



RÉÉVALUATION DE LA MONTÉE DU NIVEAU MOYEN DES MERS VUE PAR LES ALTIMÈTRES (1993-2015)

REVALUATION OF MEAN SEA LEVEL RISE REVEALED BY ALTIMETRY (1993-2015)

MAHDI HADDAD

Centre des Techniques Spatiales. 1 Avenue de la Palestine,
BP 13 Arzew. Oran 31200. Algérie.

haddad_mahdi@yahoo.fr

RESUME

L'analyse des séries temporelles et plus particulièrement la prédiction à court et moyen terme, a connu un développement important au cours de ces dernières années. Cette étude a pour objectif l'analyse et la prédiction des variations du niveau moyen des océans et des mers. Dans cette perspective, la méthode de l'analyse spectrale singulière (SSA) a été appliquée sur la série temporelle d'anomalies moyennes de hauteur de mer, issue des mesures recueillies par les différentes missions d'altimétrie spatiale sur la période de janvier 1993 à décembre 2015.

Les résultats de cette analyse montrent que les enregistrements du niveau moyen présentent une tendance croissante claire, dont la contribution par rapport à la série initiale est de 98.49%. Cette tendance montre que le niveau moyen s'est élevé de 88,6 mm, en données corrigées des variations saisonnières, sur la période de 1993 à 2015. L'application de la régression linéaire indique une vitesse d'élévation de $3.36 \pm 0,4$ mm/an entre 1993 et 2015. Deux composantes saisonnières caractérisant les variations du niveau moyen ont été identifiées. Ces deux composantes ont des périodicités de 12 mois et de 6 mois, respectivement. La contribution totale de ces deux saisonnalités par rapport à la série temporelle initiale est de 1.1%. Le signal bruit obtenu, après élimination de la tendance et des saisonnalités identifiées, fluctue entre -4.81 et 5.59 mm, avec une moyenne de -0.03 mm. Une forte corrélation entre les valeurs

extrêmes du bruit et de l'Index ENSO Multivariables (MEI) est observée, telles que pour les forts événements *El Niño* de 1998 et *El Niña* de 2011.

Mots clés : Niveau moyen des mers, Analyse Spectrale Singulière, Décomposition, Reconstruction, Prédiction.

ABSTRACT

The time series analysis and especially forecasting at short and medium terms has undergone a significant development during recent years. This study aims to analysis and forecasting of changes in the global mean sea level. In this perspective, the singular spectrum analysis (SSA) method has been applied to sea level anomaly time series, collected from the various space altimetry missions over the period from January 1993 to December 2015.

The results show that the records of the global mean sea level have a clear increasing trend with a contribution in the initial series of 98.49%. This trend shows that the global mean sea level has risen with 88.6 mm, in seasonal adjusted data, over the period from 1993 to 2015. The application of linear regression indicates a rate of 3.36 ± 0.4 mm/year between 1993 and 2015.

Two seasonal components characterizing changes in the global mean sea level were identified. These two components have periodicities of 12 months and 6 months, respectively. The total contribution of these two harmonics in the initial time series is of 1.1%. The noise signal, obtained after removal of identified trend and seasonality components, fluctuates between -4.81 and 5.59 mm, with a mean value of -0.03 mm. A strong correlation between the extremes values of noise and Multivariate ENSO Index (MEI) is observed, such as during the strong events *El Niño* 1998 and *El Niña* 2011.

Keywords: Global mean sea level, Singular Spectrum Analysis, Decomposition, Reconstruction, Forecasting.

INTRODUCTION

Le niveau moyen global des océans est un indice d'intérêt considérable dans les études relatives au changement climatique. La mesure des variations du niveau moyen peut fournir une corroboration importante des prévisions à partir de modèles climatiques du réchauffement climatique.

Au cours de l'histoire de la Terre, le niveau de la mer a fluctué sur des échelles de temps diverses d'une manière non uniforme. Lors de la dernière glaciation, il y a environ 20 000 ans, le niveau moyen global des océans était en moyenne 120 m plus bas qu'aujourd'hui. Entre 15000 et 6000 ans avant notre ère, le niveau de la mer à l'échelle du globe a connu une élévation rapide au rythme moyen de 10 mm environ par an. Cette élévation, est due à la fonte des calottes glaciaires qui recouvraient alors le Nord de l'Amérique et de l'Europe (GIEC, 2001). L'élévation du niveau de la mer s'est produite ensuite avec une vitesse moyenne de 0.5 mm/an durant les 6000 dernières années, et de 0.1 à 0.2 mm/an durant les 3000 dernières années. Ce rythme d'élévation est à peu près 10 fois inférieur à celui observé au 20^{ème} siècle. Au cours des 3000 à 5000 dernières années, le niveau de la mer a connu des oscillations de l'ordre de quelques centaines d'années à 1000 ans avec des amplitudes maximales de 0.3 à 0.5 m (Chappell, 1982). Au cours des derniers 1000 ans et avant le 20^{ème} siècle, le rythme de la montée 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 des océans s'est très peu élevé au cours des 1000 dernières années (environ 0.1 à 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, 2001).

Plus récemment et pendant l'ère de l'altimétrie spatiale, le rythme de la montée est estimée près de $3,2 \pm 0,4$ mm/an à partir des données satellitaires (Cazenave and Llovel, 2010; Nerem et al., 2010; Mitchum et al., 2010 ; Church and White, 2011; Haddad et al., 2013) et de $2,8 \pm 0,8$ mm/an à partir des données in situ (Church and White, 2011). Ce taux est nettement plus élevé que le taux moyen enregistré par les marégraphes au cours du siècle dernier.

Aujourd'hui, les principaux facteurs de l'élévation globale du niveau moyen des mers sont la dilatation thermique des océans et la fonte de la glace terrestre (glaciers, calottes). La contribution de ces facteurs varie en relation avec la variabilité naturelle du climat et le changement climatique, lui-même en relation avec l'augmentation des gaz à effet de serre provoquée par l'activité anthropique. En moyenne sur la période 1993-2010, la contribution du réchauffement des océans dans le bilan du niveau moyen des mers est de 30% (Cazenave and Llovel, 2010; Cazenave and Remy, 2011; Church et al., 2011). La contribution de la fonte des glaciers est la même à 30% (Cogley, 2009; Steffen et al., 2010; Church et al., 2011). Bien que pas constante dans le temps, la contribution des calottes glaciaires est légèrement moindre à ~20% en

moyenne sur la période 1993-2010 (Steffen et al., 2010; Cazenave and Remy, 2011; Church et al., 2011). Les eaux terrestres contribuent peu à l'élévation du niveau de la mer. Une analyse sur l'évolution du niveau de la mer, au niveau mondial et régional, au cours du 20^{ème} siècle et les deux dernières décennies et les contributions à la hausse récente du niveau moyen des océans et des mers est donnée dans (Meysignac et Cazenave, 2012).

Par ailleurs, des études récentes ont été menées pour expliquer l'influence du phénomène climatique ENSO (*El Niño Southern Oscillation*) sur le niveau moyen des mers, ce qui pourrait entraîner des changements sur le contenu thermique de l'océan ou sur la masse océanique globale. En considérant l'indice multivarié ENSO (MEI) sur la période 1993-2010, Nerem et al. (2010) ont remarqué que les variations du niveau moyen global, après élimination de la tendance, sont corrélées aux événements ENSO, avec des anomalies positives/négatives du niveau de la mer observées au cours des épisodes *El Niño / La Niña*. Les événements *El Niño* forts ont le potentiel d'augmenter temporairement le niveau moyen global des mers (Ngo-Duc et al., 2005; Cazenave et al., 2012) alors qu'à l'inverse, lorsque la phase froide *La Niña* se produit, le niveau de la mer peut voir une baisse temporaire.

Alkama et al. (2010) et Llovel et al. (2011) ont mis en évidence la relation étroite entre les variations interannuelles du niveau moyen des mers et les variations des réserves d'eau terrestre, avec une tendance à un déficit dans les réserves d'eau terrestre pendant les événements *El Niño*, et vice versa au cours de *La Niña* (avec le bassin de l'Amazonie comme contributeur dominant à ce dernier). Des recherches récentes suggèrent en outre que des anomalies positives / négatives du niveau moyen des mers au cours des épisodes *El Niño / La Niña* résultent essentiellement des anomalies de masse positives / négatives dans le Pacifique tropical Nord, éventuellement associée à une diminution / augmentation du transport des eaux du Pacifique vers l'océan Indien à travers les détroits indonésiens (Cazenave et al., 2012). En utilisant une combinaison de données satellitaires GRACE et des données *in situ* de température de l'océan et des précipitations, Boening et al. (2012) ont montré que, pendant le fort épisode *La Niña 2011*, la diminution du niveau moyen des mers est due au déplacement temporaire de la masse d'eau des océans à la terre. Ce déplacement se traduit par l'augmentation des précipitations sur l'Australie, le Nord de l'Amérique du Sud et le Sud-Est de l'Asie. Ce résultat représente la première observation directe de l'échange d'eau douce induite par ENSO qui entraîne des variations interannuelles sur le niveau moyen des océans et des mers.

L'objet de cet article porte sur l'étude de la variabilité du niveau moyen global des océans et des mers à partir de la série temporelle d'anomalies de hauteur de mer, issues des différentes missions d'altimétrie spatiale et couvrant la période de 1993 à 2015, et ce en utilisant la technique d'analyse de série temporelle « l'Analyse Spectrale Singulière » (*en anglais : Singular Spectrum Analysis ou SSA*), qui est une méthode simple et rapide basée sur l'Analyse en Composantes Principales (ACP) et qui permet de filtrer ou de reconstruire des signaux. L'avantage principal de cette technique est qu'elle agit comme un filtre variable et adaptable sur les données, au lieu d'utiliser des fonctions de base fixées, comme dans le cas de la transformée de Fourier ou celle des ondelettes (Lefebvre, 2013). Il s'agit ici d'effectuer une décomposition de la série temporelle d'anomalies moyennes de hauteur de mer, en une somme de plusieurs composantes indépendantes, tel que chaque composante dans cette somme peut être identifiée comme étant la composante « tendance », la composante « saisonnalité » et la composante « bruit ». Cela est suivi par une reconstruction de la série initiale. La composante tendance permet de déterminer les changements sur le niveau moyen au cours de la période étudiée. Cette tendance mettra en évidence l'élévation lente du niveau moyen de l'océan sous l'effet conjugué de la dilatation thermique due à l'effet stérique, de la fonte des glaces et des glaciers, des précipitations, etc. La composante saisonnalité permet de déterminer le cycle de variation du niveau des mers, valable pour la période couverte par la série temporelle et dont laquelle les effets dus à des changements sur la tendance ou sur le bruit sont éliminés.

QUELQUES RAPPELS SUR L'ANALYSE SPECTRALE SINGULIERE

La SSA est une technique relativement récente qui consiste à décomposer un signal en composantes périodiques, tendance et bruit. L'idée principale de la SSA consiste à décomposer en la somme d'un nombre réduit de composantes grâce à la décomposition en valeurs singulières (SVD) d'une matrice spécifique construite à partir des données (Golyandina et al., 2001 ; Hassani, 2007 ; Hassani, 2010). L'algorithme de la SSA comporte deux étapes (Harmouche et al., 2015):

Décomposition

Cette première étape correspond à effectuer la SVD d'une matrice de Hankel appelée "matrice de trajectoire". Celle-ci est construite en associant à un signal

\mathcal{S} formé de N échantillons ($K = N - L + 1$) vecteurs-colonne de dimension L , le $k^{\text{ème}}$ vecteur étant donné par $\vec{s}_k = (s_k \ s_{k+1} \ \dots \ s_{k+L-1})^T$. La matrice de trajectoire (de dimension $L \times K$) s'en déduit alors par $[X = \vec{s}_1 : \dots : \vec{s}_K]$. Par SVD (Golyandina et al., 2001), cette matrice de rang $r \leq L$ se décompose en r matrices élémentaires X_i de rang 1. Soient $\sigma_1, \dots, \sigma_r$ les valeurs singulières non nulles de X classées dans l'ordre décroissant et $(U_1, V_1); \dots; (U_r, V_r)$ les vecteurs singuliers gauche et droit associés (σ_i^2 étant la valeur propre de la matrice de covariance $C = X X^T$ associée au vecteur propre U_i , avec $V_i = X^T U_i / \sigma_i^2$, X s'écrit :

$$X = \sum_{i=1}^r X_i, \quad \text{avec } X_i = \sigma_i U_i V_i^T \quad (1)$$

Le ratio $\sigma_i^2 / \sum_{i=1}^d \sigma_i^2$ représente la caractéristique de la contribution de la matrice X_i .

Reconstruction

Des signaux $\mathcal{X}_1, \dots, \mathcal{X}_r$ de longueur N sont construits en moyennant les éléments des anti-diagonales des matrices X_1, \dots, X_r . Un regroupement en composantes est ensuite effectué, en se référant généralement à l'analyse des valeurs singulières et/ou du comportement des vecteurs propres et/ou du taux de corrélation entre les \mathcal{X}_i . Il en résulte m composantes \mathcal{Y}_j , chacune étant associée à un groupe I_j :

$$\mathcal{S} = \sum_{j=1}^m \mathcal{Y}_j \quad \text{avec } \mathcal{Y}_j = \sum_{i \in I_j} \mathcal{X}_i \quad (2)$$

Cet algorithme est ainsi particulièrement efficace pour identifier des signaux sinusoïdaux (éventuellement modulés en amplitude par une exponentielle) ou des fonctions polynômiales du temps, mais ces composantes doivent pour cela être clairement distinguées, ce qui conduit à la notion de séparabilité au sens de la SSA.

RECUEIL DES DONNEES

a. La série temporelle d'anomalies de hauteurs de mer (en anglais, sea level anomalies) produite à l'échelle du globe (ensemble des mers et océans) et calculée par l'Université du Colorado (<http://sealevel.colorado.edu/>) sur la période de janvier 1993 à décembre 2015 à une résolution mensuelle, a été utilisée dans le cadre de cette étude (figure 1). Cette série résulte de l'homogénéisation et de la combinaison de multiples données altimétriques acquises et produites par

différentes missions d'altimétrie spatiale. Notons ici que les anomalies de hauteurs de mer représentent la différence entre la hauteur de la mer observée par l'altimétrie spatiale et la hauteur de la mer moyenne. Cette donnée permet de suivre les variations de l'océan (variations saisonnières, phénomènes climatiques comme El Niño).

b. La série temporelle de l'indice multivarié d'ENSO (Multivariate ENSO Index, MEI) qui est une mesure multi-variables du signal ENSO, fournie par le Climate Diagnostic Center / NOAA (www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/index.html). Sa construction repose sur une ACP étendue de champs à la fois atmosphériques et océaniques observés sur le Pacifique tropical : pression au niveau de la mer, composantes zonale et méridienne du vent en surface, température de surface océanique, température de l'air en surface et nébulosité du ciel (Wolter et Timlin, 1993). Chaque valeur mensuelle est basée sur des données bimensuelles ; par exemple pour février 2000 la valeur est calculée sur les données de janvier et février 2000. Les valeurs mensuelles de MEI sont standardisées par rapport à la période de référence 1950-1993 et exprimées comme fractions de la déviation standard dont la moyenne est donc égale à 0 et l'écart-type égal à 1 (figure 2).

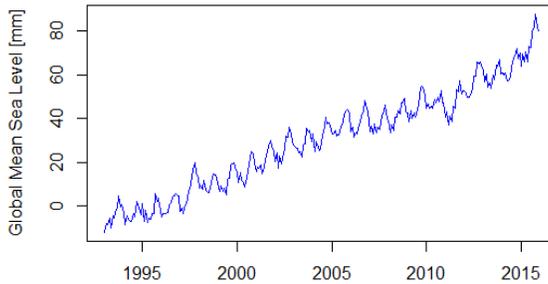


Figure 1 : Série temporelle d'anomalies de hauteurs de mer.

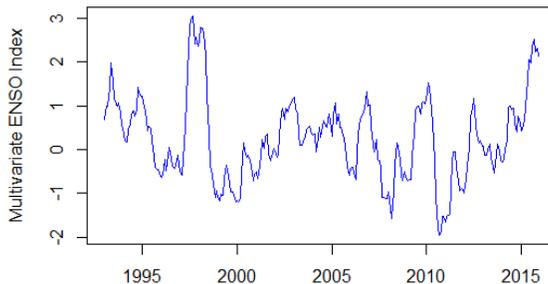


Figure 2 : Indice multivarié d'ENSO (1993-2015).

RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSION

Les résultats de cette section relative à l'analyse SSA sont obtenus au moyen du package RSSA. Ce package est un ensemble de fonctions sous l'environnement R dédiées à l'analyse des séries temporelles et à la prédiction. Les fonctions de RSSA peuvent servir de base pour la mise en œuvre numérique de la SSA (Golyandina et al., 2015). Afin d'extraire les caractéristiques de la variabilité du niveau moyen global, la série temporelle d'anomalies de hauteurs de mer d'une longueur de $N=276$ mesures est analysée par la technique SSA. La largeur de la fenêtre "covariance-lag L " 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 recherché (exactement comme en analyse spectrale de Fourier). Sur cette recommandation, nous avons choisi pour notre application $L = 132$ (proche de $N/2$). La Figure 3 illustre la corrélation entre les 50 composantes reconstruites dans une échelle de niveaux de gris du blanc au noir, correspondant à des valeurs de corrélation de 0 à 1. Les valeurs importantes de corrélation entre les composantes reconstruites indiquent qu'elles devraient être éventuellement réunies en un seul groupe et correspondent donc à la même composante dans l'étape de décomposition de la SSA. D'après la Figure 3, il ressort que les valeurs zéro de corrélation se produisent autour des 12 premières composantes. Sur la base de cette information, nous sélectionnons les 12 premières valeurs propres pour l'identification des composantes harmoniques et de la tendance et considérons le reste comme signal bruit.

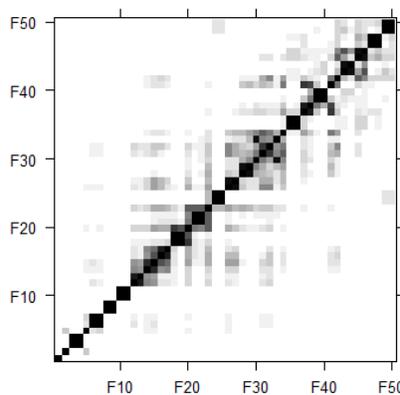


Figure 3 : Matrice des corrélations des 50 composantes reconstruites.

Identification des composantes harmoniques

Dans la pratique, deux valeurs propres proches séparées indiquent une composante cyclique, ce qui simplifie l'identification visuelle des composantes harmoniques. Par conséquent, les plateaux explicites dans le spectre des valeurs propres invitent le nombre ordinal des couples de valeurs propres correspondants aux composantes harmoniques. Il ressort bien du diagramme des Logarithmes des 50 valeurs propres (voir, figure 4), deux composantes périodiques : les couples de valeurs propres (3-4) et (10-11). Les saisonnalités identifiées, correspondantes aux couples de valeurs propres (3-4) et (10-11), ont des périodicités de 12.027 mois (signal annuel) et 6.011 mois (signal semi-annuel), respectivement. La contribution de ces deux saisonnalités par rapport à la série temporelle initiale est de 1.05%, et 0.08% respectivement.

Aussi, si on considère un signal harmonique pur avec une fréquence ω , une certaine phase, une amplitude et la situation idéale où $P = 1 / \omega$ est un diviseur de la longueur de la fenêtre L . Comme P est un entier, il représente la périodicité de l'harmonique. Dans la situation idéale, les vecteurs propres et les composantes principales ont la forme de séquences de sinus et de cosinus avec la même périodicité P et la même phase.

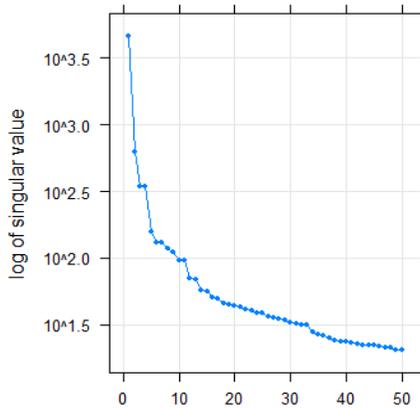


Figure 4 : Logarithmes des 50 premières valeurs propres obtenus.

Ainsi, l'identification des éléments qui sont générés par une harmonique est réduite à la détermination de ces paires. Le sinus et cosinus purs avec des fréquences égales, des amplitudes et des phases créent un nuage de points situés sur un cercle. Si $P = 1 / \omega$ est un entier, alors ces points représentent les P-sommets d'un polygone régulier. Pour une fréquence rationnelle $w = m / n < 0.5$ avec m et n des entiers, les points sont les sommets des diagrammes de

dispersion d'un polygone régulier à n-sommets. La figure 5 représente les diagrammes de dispersion par paires des vecteurs propres de la série du niveau moyen global. Les diagrammes de dispersion des couples de valeurs propres (3-4) et (10-11), identifiés précédemment comme composantes harmoniques, se présentent bien sous forme de diagrammes de séquence sinus/cosinus, confirmant ainsi la bonne sélection de ces derniers couples.

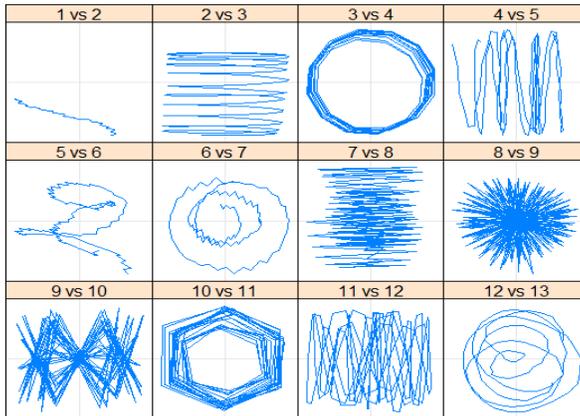


Figure 5 : Dispersion des 12 premières paires de vecteurs propres.

Identification de la tendance

La tendance est la composante de la série temporelle qui varie lentement et qui ne contient pas de composantes oscillatoires. Il faut souligner que la série temporelle se comporte comme une seule composante. En pratique, un ou plusieurs vecteurs propres dominants vont avoir une variation lente. La tendance de la série d'origine peut être déterminée si nous représentons les graphes des vecteurs propres dans une seule dimension. Les 12 premières composantes principales reconstruites et leur contribution sont représentées dans la figure 6. Le signal tendance est alors obtenu par le regroupement des vecteurs propres à variations lentes et qui sont : 1, 2, 5, 6, 7 et 12. La contribution de ces dernières composantes sont : 96.49%, 1.71%, 0.11%, 0.08%, 0.08% et 0.02, respectivement.

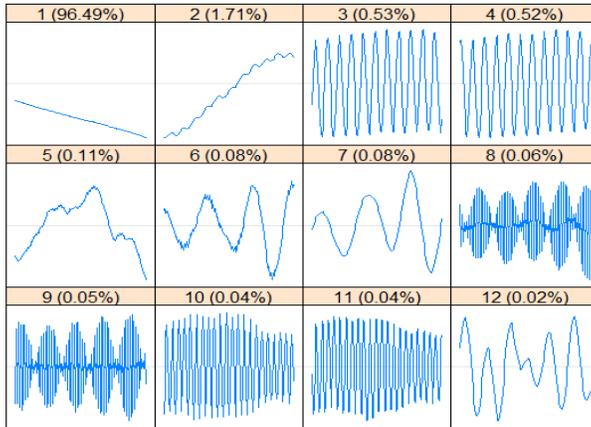


Figure 6 : Composantes principales et leurs contributions dans la série initiale.

Reconstruction

La figure 7 représente la reconstruction du signal tendance (obtenu à partir des vecteurs propres : 1, 2, 5, 6, 7 et 12), le signal de saisonnalité (obtenue à partir des couples de vecteurs propres 3-4 et 10-11) et le signal bruit (les vecteurs propres restants).

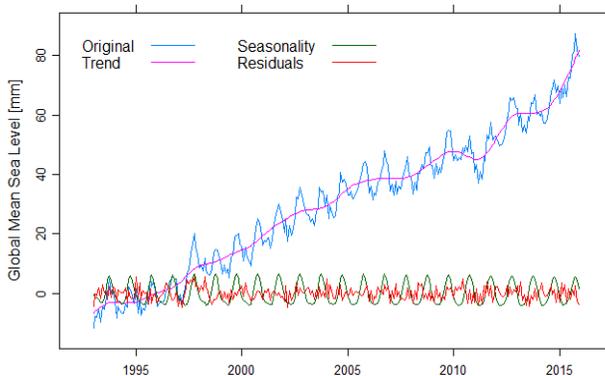


Figure 7 : Reconstruction de la série du niveau moyen global: tendance, saisonnalité et bruit.

Afin de valider la qualité de la reconstruction SSA de la série du niveau moyen des océans et des mers, une comparaison a été effectuée entre tendance extraite avec celle obtenue par la technique *Seasonal-Trend Decomposition Based on Loess - STL*. Cette technique 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). La figure 8 représente les deux signaux tendance, obtenus par l'utilisation des deux méthodes : Analyse spectrale singulière et *Seasonal-Trend Decomposition Based on Loess - STL*, ainsi que la ligne de régression linéaire.

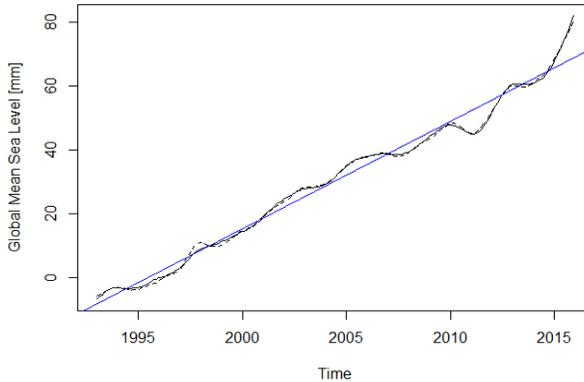


Figure 8 : Tendances obtenues par l'analyse spectrale singulière - SSA (ligne noire continue) et Seasonal-Trend Decomposition Based on Loess - STL (ligne noire discontinue) et droite de régression linéaire (ligne bleue).

Il ressort de la figure 8 que les tendances extraites par *SSA* et *STL* sont assez similaires et suivent clairement la tendance principale de la série initiale (figure 1). Ces tendances confirment bien la hausse du niveau des mers et océans. Le niveau moyen global est caractérisé par une tendance dominante croissante : le niveau s'est élevé de -6.68 mm à +81.90 mm, en données corrigées des variations saisonnières, sur la période de 1993 à 2015. L'application de la régression linéaire sur la tendance donne un taux de 3.36 mm/an entre 1993 et 2015, avec une erreur formelle de 0.03 mm/an. Notons que l'erreur réaliste attribuée à cette quantité est de ≈ 0.4 mm/an. Cette valeur est basée sur des comparaisons des mesures du niveau de la mer issues de l'altimétrie spatiale avec celles issues de marégraphes (Mitchum, 2000).

Une autre manière d'analyser l'évolution de la tendance est la différentiation temporelle. La figure 9 représente les différences successives, année par année, des valeurs de la tendance extraite par l'utilisation de la technique *SSA*. Les valeurs négatives (diminution du niveau moyen) enregistrées durant l'année 2011 sont la signature du fort épisode La Niña 2011.

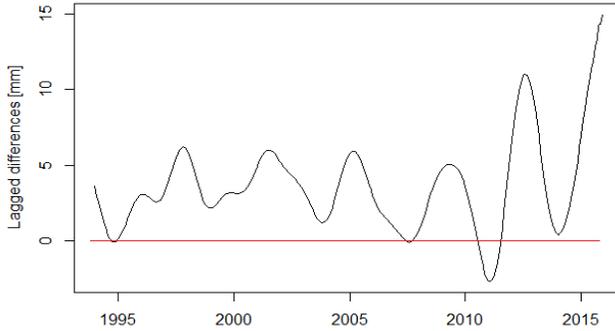


Figure 9 : Différentiation temporelle, année par année, de la composante tendance.

Résidus

Les résidus obtenus après élimination des composantes harmoniques identifiées et de la tendance varient entre -4.81 et 5.59 mm, avec une moyenne de -0.03 mm (figure 7). La figure 10 représente l’histogramme des résidus obtenus et le graphe de Quantile-Quantile, qui est une technique graphique qui permet de tester dans quelle mesure les données suivent une loi de distribution spécifique (la normalité). Il ressort du graphe Q-Q que la normalité des résidus n’est pas rejetée.

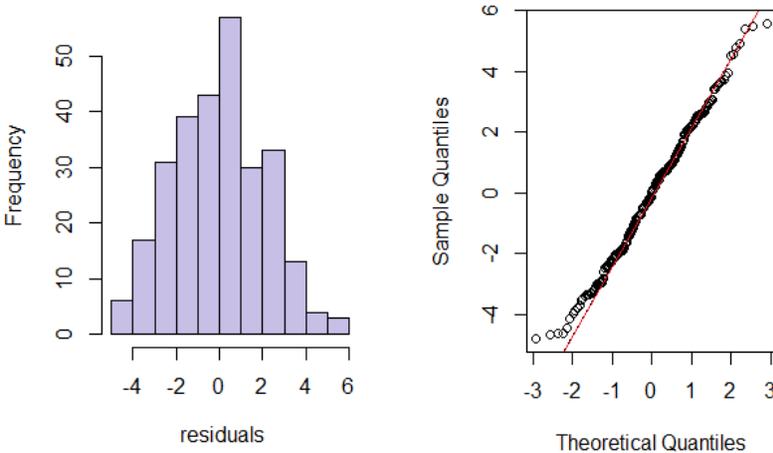


Figure 10 : Histogramme des résidus (à gauche) et graphe de Quantile-Quantile (à droite).

Impact du phénomène El Niño/El Niña

Afin de mettre en évidence l'impact des oscillations *El Niño/El Niña* sur le niveau moyen global des mers et océans, une comparaison est effectuée entre le signal des résidus obtenu après l'étape de reconstruction de la SSA et l'Index ENSO Multivariés (MEI). La figure 11 représente les deux séries temporelles des valeurs mensuelles normalisées de MEI (ligne noire continue) et du bruit obtenu par SSA (ligne noire discontinue). D'après la figure 11, le bruit sur la série temporelle du niveau moyen global (signal bruit) suit le MEI (coefficient de corrélation, $r = 0.28$). Il faut noter la bonne synchronisation entre les valeurs extrêmes, telles que pour les forts événements *El Niño* de 1998 et *El Niña* de 2011.

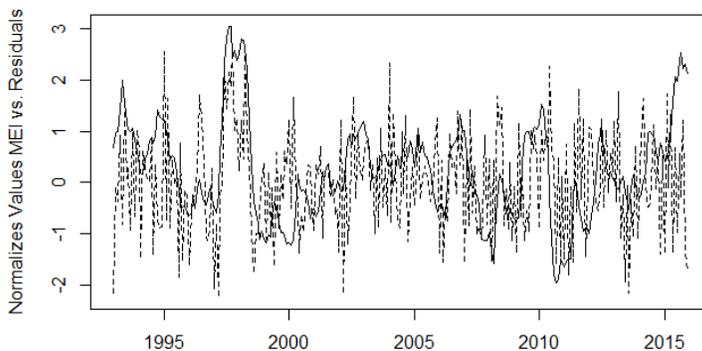


Figure 11 : Séries temporelles des valeurs mensuelles normalisées de MEI (ligne noire continue) et du bruit obtenu après l'étape de reconstruction de la SSA (ligne noire discontinue).

Prédiction du comportement futur du niveau moyen des océans et des mers

Dans cette section, nous montrons comment la précision de la SSA est liée à la structure de la série temporelle. L'objectif est de comparer la précision de la reconstruction et de la prédiction du niveau moyen en fonction de la valeur de la largeur de la fenêtre L . Pour ce faire, la période des observations considérée est de 1993 à 2014. La prédiction des 12 termes correspondant à 2015 a été réalisée en utilisant la technique SSA. Les observations de 2015 sont alors utilisées comme moyen de validation des résultats de la prédiction. Les estimations de l'erreur quadratique moyenne (*Mean Square Error - MSE*) de la reconstruction et de la prédiction, effectués avec différentes valeurs de la largeur de la fenêtre L , sont résumées dans les tableaux 1 et 2, respectivement.

Tableau 1 : MSE de la reconstruction en mm.

$L=$	48	60	72	84	96	108	120	132	144	156
MSE	1.616	2.000	2.255	2.546	2.770	2.866	2.852	2.851	2.854	2.864

Tableau 2 : MSE de la prédiction en mm, année 2015.

$L=$	48	60	72	84	96	108	120	132	144	156
MSE	21.496	58.815	29.380	11.776	3.497	4.053	35.254	4.613	32.381	6.478

Les valeurs des MSE des différentes reconstructions obtenues par l'utilisation de la technique SSA, avec différentes valeurs de L , varient d'une manière lisse et sont inférieures à 3 mm (tableau 1). Les erreurs de prédiction ont quant à eux une structure complexe. Ces erreurs dépendent fortement du choix de L (tableau 2). Les valeurs faibles de MSE de la prédiction (3.497, 4.053 et 4.613 mm) sont obtenues pour des largeurs de la fenêtre L de 96, 108 et 132, respectivement. A titre illustratif, la figure 12 représente les résultats de la prédiction du niveau moyen des mers pour la période 2015 - 2016 (24 termes) avec une largeur de fenêtre L de 96.

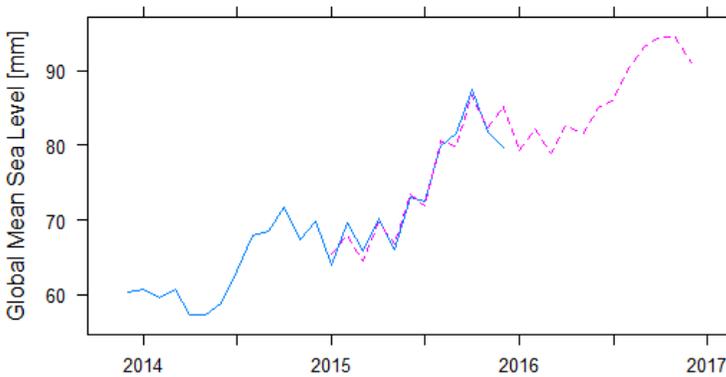


Figure 12 : Prédiction du niveau moyen des océans avec $L=96$; ligne bleue : série observée, ligne en pointillés rouge: série prédite (2015- 2016).

CONCLUSION

L'analyse par la méthode de l'Analyse Spectrale Singulière (SSA) de la série temporelle d'anomalies moyennes de hauteur de la mer (1993-2015), nous a permis de caractériser l'évolution du niveau moyen des océans et des mers. Les composantes harmoniques révélées ont des périodes de 12.027 mois (signal annuel) et de 6.011 mois (signal semi-annuel). L'amplitude de ces deux composantes harmoniques est de 10 mm.

Les enregistrements du niveau moyen présentent une tendance croissante claire. La contribution de la tendance est de 98.49% par rapport à la série temporelle initiale. La tendance extraite montre que le niveau moyen a augmenté pour atteindre des niveaux sans précédent depuis ces 23 dernières années. Le niveau moyen a augmenté de -6.68 mm (janvier 1993) à +81.90 mm (décembre 2015), en données corrigées des variations saisonnières. L'application de la régression linéaire sur la tendance extraite indique une vitesse d'élévation de $3.36 \pm 0,4$ mm/an entre 1993 et 2015. Ce taux d'élévation est en accord avec les récentes estimations de *Aviso Altimétrie* et de *CU Sea Level Research Group* qui suggère une vitesse de montée du niveau moyen des océans et des mers de 3.4 ± 0.6 mm/an et de 3.4 ± 0.4 mm/an entre 1993 et 2015, respectivement (Aviso Altimetry, 2016), (CU Sea Level Research Group, 2016). Si cette tendance continue, le niveau moyen des océans et des mers pourrait monter de 28 centimètres à la fin du siècle, ce qui impliquera des répercussions négatives pour les zones côtières.

La bonne synchronisation entre les valeurs extrêmes du signal bruit et l'*Index ENSO Multivariables (MEI)*, telles que pour les forts événements *El Niño* de 1998 et *El Niña* de 2011, suggérerait que les changements du niveau moyen global soient « commandés » par les oscillations du phénomène El Niño/El Niña.

En conclusion, la SSA est un excellent outil pour décomposer et reconstruire un signal, tel que celui des variations du niveau moyen des océans et des mers, et pour distinguer très efficacement les variations dominantes par rapport au bruit dans les données. De plus, la SSA est un moyen de prédiction performant.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALKAMA R., DECHARME B., DOUVILLE H., VOLDOIRE A., TYTECA S., LE MOIGNE P., BECKER M., CAZENAVE A. AND SHEFFIELD J., 2010. Global evaluation of the ISBA-TRIP continental hydrological system Part 1: Comparison to GRACE terrestrial water storage estimates and in-situ river discharges. *Journal of Hydrometeorology* 11, 583-600. doi: 10.1175/2010JHM1211.
- Aviso Altimetry, 2016. Mean Sea Level rise. <http://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/ocean-indicators-products/mean-sea-level.html>. (accédé le 8 avril 2016)
- BOENING C., WILLIS J.K., LANDERER F.W., NEREM R.S. AND FASULLO J., 2012. The 2011 La Niña: So strong, the oceans fell. *Geophysical Research Letters* 39(L19602), 1-5. doi:10.1029/2012GL053055.
- CAZENAVE A., HENRY O., MUNIER S., DELCROIX T., GORDON A.L., MEYSSIGNAC B., LLOVEL W., PALANISAMY H. AND BECKER M., 2012. Estimating ENSO Influence on the Global Mean Sea Level, 1993-2010. *Marine Geodesy* 35(sup 1), 82-97. doi: 10.1080/01490419.2012.718209.
- CAZENAVE A., LLOVEL W., 2010. Contemporary sea level rise. *Annual Review of Marine Science* 2, 145-173. doi: 10.1146/annurev-marine-120308-081105.
- CAZENAVE A., REMY F., 2011. Sea level and climate: measurements and causes of changes. *Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 2(5), 647-662. doi:10.1002/wcc.139.
- CHAPPELL J., 1982. Evidence for smoothly falling sea level relative to north Queensland, Australia, during the past 6000 years. *Nature* 302, 406-408.
- CHURCH J.A., WHITE N.J., 2011. Sea-level rise from the late 19th to the early 21st century. *Surveys in Geophysics* 32(4/5), 585-602. doi:10.1007/s10712-011-9119-1.
- CHURCH J.A., WHITE N.J., KONIKOW L.F., DOMINGUES C.M., COGLEY J.G., RIGNOT E., GREGORY J.M., VAN DEN BROEKE M.R., MONAGHAN A.J., VELICOGNA I., 2011. Revisiting the Earth's sea level and energy budgets from 1961 to 2008. *Geophysical Research Letters* 38 (L18601). doi:10.1029/2011GL048794.
- CLEVELAND S.W., 1979. Robust Locally Weighted Regression and Smoothing Scatterplots. *Journal of the American Statistical Association* 74(368); 829-836. doi: 10.1080/01621459.1979.10481038.
- 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(403), 596-610. doi: 10.1080/01621459.1988.10478639.

- COGLEY J.C., 2009. Geodetic and direct mass balance measurements: comparison and joint analysis. *Annals of Glaciology* 50, 96-100. doi: 10.3189/172756409787769744.
- CU Sea Level Research Group, 2016. Global Mean Sea Level Time Series. <http://sealevel.colorado.edu/content/global-mean-sea-level-time-series-seasonal-signals-removed>. (accédé le 8 avril 2016)
- 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.
- GIEC 2001. Bilan 2001 des changements climatiques : Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au troisième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 97 p. http://www.grida.no/publications/other/ipcc_tar/
- GOLYANDINA N., KOROBAYNIKOV A., SHLEMOV A., USEVICH K., 2015. Multivariate and 2D extensions of singular spectrum analysis with the Rssa Package. *Journal of Statistical Software* 67(2). doi: 10.18637/jss.v067.i02.
- GOLYANDINA N., NEKRUTKIN V., ZHIGLJAVSKY A., 2001. Analysis of time series structure: SSA and related techniques. Chapman & Hall/CRC.
- HADDAD M., TAIBI H., SI MOHAMMED AREZKI M., 2013. On the recent global mean sea level changes: Trend extraction and El Niño's impact. *Comptes Rendus Geoscience* 345(4), 167-175. doi: 10.1016/j.crte.2013.03.002.
- HARMOUCHE J., FOURER D., FLANDRIN P., AUGER F., BORGNAT P., 2015. Une ou deux composantes : la réponse de l'analyse spectrale singulière. Colloque Gretsi 2015, 08-11 septembre 2015. <http://perso.ens-lyon.fr/patrick.flandrin/gretsi15JH.pdf>
- HASSANI H., 2007. Singular Spectrum Analysis: Methodology and comparison. *Journal of Data Science* 5(2), 239-257.
- HASSANI H., 2010. A Brief introduction to singular Spectrum analysis. http://www.ssa.cf.ac.uk/a_brief_introduction_to_ssa.pdf
- LAMBECK K. and BARD, E., 2000. Sea-level change along the French Mediterranean coast since the time of the Last Glacial Maximum. *Earth and Planetary Science Letters* 175, 203-222.
- LAMBECK K., ESAT T.M., POTTER E.K., 2002. Links between climate and sea levels for the past three million years. *Nature* 419, 199-206.
- LEFEBVRE S., 2013. Déformées solaires : diamètre et structure interne - Simulations en vue d'inter-comparer les données sol et espace. Thèse de Doctorat en Sciences de l'Univers, soutenue le 8 décembre 2003 à l'Observatoire de la Côte d'Azur/Département CERGA.

- LLOVEL W., BECKER M., CAZENAVE A., JEVREJEVA S., ALKAMA R., DECHARME B., DOUVILLE H., ABLAIN M., BECKLEY B., 2011. Terrestrial waters and sea level variations on interannual time scale. *Global and Planetary Change* 75, 76-82. doi:10.1016/j.gloplacha.2010.10.008.
- MEYSSIGNAC B., CAZENAVE A., 2012. Sea level: A review of present-day and recent-past changes and variability. *Journal of Geodynamics* 58, 96-109.
- MITCHUM G.T., 2000. An improved calibration of satellite altimetric heights using tide gauge sea levels with adjustment for land motion. *Marine Geodesy* 23, 145-166, doi: 10.1080/01490410050128591.
- MITCHUM G.T., NEREM R.S., MERRIFIELD M.A., GEHRELS W.R., 2010. Modern sea level changes estimates. In: Church J.A., Woodworth P.L., Aarup T., Wilson W.S. (Eds.); *Understanding Sea Level Rise and Variability*; Wiley-Blackwell Publishing, London, UK.
- 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), pp 435-446. doi: 10.1080/01490419.2010.491031.
- NGO-DUC T., LAVAL K., POLCHER J. AND CAZENAVE A., 2005. Contribution of continental water to sea level variations during the 1997-1998 El Niño-Southern Oscillation event: Comparison between Atmospheric Model Intercomparison Project simulations and TOPEX/Poseidon satellite data. *Journal of Geophysical Research* 110, D09103. doi:10.1029/2004JD004940.
- STEFFEN K., THOMAS R.H., RIGNOT E., COGLEY J.G., DYURGEROV M.B., RAPER S.C.B., HUYBRECHTS P. AND HANNA E., 2010. Cryospheric Contributions to Sea-Level Rise and Variability. In *Understanding Sea-Level Rise and Variability* (eds J. A. Church, P. L. Woodworth, T. Aarup and W.S. Wilson), Wiley-Blackwell, Oxford, UK. doi: 10.1002/9781444323276.ch7.
- WOLTER K AND TIMLIN M.S., 1993. Monitoring ENSO in COADS with a seasonally adjusted principal component index. *Proc. of the 17th Climate Diagnostics Workshop*, Norman, OK, NOAA/NMC/CAC, NSSL, Oklahoma Clim. Survey, CIMMS and the School of Meteor., Univ. of Oklahoma, pp 52-57. <http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/WT1.pdf>