de la mer (sea level anomalies-SLA), issues des mesures recueillies par les différentes missions d'altimétrie spatiale (Topex/Poseidon, Jason-1 et Jason-2) sur la période 1993-2010. Ces méthodes nous ont permis d'extraire de ces séries pluriannuelles de mesures altimétriques, des signaux indépendants et interprétables, représentant la composante principale de la tendance, la composante de saisonnalité (ou oscillation) et la composante bruit.

Comme résultats particuliers de cette étude: la hausse du niveau moyen global est estimée à 3.17 mm/an durant la période 1993-2010. Si cette tendance continue, le niveau moyen global pourrait monter de 30 cm à la fin du siècle, ce qui impliquera des répercussions négatives pour les zones côtières. Aussi, la contribution de l'Océan Indien est la plus importante avec une valeur de 3.78 mm/an sur la période considérée.

Dans le contexte du réchauffement de la planète, les tendances infimes mettent en évidence l'élévation lente du niveau moyen des océans sous l'effet conjugué de la dilatation thermique due à l'effet stérique, de la fonte des glaces et des glaciers, des précipitations, etc.

Mots clés: Altimétrie spatiale, variabilité de surface, niveau moyen, séries temporelles, tendance, saisonnalité.

Abstract: This paper summarizes the study of mean sea level variability at global scale and over the three oceans (Pacific, Atlantic and Indian) from altimetry data and its representation by mathematic models.

Three methods of analysis: Singular Spectrum Analysis -SSA, Dynamic Harmonic Regression -DHR and Seasonal-Trend Decomposition Based on Loess - LOESS, were applied to mean sea level anomalies-SLA time series, obtained from TOPEX, Jason-1 and Jason-2 measurements over the period 1993-2010. These methods allowed us to extract from the multiyear series of altimeter measurements, independent and interpretable signals representing the main component of the trend, the seasonal component (or oscillation) and the noise component.

As specific results of this study: the global mean sea level rise is estimated as 3.17 mm / year during the period 1993-2010. If present trend continues, the global mean sea level could rise by 30 cm at the end of the century, which implies a negative impact on coastal areas. Also, the major contribution to the global sea level rise during 1993-2010 is from the Indian Ocean (3.78 mm/year).

In the context of global warming, the estimated trends reveal the slow rise of the mean sea level under the combined effect of thermal expansion due to the steric effect, glaciers melting, ice sheets mass loss, precipitations, etc.

Key words: satellite altimetry, surface variability, mean sea level, time series, trend, seasonality.

1. Introduction

Au cours de l'Histoire de la Terre, le niveau de la mer a fluctué sur des échelles de temps diverses. Des observations géologiques nous apprennent notamment que lors du dernier maximum glaciaire il y a 20 000 ans, le niveau marin était environ 120 mètres plus bas que celui d'aujourd'hui, l'hémisphère nord étant en grande partie recouvert de glace. Par la suite, lors de la fonte des calottes glaciaires, le niveau des océans a progressivement remonté de 10 mm environ par an entre 15 000 et 6000 ans avant notre ère (GIEC, 2001). Depuis, la montée eustatique du niveau de la mer s'est produite à un rythme moyen de 0.5 mm/an durant les 6000 dernières années, et de 0.1 à 0.2 mm/an durant les 3000 dernières années. Au cours des derniers 1000 ans et avant le 20^{ème} siècle, le taux de variation du niveau de la mer aurait été inférieur à 0.2 mm/an (Lambeck et Bard, 2000; Lambeck et al., 2002).

Alors que le niveau moyen de la mer s'est très peu élevé au cours des 1000 dernières années (moins de 0.2 mm/an), des analyses récentes utilisant les mesures des marégraphes historiques indiquent une hausse du niveau global de la mer largement supérieure, d'environ 1.5 à 2 mm/an pour le 20^{ème} siècle (Douglas, 200 ; Peltier, 2001; Church et al., 2004; Holgate and Woodworth, 2004). Cette hausse de 15 à 20 cm en un siècle (supérieure d'un facteur 10 par rapport aux siècles précédents) est l'objet d'un intérêt considérable dans le contexte actuel du réchauffement climatique observé depuis quelques décennies. Cependant la tendance des marégraphes est très hétérogène à travers le monde. En effet, les longues séries de relevés marégraphiques sont concentrées dans les ports des pays industrialisés de l'hémisphère nord, d'où une hétérogénéité de la répartition spatiale des résultats. La hausse séculaire du niveau de la mer telle qu'enregistrée par les marégraphes pourrait ne pas être représentative en terme de moyenne globale (Holgate and Woodworth, 2004). Néanmoins ces marégraphes historiques présentent un intérêt scientifique évident car ils constituent l'unique témoin des variations du niveau marin du siècle passé. La connaissance des variations absolues du niveau de la mer à l'aide des données marégraphiques reste encore aujourd'hui un défi. Mais grâce à l'altimétrie spatiale, il y a accès à un moyen d'observation du niveau de la mer complémentaire aux mesures marégraphiques.

En effet, le niveau moyen global des océans est calculé à partir des données altimétriques, de façon continue depuis Janvier 1993. Les phases de "vérification" où les satellites se suivent de très près (Jason1-Topex/Poseidon puis Jason2-Jason1), permettent de raccorder ces différentes missions, en déterminant précisément le biais existant entre chacune d'elles. L'analyse de ces observations spatiales indique une hausse de niveau de la mer de 3.17 mm/an sur la période 1993-2011 (Aviso Altimetry), valeur qui est sensiblement plus grande que celle indiquée par les marégraphes pour tout le 20^{ème} siècle (d'environ 1.5 à 2 mm/an). Les observations par satellite ont révélé que l'élévation du niveau de la mer n'est pas uniforme. Il existe des différences régionales marquées variant entre -10 et 10 mm/an (Aviso Altimetry).

Cette recherche est consacrée à l'étude de la variabilité du niveau moyen à l'échelle globale (ensemble des océans et des mers) et des trois océans (Pacifique, Atlantique et Indien) à partir de séries temporelles d'anomalies moyennes de hauteur de la mer (sea level anomalies -SLA), issues des mesures

d'altimétrie spatiale (Topex, Jason-1 et Jason-2) et qui bénéficient d'une couverture temporelle de 18 ans (1993-2010). Il s'agit ici d'extraire, par l'application de techniques appropriées, des séries pluriannuelles de mesures altimétriques, des signaux indépendants et interprétables, représentant la composante principale de la tendance, la composante de saisonnalité (ou l'oscillation) et la composante bruit.

Dans un premier temps, seront présentées les séries temporelles d'anomalies moyennes de hauteur de la mer utilisées, qui traduisent la variabilité de la topographie de surface. Ensuite, seront décrites les méthodes d'analyse utilisées pour la décomposition des séries utilisées en composantes identifiables (la tendance, les variations saisonnières et les résidus) et enfin seront présentés les principaux résultats obtenus.

2. Données utilisées

Nous avons exploité quatre séries temporelles d'anomalies moyennes de hauteur de la mer (Mean Sea Level Anomalies - MSLA) issues des trois missions spatiales Topex, Jason-1 et Jason-2 (Nerem et al., 2010). Ces séries calculées par l'Université du Colorado sur la période de janvier 1993 à décembre 2010 sont fournies avec une résolution mensuelle (une donnée par mois). Ces séries couvrent les régions suivantes: l'ensemble des océans et des mers (échelle globale), l'Océan Pacifique, l'Océan Atlantique et l'Océan Indien. Le tableau 1 décrit les paramètres utilisés dans le calcul des séries d'anomalies moyennes de hauteur de la mer (Nerem et al., 2010). La figure 1 représente les séries temporelles d'anomalies moyennes de hauteur de la mer utilisées.

Tableau 1. Paramètres et corrections utilisés pour le calcul des séries temporelles d'anomalies moyennes de hauteur de la mer (Nerem et al., 2010).

Paramètre	Topex	Jason-1	Jason-2
Période	1992-12-06 à 2002-01-10	2002-01-15 à 2008-07-02	à partir de 2008-07-03
Données	MGDR-B	GDR-C	GDR-T
Orbite	STD0905 (Lemoine et al., 2010)		
Mesure et Corrections			
Troposphère sèche	GDR (ECMWF)		
Troposphère humide	TMR (Replacement Product v.1.0)	GDR-C (Cycles 1-227); Produit de remplacement JMR (Cycles 228-259)	AMR (GDR)
Ionosphère	GDR		
Biais d'Etat de Mer	CLS Collinear v. 2009 (Tran et al. 2010)		
Centre de gravité	MGDR-B	/	
Surface de la mer moyenne & corrections			
Surface de la mer moyenne	CLS01		
Marée océanique & Surcharge	GOT4.7 (Ray 1999)		
Marée solide (ou terrestre)	GDR (Cartwright et Tayler 1971; Cartwright et Edden 1973)		
Marée polaire	GDR (Wahr 1985)		
Pression atmosphérique (baromètre inverse)	AVISO Dynamic Atmosphere Correction (DAC) qui combine MOG2D haute fréquence et signaux baromètre inverse basse fréquence (Pascual et al., 2008)		
Ajustement isostatique glaciaire (GIA)	-0.3 mm/an (Peltier 2001, 2002, 2009; Peltier and Luthcke 2009)		
Corrections de traitement			
Biais Inter-Missions	88.48 mm (Topex à Jason-1)	58.52 mm (Jason-1 à Jason-2)	
Profondeur minimale de l'océan	120 m		
Élimination des valeurs aberrantes	anomalie supérieure à 2 m		

3. Méthodes utilisées

Afin d'analyser les séries d'anomalies moyennes de hauteur de la mer dont nous disposons, nous avons employé trois techniques largement utilisées dans le domaine de l'analyse des séries temporelles. Il s'agit de: Singular Spectrum Analysis - SSA, Dynamic Harmonic Regression -DHR et Seasonal-Trend Decomposition Based on Loess - LOESS. Dans ce qui suit, une description générale de ces trois méthodes d'analyse est présentée.

3.1 Singular Spectrum Analysis (Analyse singulière spectrale)

La formulation mathématique de la technique d'Analyse Spectrale Singulière (Singular Spectrum Analysis - SSA) se base sur le calcul des vecteurs propres de la matrice d'auto-covariance, voir [Golyandina et al., 2001; Hassani, 2007]. On décompose son procédé en trois étapes:

Étape 1. Choix d'un retard de covariance M (covariance-lag M): C'est l'étape la plus délicate puisque cela revient en fait à tester une certaine périodicité et donc à bien connaître les effets liés à la série étudiée (de taille N). Une fois M choisi, on découpe le signal M en morceaux de longueur de sorte que:

$$D = \begin{bmatrix} x(1) & x(2) & \dots & x(M) \\ x(2) & x(3) & \dots & x(M+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x(N-M+1) & x(N-M+2) & \dots & x(N) \end{bmatrix} \quad (1)$$

La matrice d'auto-covariance C est de taille (M,M) et s'écrit : $C = D^*D$.

Étape 2. Étude des valeurs propres de la matrice C : On détermine les M valeurs propres de la matrice C . En les représentant dans un diagramme à barres en ordre décroissant, on identifie immédiatement les valeurs propres isolées et les valeurs propres proches. D'une manière générale, la théorie de la SSA donne:

- valeur propre isolée = tendance,
- deux valeurs propres proches = signal périodique,
- les petites valeurs propres constituent le bruit du signal.

Étape 3. Projection de la série originale sur les vecteurs propres et reconstruction des composantes.

3.2 Dynamic Harmonic Regression (Modèle de régression dynamique harmonique)

La régression dynamique harmonique (DHR) est un cas particulier du modèle univarié de composante inobservée (*univariate unobserved component (UC) model*).

Cette technique a été développée pour l'analyse des séries chronologiques non-stationnaire au Centre de Recherche sur les Systèmes Environnementaux (CRES) de l'Université de Lancaster. Le modèle DHR peut être utilisé pour la prévision (*forecasting*), l'analyse rétrospective (*badcasting*), l'interpolation sur des données manquantes (*missing values*), l'extraction du signal et la correction des variations saisonnières. Nous présentons ci-dessous la description mathématique du modèle DHR (pour plus de détails, voir (Ng et Young, 1990), (Young, 1994) et (Young et al., 1999).

Le modèle DHR décompose, une série temporelle y_t sous forme d'un modèle additif :

$$y_t = T_t + C_t + e_t \quad e_t \sim N(0, \sigma^2) \quad (2)$$

où : T_t est la composante de tendance qui reflète la progression lente des termes de la série, C_t représente la composante saisonnière ou harmonique (terme de variation saisonnière) et e_t représente la composante irrégulière ou 'bruit' qui décrit les influences aléatoires (Irrégulières).

Le terme saisonnier est modélisé comme une somme du signal fondamental et ses harmoniques associées:

$$C_t = \sum_{i=1}^N [a_{i,t} \cos(\omega_i t) + b_{i,t} \sin(\omega_i t)] \quad (3)$$

$a_{i,t}$ et $b_{i,t}$ sont appelés paramètres stochastiques variables dans le temps (*Stochastic Time Variable Parameters -TVP*), ω_i est la fréquence liée à la série temporelle, déterminée par un processus autorégressif (AR) du spectre (Tych et al., 2002). Le problème de l'estimation de $a_{i,t}$ et $b_{i,t}$ est formulé dans un contexte d'espace d'état stochastique, puis résolu par le filtre de Kalman et par des algorithmes de lissage à intervalles fixes (*Fixed Interval Smoothing Algorithms*). Des informations détaillées sur le processus d'estimation sont données dans les références citées ci-dessus.

La composante de tendance T_t peut aussi être considérée comme un terme de fréquence nulle ($\omega_i = 0$) incorporé dans la somme du terme cyclique. Elle peut être extraite en utilisant une marche aléatoire intégrée (*Integrated Random Walk - IRW*) avec l'approche de modélisation de bruit.

3.3 Seasonal-Trend Decomposition Based on Loess

La méthode 'Seasonal Trend Decomposition of Time Series by Loess' (LOESS) est une méthode non-paramétrique qui, à partir d'un modèle additif, décompose une série temporelle

en trois composantes :

tendance (T_t), saisonnalité (C_t) et résidus (ε_t) :

$$y_t = T_t + C_t + \varepsilon_t \quad (4)$$

Selon (Johnson et al., 2008; Lu et al., 2001), la flexibilité et la simplicité de la technique LOESS et la performance de calcul offrent la possibilité de traiter aisément un grand volume de données.

STL (Seasonal-Trend by LOESS) est une procédure itérative qui utilise des fonctions de régression locale pondérée, appelée LOcally wEighted regreSsion Smoother – LOESS et initialement proposée par (Cleveland, 1979) et développée par (Cleveland and Delvin, 1988). Chaque point (x_0, y_0) dans l'ensemble de données est remplacé par une régression linéaire sur les points (x_i, y_i) de son voisinage, affectés d'une pondération dépendant de l'éloignement $|x_i - x_0|$ par rapport au point (x_0, y_0). Il s'agit d'un lissage non paramétrique déterminé par le nombre de points participant aux régressions locales. Les paramètres à définir sont la taille du voisinage et le degré du polynôme pour la fonction d'ajustement (constant, linéaire ou quadratique).

4. Résultats expérimentaux

4.1 Singular spectrum analysis (SSA)

L'objectif est de décomposer chaque série d'anomalies moyennes de hauteur de la mer (indépendamment des autres) en une somme de composantes. Tel que chaque composante dans cette somme peut être identifiée comme étant la composante tendance, la composante de saisonnalité et la composante bruit. Pour cela, nous cherchons tout d'abord à identifier les composantes harmoniques de

chaque série (ajustement saisonnier).

Dans le cadre de la SSA, l'approche simple pour l'extraction de la tendance consiste à reconstruire cette composante à partir des plus grandes valeurs singulières par l'intermédiaire d'une inspection visuelle. Cependant, une partie de la tendance peut exister dans d'autres composantes (Hassani 2007).

Ainsi, le jugement personnel est ici d'une importance capitale. Pour surmonter ce problème, nous avons utilisé dans notre application l'approche automatique, développée par le Dr. Theodore Alexandrov de l'université de Brême (Allemagne), pour l'extraction de la tendance et l'identification des composantes harmoniques. Cette approche automatique est décrite dans (Alexandrov et Golyandina 2005; Alexandrov 2009) et est implémentée dans le logiciel AutoSSA¹ sous Matlab.

Notons ici que la longueur de la fenêtre "covariance-lag M" est le seul paramètre dans l'étape de décomposition. Selon Golyandina et al. (2001), le covariance-lag agit comme une fenêtre sur le signal; il doit être suffisamment long pour englober la période du signal recherchée (exactement comme en analyse spectrale de Fourier). Dans notre cas, toutes les séries du niveau moyen ont la même longueur: N=216; elles contiennent des données mensuelles et chaque série temporelle a une composante saisonnière annuelle évidente (T=12). Ainsi, en utilisant la recommandation citée, nous avons choisi la longueur de la fenêtre M=N/2=108.

Les couples obtenus de valeurs propres correspondant aux composantes harmoniques et leurs contributions et par série originale sont donnés dans le Tableau 2.

Tableau 2. Contribution des composantes harmoniques identifiées par région et leurs périodicités.

Région	Contribution des composantes harmoniques (%)	Périodicité (mois)
Niveau moyen global -66N:66N, 30E:390E	[3(1.674%) - 4(1.645 %)], [6(0.222%) - 7(0.217 %)], [19(0.035%) - 20(0.034 %)], [23(0.027%) - 24(0.026%)], [28(0.015%) - 29(0.015 %)]	11.962, 6.361, 5.696, 3.507, 3.627
Océan Pacifique Coordonnées : 0N, -160E	[3(3.198%) - 4(3.146%)], [11(0.340%) - 12(0.337%)], [15(0.256%) - 16(0.252%)], [17(0.239%) - 18(0.237%)]	12.022, 6.000, 10.785, 4.019
Océan Atlantique Coordonnées : 0N, -28E	[2(14.791%) - 3(13.849%)], [5(0.975%) - 6(0.946%)], [11(0.375%) - 12(0.360%)]	12.183, 5.998, 3.881
Océan Indien Coordonnées : -15N, 80E	[2(6.192%) - 3(6.039%)], [15(0.239%) - 16(0.234%)], [17(0.218%) - 18(0.209%)], [29(0.145%) - 30(0.144%)]	12.022, 2.617, 4.352, 3.643

¹ Disponible sous <http://www.pdmi.ras.ru/~theo/autossa>

Une fois les composantes harmoniques identifiées, nous avons extrait la composante tendance de chaque série ajustée.

La reconstruction des saisonnalités totales sont représentées en rouge dans la Figure 2, alors que les tendances obtenues sont représentées en rouge dans la Figure 3.

4.2 Dynamic Harmonic Regression (DHR)

Le modèle structurel pour chaque série temporelle est composé d'une tendance et de composantes saisonnières, dont les périodicités ont été définies précédemment par l'utilisation de la technique SSA (voir Tableau 2). Nous supposons que tous les paramètres temporellement variables varient sous la forme d'une marche aléatoire intégrée (*Integrated Random Walk*).

La première étape de l'analyse consiste à optimiser les hyper-paramètres du ratio de variance du bruit (*Noise Variance Ratio - NVR*) du modèle. Une optimisation du domaine fréquentiel est utilisée pour cette tâche, sur la base de l'ajustement du modèle DHR.

Les résultats de l'analyse spectrale par région sont présentés dans la Figure 4, qui montre pour chaque série temporelle le spectre identifié réel (ligne bleue: basé sur un processus autorégressif, modèle AR (16) de la série et celui adapté par le modèle DHR (ligne rouge). L'analyse spectrale reconnaît bien les périodicités utilisées pour l'analyse (pics).

Enfin, le filtre de Kalman et l'algorithme de lissage à intervalle fixe (*Fixed Interval Smoothing*) sont utilisés pour estimer le modèle (tendance et saisonnalités), sur la base des valeurs *NVR* optimisées.

La reconstruction des saisonnalités totales sont représentées en bleu dans la Figure 2, alors que les tendances obtenues sont représentées en bleu dans la Figure 3. Notons ici que ces résultats sont obtenus par un appel direct de la fonction DHR de la boîte à outils Captain² (Taylor et al., 2007).

4.3 Seasonal-Trend Decomposition Based on Loess (STL)

La technique LOESS est implémenté dans R³ pour les séries temporelles par la fonction STL. Cette fonction renvoie un objet de classe STL comportant en particulier une composante appelée *time series* qui est une série temporelle multiple composée de colonnes appelées *trend*, *seasonal* et *remainder*, correspondant respectivement à la tendance, l'effet saisonnier et le reste (résidus).

Le premier argument de la fonction STL est la série temporelle et le second argument (appelé *s.window*) est soit le mot-clé 'periodic', soit une valeur numérique indiquant la taille de la fenêtre pour extraire localement les données.

La reconstruction des saisonnalités totales sont représentées en vert dans la Figure 2, alors que les tendances obtenues sont représentées en vert dans la Figure 3.

4.4 Vitesses de variation

Le taux de variation linéaire du niveau moyen par région est estimé par l'application des moindres carrés sur les tendances extraites par l'utilisation des trois techniques: SSA, DHR et STL (Figure 3). Les taux estimés sur la période 1993-2010 en mm/an sont donnés dans le Tableau 3.

Tableau 3. Taux de variation des niveaux moyens sur la période 1993-2010.

Région	SSA Taux de variation (mm/an)	DHR Taux de variation (mm/an)	STL (LOESS) Taux de variation (mm/an)	Moyenne (mm/an)
Niveau moyen global -66N:66N, 30E:390E	3.18 ±0.03	3.17 ±0.03	3.16 ±0.03	3.17
Océan Pacifique Coordonnées : 0N, -160E	2.56 ±0.07	2.59 ±0.07	2.57 ±0.06	2.57
Océan Atlantique Coordonnées : 0N, -28E	2.47 ±0.07	2.85 ±0.05	2.86 ±0.04	2.73
Océan Indien Coordonnées : -15N, 80E	3.78 ±0.08	3.78 ±0.07	3.77 ±0.06	3.78

² Disponible à partir du site: <http://www.es.lanccs.ac.uk/cres/captain/download.html>.

³ R³ est un langage de programmation interactif interprété et orienté objet contenant une très large collection de méthodes statistiques et des facilités graphiques importantes. C'est un clone gratuit du logiciel S-Plus commercialisé par MathSoft et développé par Statistical Sciences autour du langage S (conçu par les laboratoires Bell). Initié dans les années 90 par Robert Gentleman et Ross Ihaka (Département de Statistique, Université d'Auckland, Nouvelle-Zélande), auxquels sont venus depuis s'ajouter de nombreux chercheurs, le logiciel R constitue aujourd'hui un langage de programmation intégré d'analyse statistique. Le site Internet de la "R core-development Team", <http://www.r-project.org>, est la meilleure source d'informations sur le logiciel R. On peut y trouver les différentes distributions du logiciel, de nombreuses bibliothèques de fonctions et des documents d'aide. Des bibliothèques supplémentaires sont aussi disponibles sur le "comprehensive R archive network" (CRAN) <http://lib.stat.cmu.edu/R/CRAN/>.

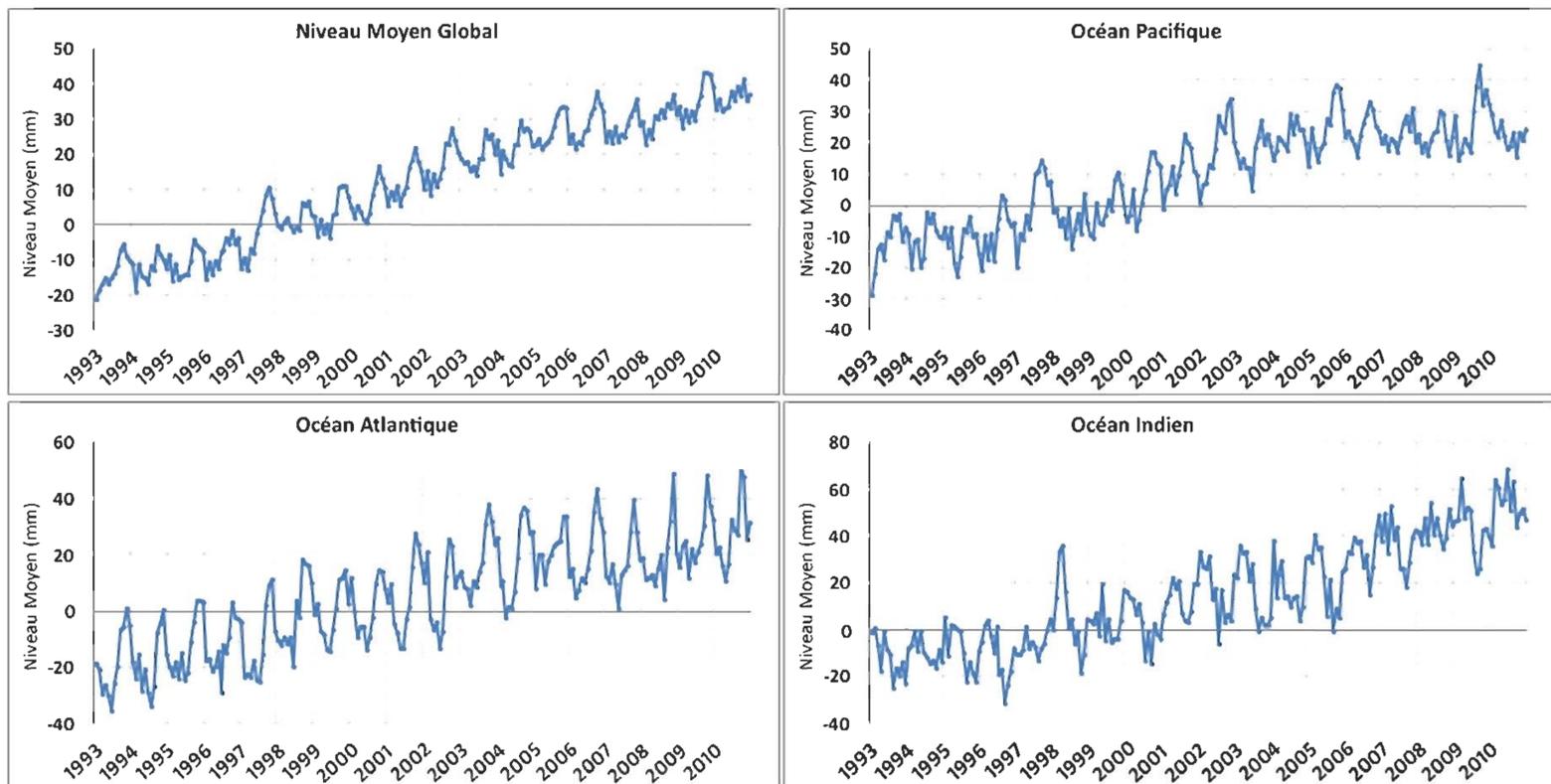


Fig. 1 Séries temporelle d'anomalies moyennes de hauteur de la mer : Niveau global des océans et mers, Océan Pacifique, Océan Atlantique et Océan Indien.

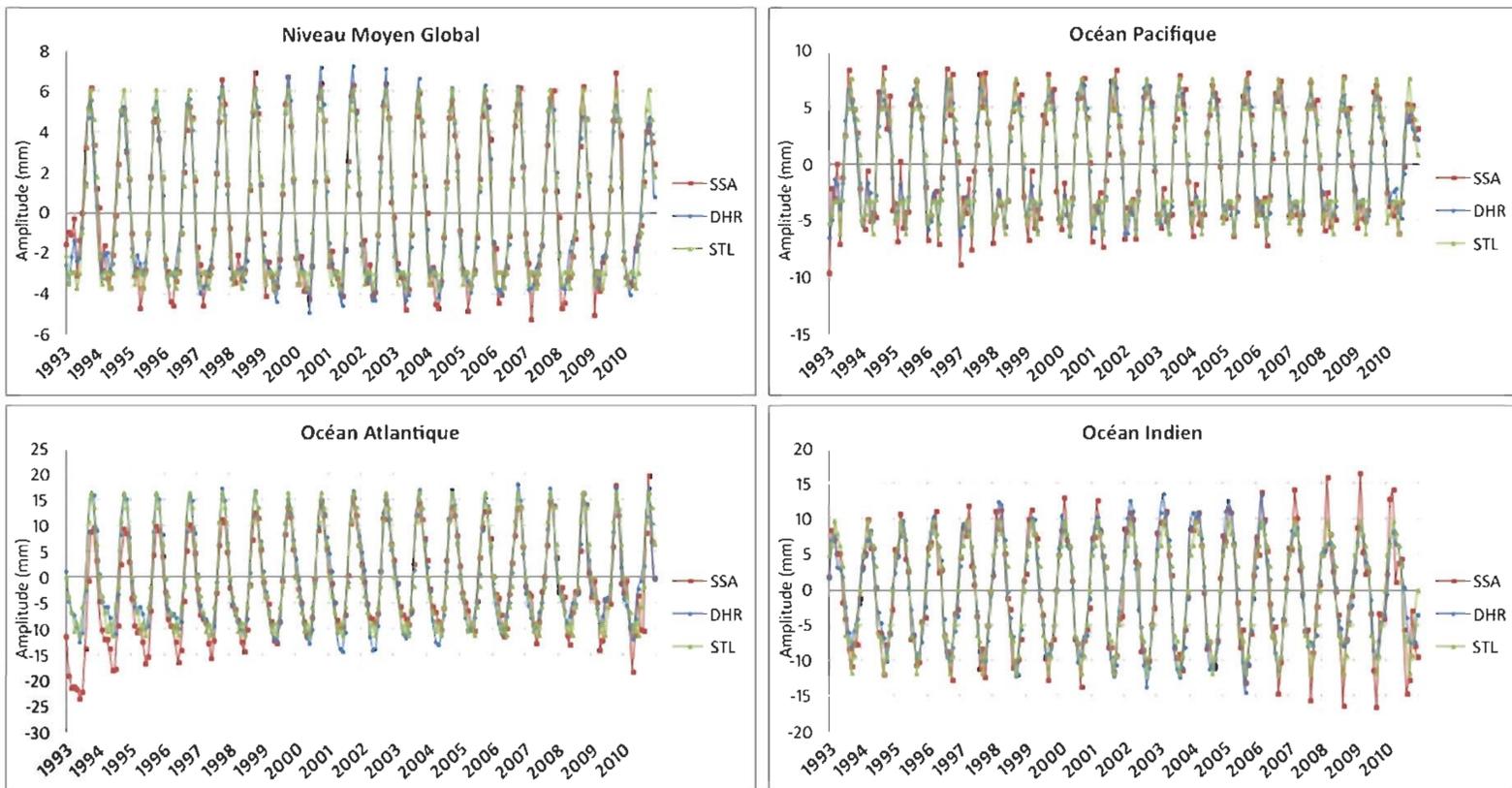


Fig. 2 Saisonnalités extraites (en rouge par la technique SSA, en bleu par la technique DHR et en vert par la technique LOESS).

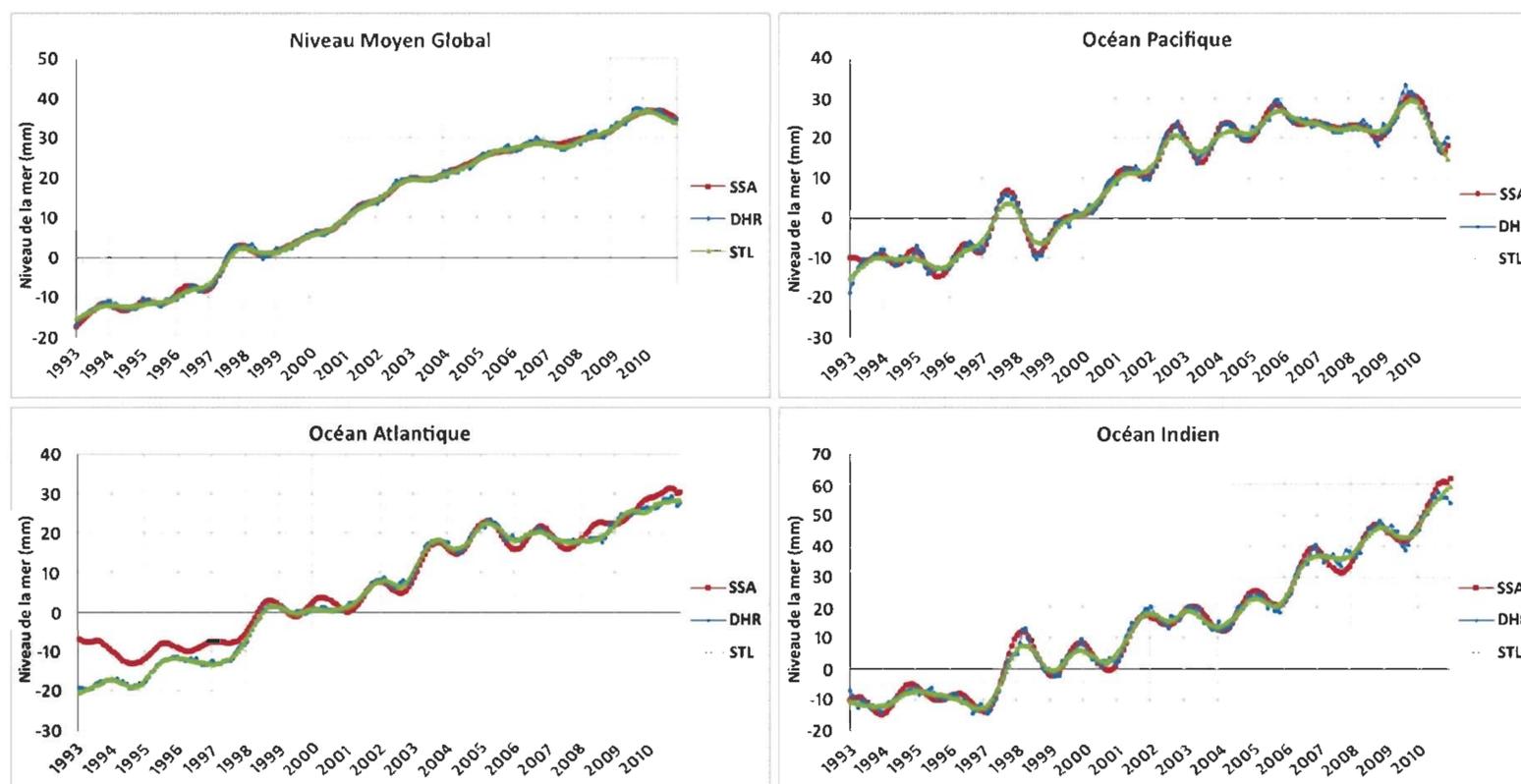


Fig. 3 Tendances extraites (en rouge par la technique SSA, en bleu par la technique DHR et en vert par la technique LOESS).

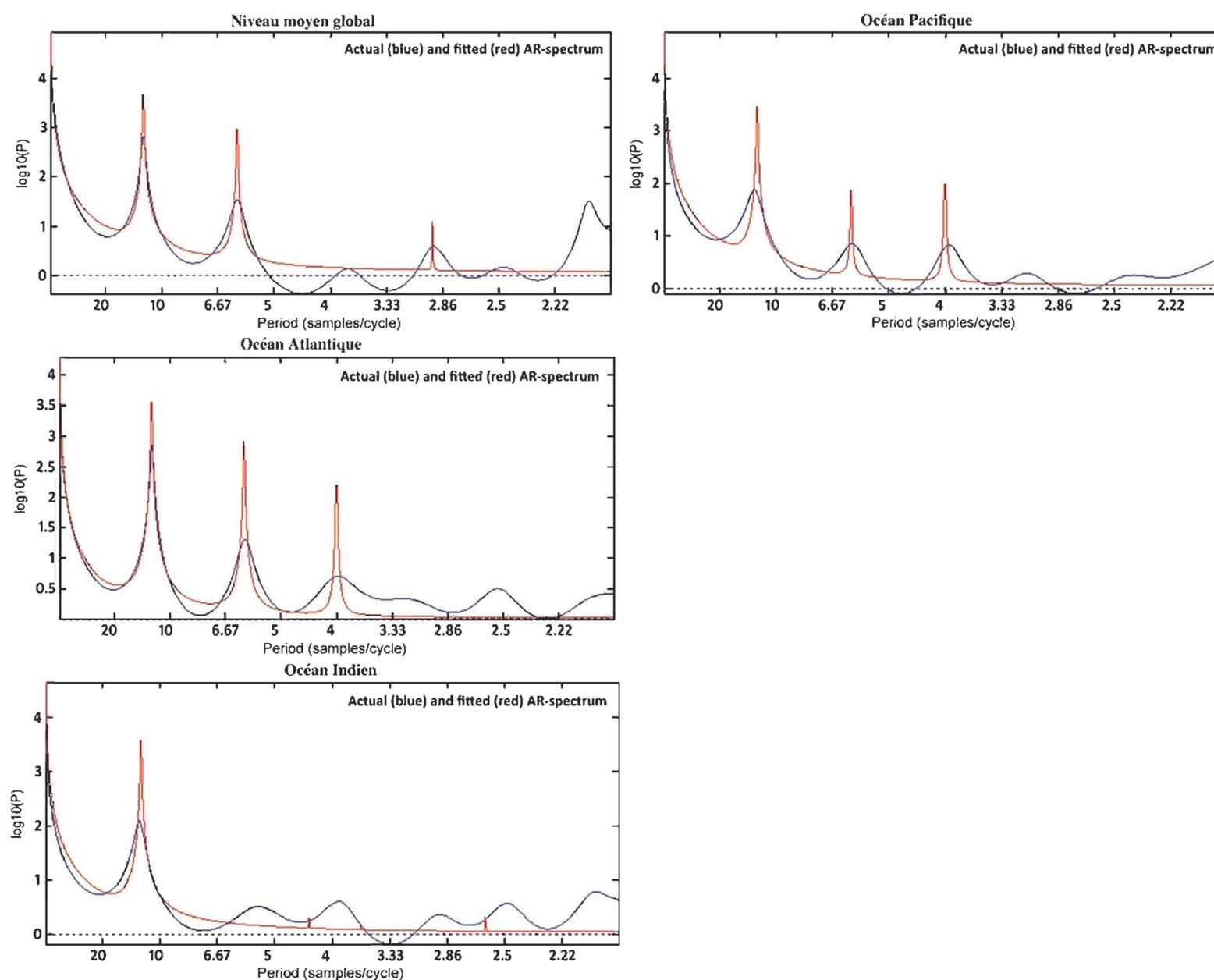


Fig. 4 Spectres estimés (bleu) et ajustés AR-16 (rouge): Niveau global des océans et mers, Océan Pacifique, Océan Atlantique et Océan Indien.

5. Conclusion

La variation de niveau des mers est un paramètre géophysique fondamental dans les études météorologiques, océanographiques et un indicateur important pour notre climat; l'océan joue un rôle fondamental dans l'évolution du climat. Il contrôle les variations climatiques à moyen et long terme s'échelonnant de la décennie au millénaire. En interaction avec l'atmosphère, il contrôle aussi les variations climatiques à plus court terme, saisonnières, annuelles ou pluriannuelles. Du fait de sa capacité calorifique mille fois supérieure à celle de l'atmosphère et de sa dynamique interne plus lente, il est en quelque sorte le "gardien des équilibres". La circulation océanique contribue notamment à l'équilibre thermique de la planète en réalisant une partie du transport méridien de chaleur de l'équateur vers les pôles.

L'objectif principal de ce travail de recherche était de tirer profit du potentiel de l'altimétrie spatiale pour le suivi de la variabilité de surface océanique. Pour arriver à ce but, nous avons exploité quatre séries d'anomalies moyennes de hauteur de la mer, issues des trois missions spatiales Topex, Jason-1 et Jason-2 et calculées par l'Université du Colorado. Ces produits ont l'avantage d'être bien adaptés pour l'étude de la partie variable du signal océanique. Ces séries, qui couvrent la période de janvier 1993 à décembre 2010 à une résolution mensuelle, concernent les régions suivantes: l'ensemble des océans et mers, l'Océan Pacifique, l'Océan Atlantique et l'Océan Indien.

Par application de trois méthodes d'analyse de séries temporelles, en l'occurrence: Singular Spectrum Analysis - SSA, Dynamic Harmonic Regression - DHR et Seasonal-Trend Decomposition Based on Loess - LOESS, nous avons décomposé chaque série en composantes identifiables:

- la tendance qui traduit l'aspect général de la série et représente l'évolution à long terme du niveau moyen de la mer,
- les variations saisonnières qui sont liées au rythme imposé par les saisons,
- les fluctuations irrégulières/résidus/bruit, qui sont des variations de faible intensité, de courte durée et de nature aléatoire.

Les résultats obtenus par l'application des trois méthodes (SSA, DHR et STL) sont cohérents. Le niveau moyen global est caractérisé par une tendance dominante croissante: le niveau s'est élevé de -17 mm à +35 mm sur la période de 1993 à 2010, soit une vitesse de 3.17 mm/an.

Alors que les vitesses d'élévation de l'Océan Pacifique, de l'Océan Atlantique et de l'Océan Indien sont estimées à 2.57 mm/an, 2.73 mm/an et 3.78 mm/an, respectivement. Si ces tendances continuent, le niveau moyen global pourrait monter de 30 cm à la fin du siècle, ce qui impliquera des répercussions négatives pour les zones côtières.

Notons par ailleurs, qu'à l'heure actuelle Topex/Poséidon n'est plus en fonctionnement mais le programme Jason assure la continuité opérationnelle de la collecte et de la distribution de données de haute précision. D'ailleurs, Jason-2 est même capable, grâce à un nouvel algorithme de traitement des mesures à bord, de mieux définir les transitions terre/eau et donc de fournir une meilleure précision. En parallèle, vont être associés des travaux sur l'obtention de meilleures corrections de marées océaniques, d'un géoïde marin plus précis même à petite échelle, etc. conditions requises pour améliorer la connaissance de la dynamique des océans, notamment en zone côtières.

Références bibliographiques

- Alexandrov, T., 2009. *A Method of Trend Extraction using Singular Spectrum Analysis*, REVSTAT Statistical Journal, 7(1):1-22.
- Alexandrov, T., Golyandina, N., 2005. *Thresholds for methods of automatic extraction of time series trend and periodical components with the help of the 'Caterpillar'-SSA approach*. In: Proceedings of the IV International Conference 'System Identification and Control Problems' SICPRO'05, 1849-1864 (in Russian).
- Cartwright, D., Edden, A., 1973. *Corrected Tables of Tidal Harmonics*. Geophysical Journal International 33(3): 253-264.
- Cartwright, D., Tayler, R.J., 1971. *New Computations of the Tide-generating Potential*. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society 23(1): 45-73.
- Church, J.A., White, N.J., Coleman, R., Lambeck, K., Mitrovica, J., 2004. *Estimates of the regional distribution of sea level rise over the 1950-2000 period*. J. Climate 17: 2609-2625.
- Cleveland, S.W., 1979. *Robust Locally Weighted Regression and Smoothing Scatterplots*. Journal of the American Statistical Association, 74.
- Cleveland, W.S., Delvin, S.J., 1988. *Locally Weighted Regression: An Approach to Regression Analysis by Local Fitting*. Journal of the American Statistical Association, 83: 596-610.

- Douglas, B.C., 2001. *Sea level change in the era of the recording tide gauge*. In: Douglas, B.C., Kearney, M.S., Leatherman, S.P. (Eds.), *Sea Level Rise, History and Consequences*. Academic Press, San Diego, 37-64.
- Golyandina, N., Nekrutkin, V., and Zhigljavsky, A., 2001. *Analysis of Time Series Structure: SSA and related techniques*. Chapman & Hall/CRC.
- Hassani, H., 2007. *Singular Spectrum Analysis: Methodology and Comparison*. Journal of Data Science. Vol. 25: 239-257.
- Holgate, S.J. and Woodworth, P.L., 2004. *Evidence for enhanced coastal sea level rise during the 1990s*, Geophys. Res. Lett., 31,10.1029.
- Johnson, L., Cooke, B., Ramos, V.H., and Easson, G., 2008. *Use of NASA Satellite Assets for Predicting Wildfire Potential for Forest Environments in Guatemala*. In, Preliminary Report: University of Mississippi Geoinformatics Center.
- Lambeck, K. and Bard, E., 2000. *Sea-level change along the French mediterranean coast for the past 30 000 years*. Earth and Planetary Science.
- Lambeck, K., Yokoyama, Y. and Purcell, T., 2002. *Into and out of the last glacial maximum: sea-level changes during oxygen isotope stages 3 and 2*: Quaternary Science Reviews, v. 21. Letters, 175: 203-222.
- Lemoine et al., 2010. *Towards development of a consistent orbit series for TOPEX, Jason-1, and Jason-2*, Journal Advances in Space Research, 1513-1540 Lettre du CNES, N°139. Lancement de Topex/Poséidon -1992.
- Lu, H., Raupach, M.R., and McVicar, T.R., 2001. *Decomposition of Vegetation Cover into Woody and Herbaceous Components Using AVHRR NDVI Time Series*. In, Technical Report 35/01. Canberra (Australia): CSIRO Land and Water.
- Nerem, R.S., Chambers D., Choe, C. and Mitchum, G.T., 2010. *Estimating Mean Sea Level Change from the TOPEX and Jason Altimeter Missions*. Marine Geodesy, 33: sup 1, 435-446. doi: 10.1080/01490419.2010.491031.
- Ng, C.N., Young, P.C., 1990. *Recursive estimation and forecasting of nonstationary time series*. Journal of Forecasting 9: 173-204.
- Pascual A., Marta, M., Gomis, D., 2008. *Comparing the sea level response to pressure and wind forcing of two barotropic models: Validation with tide gauge and altimetry data*. Journal of Geophysical Research 113(C7).
- Pedregal, D.J., Taylor, C.J., and Young, P.C., 2007. *System Identification, Time Series Analysis and Forecasting. The Captain Toolbox Handbook v2.0*. Centre for Research on Environmental Systems and Statistics (CRES).
- Peltier, W.R., 2001. *Global glacial isostatic adjustment and modern instrumental records of relative sea-level history*, in Sea Level Rise, History and Consequences, edited by B.C. Douglas, M.S. Kearney, and S.P.
- Peltier, W.R., 2002. *Global glacial isostatic adjustment: palaeogeodetic and space-geodetic tests of the ICE-4G (VM2) model*. Journal of Quaternary Science 17(5-6): 491-510.
- Peltier, W.R., 2009. *Closure of the budget of global sea level rise over the GRACE era: the importance and magnitudes of the required corrections for global glacial isostatic adjustment*. Quaternary Science Reviews 28: 1658-1674.
- Peltier, W.R., Luthcke, S.B., 2009. *On the origins of Earth rotation anomalies: New insights on the basis of both "paleogeodetic" data and Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) data*. Journal of Geophysical Research 114(B11).
- Ray, A., 1999. *Global Ocean Tide Model From TOPEX/Poseidon Altimetry: GOT99.2*, Document Number 1999-209478, Institution NASA Goddard Space Flight Center
- Taylor, C.J., Pedregal, D.J., Young, P.C., and Tych, W., 2007. *Environmental Time Series Analysis and Forecasting with the Captain Toolbox. Environmental Modelling and Software 22: 797-814* (<http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.envsoft.2006.03.002>).
- Tran, N., Vandemark, D., Labroue, S., Feng, H., Chapron, B., Tolman, H.L., Lambin, J., and Picot, N., 2010. *Sea state bias in altimeter sea level estimates determined by combining wave model and satellite data*. Journal of Geophysical Research 115, C03020.
- Tych, W., Pedregal, D.J., Young, P.C., and Davies, J., 2002. *An unobserved component model for multi-rate forecasting of telephone call demand: the design of a forecasting support system*. International Journal of Forecasting 18(4): 673-695.
- Wahr, J.W., 1985. *Deformation of the Earth induced by polar motion*. J. of Geophys. Res. (Solid Earth), 90: 9363-9368.
- Young, P.C., 1994. *Time-variable parameter and trend estimation in nonstationary economic time series*. Journal of Forecasting 13(2):179-210.
- Young, P.C., Pedregal, D.J., and Tych, W., 1999. *Dynamic harmonic regression*. Journal of Forecasting 18(6): 369-394.