

A propos du changement du niveau des océans dans les zones côtières

V. Courtillot¹, J-L. Le Mouél¹, et F. Lopes¹

Université Paris Cité¹, Institut de Physique du globe de Paris, CNRS UMR 7154, F-75005 Paris, France

Résumé

Les variations du niveau de la mer, basées sur les données marégraphiques (**GSLTG**) et la combinaison des données marégraphiques et satellitaires (**GSLI**) sont soumises à une analyse spectrale singulière (**ASS**) afin de déterminer leurs tendances et leurs composantes périodiques ou quasi-périodiques. **GLSTG** augmente de 90 mm de 1860 à 2020, une contribution de 0,56 mm/an au taux d'augmentation moyen. Des périodes annuelles à multidécennales de 90/80, 60, 30, 20, 10/11 et 4/5 ans se retrouvent à la fois dans les données **GSLTG** et **GSLI**. Ces périodes correspondent aux périodes commensurables des planètes joviennes et à la combinaison des périodes de Neptune (165 ans), Uranus (84 ans), Saturne (29 ans) et Jupiter (12 ans). Ces mêmes périodes se retrouvent dans les variations du niveau de la mer, le mouvement de rotation du pôle **RP** et l'évolution de la pression globale **PG**, suggérant des corrélations physiques. Les premières composantes **ASS** comprennent l'essentiel de la variance du signal : 95 % pour **GSLTG**, 89 % pour **GSLI**, 98 % pour **PG**, 75 % pour **PR**. Laplace a dérivé les équations de Liouville-Euler qui régissent la rotation et la translation de l'axe de rotation de tout corps céleste. Il a souligné qu'il fallait tenir compte des moments cinétiques orbitaux de toutes les planètes en sus des attractions gravitationnelles et conclu que l'axe de rotation de la Terre devrait subir des mouvements qui portent les combinaisons des périodes du Soleil, de la Lune et des planètes. Presque toutes les périodes trouvées dans les composantes **SSA** du niveau de la mer (**GSLI** et **GSLTG**), de la pression globale (**PG**) et de la rotation polaire (**RP**), de leurs modulations et de leurs dérivées peuvent être associées aux planètes joviennes. Il serait intéressant de rechercher des séries de données sur des périodes plus longues, ce qui permettrait de vérifier si les tendances elles-mêmes pourraient être des segments de composantes ayant des périodicités encore plus longues (par exemple, le cycle de 175 ans de Jose).

Mots clés. Niveau de la mer, marégraphes, pression globale de la mer, trajectoire moyenne des pôles

1. Introduction

L'élévation globale du niveau de la mer est devenue un sujet de préoccupation majeur, tant pour les habitants des zones côtières que pour les régions de très faible altitude et un grand nombre d'études ont été consacrées à la description et la compréhension des évolutions de la mer au niveau global. Le problème est parfois déroutant car la définition de l'élévation (ou de la baisse) du niveau de la mer n'est pas toujours claire et unique et les observations sur lesquelles elle se fonde ont été obtenues avec des méthodes très différentes (marégraphes, mesures GPS, observations satellitaires). Se référant aux travaux de [Farell et Clark \(1916\)](#), [Wu et Peltier \(1983\)](#), [Mitrovica et Milne \(2003\)](#), [Spada et Stocchi \(2006\)](#), [Spada et Stocchi \(2007\)](#), [Spada et al. \(2012\)](#), nous définissons le niveau absolu de la mer $SL(P,t)$ comme la différence entre (1) la distance du centre de masse de la Terre à la surface de la mer, à l'instant t et à l'emplacement P , et (2) la distance du centre de masse de la Terre au fond de la mer (Terre solide), c'est à dire la hauteur d'eau, dans le même temps t et le même emplacement P :

$$SL(P,t) = R_{ss}(P,t) - R_{se}(P,t) \quad (1)$$

L'évolution du niveau de la mer entre l'instant t et un instant de référence est simplement :

$$SLE(P,t) = SL(P,t) - SL(P, tr) = [R_{ss}(P,t) - R_{se}(P,t)] - [R_{ss}(P, tr) - R_{se}(P, tr)] \quad (2)$$

qui peut être réorganisé comme suit :

$$SLE(P,t) = [R_{ss}(P,t) - R_{ss}(P, tr)] - [R_{se}(P,t) - R_{se}(P, tr)] \quad (3)$$

ont attribué les variations du niveau de la mer du Japon aux variations de densité et de pression atmosphérique. [Marmer \(1927\)](#) a observé

Sous cette forme, les variations du niveau de la mer constituent la différence entre les changements d'altitude de la surface de la mer (c'est-à-dire le géoïde), qui sont mesurés par les marégraphes des zones côtières et les changements dans l'altitude de la Terre solide qui peut être mesurée au niveau des stations GPS (par exemple [Blewitt et al. \(2016\)](#); [Hammond et al. \(2021\)](#)).

Le terme du géoïde $[R_{ss}(P,t) - R_{ss}(P, tr)]$ est modélisé comme suit : $G/\gamma(P,t) + c(t)$, où G est le potentiel gravitationnel complet, G , la gravité à la surface terrestre et $c(t)$ représente les changements de masses à la surface, y compris la fonte des glaces ([Lambeck 2005](#)).

En dépit de la complexité réelle des conséquences de la (apparemment simple) loi d'attraction des masses, [Laplace \(1799\)](#) a pu construire une théorie complète de la mécanique céleste. Il a écrit un volume entier (le livre IV de son *Traité*) sur les oscillations de la mer et de l'atmosphère. Laplace a montré que pour que le niveau de la mer soit en équilibre, la somme des forces devait être nulle, aboutissant finalement au fameux système d'équations aux dérivées partielles de Liouville-Euler. Les marées étant comprises comme des oscillations du second ordre, dont les phases et les amplitudes peuvent être calculées. L'espace mathématique a été fixé pour l'étude des variations du niveau des océans.

Le début des années 1930 a concordé avec une période de grand intérêt pour la détermination du niveau de la mer, ses modifications, et les causes physiques de ces variations modifications. [Nomitsu et Okamoto \(1927\)](#)

une oscillation annuelle des marégraphes de Seattle et de San Francisco qu'il a également liée à des phénomènes météorologiques. Après une décennie d'observations supplémentaires, [Jacobs \(1939\)](#)

et LaFond (1939) ont ainsi conclu qu'il y avait effectivement une augmentation générale du niveau des océans. Plusieurs explications ont été envisagées : l'insolation du Soleil, les marées météorologiques, la densité de l'eau, les changements de la géographie et la géologie des bassins océaniques. Aucune de ces explications n'était cependant complètement satisfaisante. McEwen (1937) a ainsi conceptualisé un mécanisme complexe d'évaporation estivale et de précipitations hivernales affectant le niveau global de la mer. Une étude plus approfondie a montré que ces variations annuelles étaient en fait synchrones dans toutes les stations d'observation, et l'idée a dû être abandonnée. Seuls les schémas de pression, donc les vents, sont demeurés comme une cause potentielle des variations périodiques du niveau des océans.

À la fin des années 1970 et au début des années 1980, la principale cause de l'élévation du niveau de la mer a été attribuée à une phase majeure de réchauffement ayant entraîné la fonte des calottes glaciaires dans l'hémisphère nord. Peltier et Andrews (1976) et Nakiboglu et Lambeck (1980) ont ainsi développé la théorie du rebond isostatique post-glaciaire. Le réchauffement climatique de l'atmosphère qui s'est produit au cours des 150 dernières années environ a été attribué à la libération anthropique de gaz à effet de serre, contribuant à la fonte des glaciers et à une augmentation du niveau des océans (Etkins et Epstein 1982; Gornitz et al. 1982; Lambeck et Nakiboglu 1984; Meier 1984; Peltier et Tushingham 1989; Douglas 1991, 1992, 1997).

Nos connaissances sur le niveau des océans et ses variations du 19^{ème} siècle jusqu'à aujourd'hui se base principalement sur les observations réalisées par les marégraphes. Ceux-ci fournissent ainsi la première moitié de l'équation (3), soit $[R_{ss}(P,t) - R_{ss}(P,t_0)]$. L'une des séries historiques les plus longues provient du marégraphe de Brest (France), créé en 1807 et qui se trouve toujours en fonction. Le Mouél et al. (2021) ont analysé récemment les données de Brest et en parallèle, les positions des pôles terrestres (de l'IERS, 1845-2019), en les soumettant toutes deux à une analyse spectrale singulière (ASS). Les premières composantes ASS de ces deux séries, c'est-à-dire leurs tendances, sont très similaires, avec un événement d'accélération majeur vers 1900 et un retard de 5 à 10 ans du niveau de la mer par rapport au mouvement des pôles. Les composantes SSA des périodes de 1 an, 11 ans et 5,4 ans sont communes aux deux séries. Une caractéristique importante à noter est la composante d'une 1/2 année présente pour le niveau des océans mais absente dans l'analyse du mouvement des pôles. La remarquable similitude des deux tendances et leur décalage de phase suggèrent une relation de cause à effet, contraire à ce qui est généralement admis.

L'objectif principal du présent article est d'appliquer la même analyse à la base de données mondiale des marégraphes. Les données marégraphiques sont conservées par le PSMSL (Permanent Service for Mean Sea Level) ou Service permanent du niveau moyen des mers¹. Des mesures du niveau de la mer des régions côtières sont disponibles sur 1548 sites ; les données brutes de tous ces sites sont présentées sur la figure 1.

La seconde moitié de l'équation 3, c'est-à-dire le mouvement vertical du sol $VLM = [R_{se}(P,t) - R_{se}(P,t_0)]$, est accessible via les mesures GPS. Ceux-ci permettent une bien meilleure couverture de la surface terrestre mais couvrent malheureusement un laps de temps beaucoup plus court, en général 30 ans au maximum. Pour cette raison, seules les tendances « récentes » couvrant cette période sont accessibles. Une analyse très approfondie de ces données a récemment été publiée par Hammond et al. (2021). La base de données est maintenue par le Nevada Geodetic Laboratory (NGL), avec 19286 sites répartis sur la planète, et s'appelle Median Interannual Difference Adjusted for Skewness (MIDAS)².

Depuis le début des années 1990, le niveau de la mer est également surveillé par une série de satellites altimétriques qui ont permis une couverture mondiale beaucoup plus dense mais (comme pour les mesures GPS) sur une période courte de 30 ans. Un certain nombre d'articles récents ont tenté de combiner ces ensembles très différents de données, aboutissant à diverses courbes du niveau global de la mer (GSL) (par exemple Church et White (2011); Hammond et al. (2021)). L'intérêt pour ces courbes GSL s'est porté sur leurs tendances, leurs accélérations, leurs variations annuelles et interannuelles, et sur les mécanismes responsables de ces variations.

Nous avons récemment appliqué avec succès la méthode d'analyse spectrale singulière (ASS ; voir Golyandina et Zhigljavsky (2013); Lemmerling et Van Huffel (2001); Golub et Reinsch (1971)) sur un certain nombre de ces séries chronologiques géophysiques et héliophysiques. L'analyse spectrale singulière décompose toute série temporelle en une somme de composants, une tendance (qui peut ou non être présente) et des composants quasi-périodiques stationnaires. Nous avons expliqué cette méthode dans plusieurs articles (Lopes et al. 2017; Le Mouél et al. 2020a). Par exemple, les oscillations (pseudo-cycles) de 160, 90, 60, 22 et 11 ans se retrouvent dans les séries de nombres de taches solaires (par exemple Gleissberg (1944); José (1965); Coles et al. (1980); Charvatova et Stetik (1991); Usoskin (2017); Le Mouél et al. (2020b); Courtillot et al. (2021)) ainsi que dans un certain nombre de phénomènes terrestres (Wood et Lovett 1974; Mörth et Schlamminger 1979; Schlesinger et Ramankutty 1994; Lau et Weng 1995; Scafetta 2010; Courtillot et al. 2013; Scafetta 2016; Lopes et al. 2017; Le Mouél et al. 2019a,b, 2020a; Scafetta et al. 2020; Cionco et al. 2021; Lopes et al. 2021; Scafetta 2021; Lopes et coll. 2022), en particulier le niveau de la mer (Jevrejeva et al. 2006; Chambers et al. 2012; Chen et al. 2014; Wahl et Chambers 2015; Le Mouél et al. 2021). Ces périodes spécifiques (ou périodicités) présentent un intérêt particulier, car elles font partie de la famille des périodes commensurables des planètes joviennes agissant sur la Terre et le Soleil (Mörth et Schlamminger 1979; Scafetta et al. 2020; Courtillot et al. 2021; Lopes et al. 2021; Bank et Scafetta 2022). Ces valeurs sont en effet proches des périodes de révolution de Neptune (165 ans), Uranus (84 ans), Saturne (29 ans) et Jupiter (12 ans) et plusieurs de leurs périodes commensurables (voir p.i Tableau 1 dans Lopes et al. (2021)).

Dans la section 2 de cet article, nous discutons des enregistrements marégraphiques et réalisons une analyse spectrale singulière de ceux-ci. Dans la section 3, nous discutons et analysons

¹ <https://www.psml.org/data/obtaining/complete.php>

² <http://geodesy.unr.edu/velocities/>

les séries temporelles des mouvements verticaux du sol (VLM) en se basant sur les mesures GPS. Dans la section 4, nous soumettons certaines courbes du niveau global des mers (GSL) incluant des observations satellitaires à l'analyse spectrale. Nous comparons et discutons les résultats de ces analyses dans la section 5 et portons notre conclusion dans la section 6.

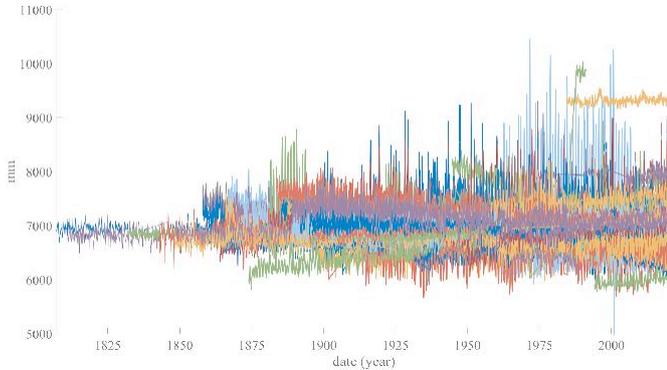


Fig. 1: Base de données complète des marégraphes (1548 séries PSMSL).

2. ASS des séries chronologiques marégraphiques (ie $[R_{ss}(P,t) - R_{ss}(P, tr)]$)

En s'appuyant sur l'article récent de [Le Mouél et al. \(2021\)](#), dans lequel nous avons analysé l'enregistrement du marégraphe de Brest depuis 1807 et en utilisant l'ASS pour en extraire les principales composantes, nous proposons de construire une courbe globale du niveau de la mer couvrant les 200 dernières années en utilisant uniquement les données marégraphiques (GSLTG). Nous sommes bien conscients des incertitudes dues à la géographie et à la tectonique, mais souhaitons soumettre les données originales au minimum de manipulation.

Nous avons sélectionné les enregistrements de 31 stations (tableau fig. 4), sur la base de deux critères : la plus longue durée possible ainsi que la meilleure couverture spatiale possible, quoique encore trop restreinte (Figure 2).

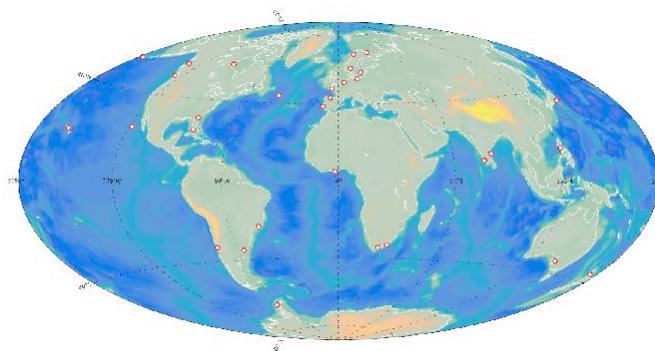


Fig. 2: Carte montrant les emplacements des marégraphes utilisés pour construire la série GSLTG.

Nous avons également effectué ces analyses sur la base des données complètes (1548 stations de marégraphes) : ce qui a pour conséquence d'augmenter

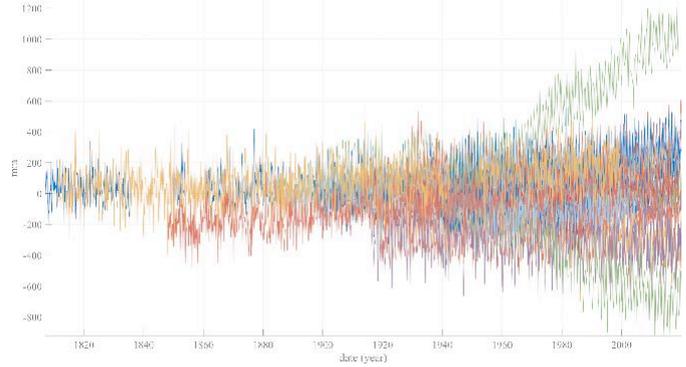


Fig. 3: Superposition des séries de données de 31 marégraphes répertoriés dans le tableau de la Fig. 4.

la dispersion sans modifier ce que l'on peut tirer de la sélection des 31 stations. Les données brutes des 31 stations sont toutes affichées sans aucun filtrage ni traitement, à l'exception de la soustraction de la première valeur, de sorte que toutes les séries commencent par zéro et que seules les variations verticales relatives de SL sont affichées (Figure 3).

Les deux marégraphes présentant de grandes pentes (tracés en vert sur la figure 3), l'une positive (Manille, S. Harbour, Philippines) et l'autre négative (Churchill, Canada) (voir Tableau fig. 4 décrivent une forme d'entonnoir. Celui-ci connaît une croissance rapide après 1950, avec une amplitude totale de 2 m, déterminée par les deux extrema à Manille et Churchill. L'oscillation annuelle, identifiée pour la première fois par [Marmer \(1927\)](#), présente une amplitude de l'ordre de 200 mm (de crête à creux) pour tous les marégraphes. Les points de données individuels sont présentés dans la figure 5a.

Nous avons ensuite déterminé un modèle de lissage mathématique des variations du niveau moyen de la mer en fonction du temps, au sens des moindres carrés (ex. [Menke \(1989\)](#)). Pour une représentation mathématique de ce modèle de lissage, nous pouvons choisir entre des fonctions polynômiales, sinusoïdales, exponentielles ou des fonctions splines. En se basant sur notre expérience précédente avec les données de Brest ([Le Mouél et al. 2021](#)) et pour des raisons qui apparaîtront dans la discussion, nous sélectionnons les fonctions sinusoïdales. Nous ajoutons progressivement des composantes sinusoïdales, jusqu'à ce que plus aucune information significative ne soit apportée par la nouvelle composante (au sens du critère d'Akaike, cf. [Glating et al. \(2007\)](#) utilisé dans [Courtillot et al \(2013\)](#)). Dans le cas présent, cette démarche débouche sur un modèle constitué de 8 composantes sinusoïdales. Ce modèle est illustré avec les données de la figure 5a et agrandie sur la figure 5b.

Le modèle de la Figure 5a représente la variation moyenne commune à l'ensemble des 31 marégraphes. À première vue, on observe une oscillation annuelle, avec une amplitude de pic à creux autour de 100 mm et une valeur moyenne globale relativement constante. La figure 5b montre plus précisément les modulations de cette amplitude. La dispersion restante des points de données peut être attribuée à la variabilité locale ou régionale. Nous appellerons ce modèle **GSLTG**. La courbe **GSLTG** est ensuite analysée à l'aide de l'analyse spectrale singulière. L'analyse donne une somme de composantes avec des (pseudo-) périodes de 1 an, 90 ans, 60 ans, 80 ans, 0,5 ans et 20 ans (par ordre d'amplitude décroissante). Elles sont présentées (par ordre décroissant de période) dans la figure 6 (voir aussi tableau fig.7). La principale composante annuelle présente une amplitude (crête à creux) de 80 mm et subit une modulation (plus longue que centennale)

Tide Gauge Site	Lat (°)	Lon (°)
Adak Sweeper Cove	51.863	-176.632
Argentine Islands	-65.246	-64.257
Auckland	-36.843	174.769
Brest	48.382	4.494
Churchill	58.767	-94.183
Chennai	13.100	80.300
Cochin	9.967	76.267
East- London	-33.027	27.932
Fernandina Beach	30.672	-81.465
Honolulu	21.307	-157.867
Ketchikan	55.332	-131.625
Key West	24.555	-81.806
Knysna	-34.049	23.046
Lisbon	38.700	-9.133
Marseille	43.279	5.354
Maasluis	51.918	4.25
Manila, S. harbor	14.583	120.967
Mera	34.919	139.825
Montevideo	-34.900	-56.250
Narvik	68.428	17.426
Oslo	59.909	10.735
Polyarny	69.200	33.483
Port Adelaide	-34.780	138.481
Rio de Janeiro	-22.933	-43.133
Swinoujscie	53.917	14.233
Takoradi	4.885	-1.745
Tofino	49.150	-125.917
Tuapse	44.100	39.067
Valparaiso	-33.027	-71.626
Visby	57.639	18.284
Xiamen	24.450	118.067

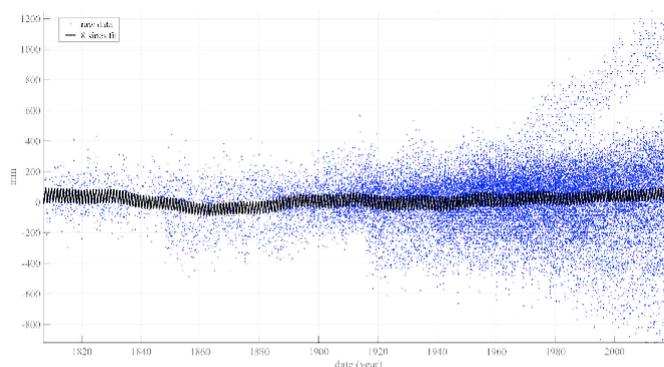
Fig. 4 : Liste des marégraphes retenus dans cette étude pour constituer la série GSLTG.

d'une amplitude de 10 mm. Les deux composantes suivantes (90 et 80 ans) ont toutes deux une amplitude de 40 mm, et les trois suivantes d'environ 15 mm. Ensemble, elles représentent ainsi 95 % de la variance totale. La tendance elle-même peut être modélisée avec seulement 3 fonctions sinusoïdales avec des périodes de 160, 90 et 30 ans.

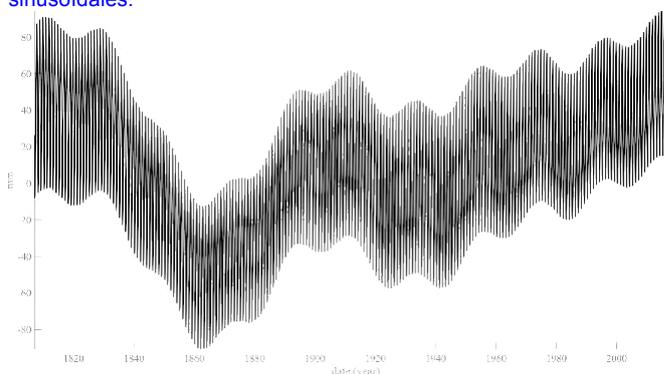
3. Introduction de la série chronologique des mouvements verticaux terrestres du GPS

($[R_{se}(P,t) - R_{se}(P,t_r)]$).

Comme indiqué plus haut, les séries de données GPS du VLM sont toutes inférieures à 30 ans, ce qui empêche de les combiner directement avec les données marégraphiques beaucoup plus longues en moyenne et qui permettent d'explorer des périodes beaucoup plus longues. A défaut de pouvoir faire mieux, on peut au moins calculer une tendance récente (actuelle), en appliquant une simple régression linéaire aux données GPS. Et la simple régression linéaire de toutes les séries présentées dans la figure 3 permet une comparaison et une combinaison des données marégraphiques et du VLM : La Figure 8 montre les histogrammes respectifs de la pente des 1548 marégraphes et GPS au même endroit (ou à proximité)



(a) Points de données des 31 marégraphes utilisés dans la construction du GSLTG et leur ajustement sinusoïdal, avec 8 ondes sinusoïdales.



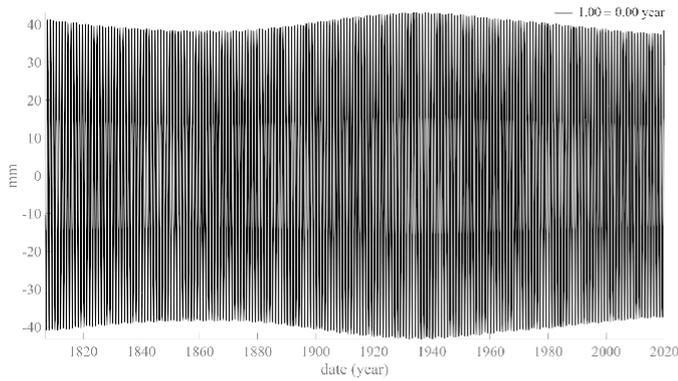
(b) L'ajustement (courbe noire) de la figure 5a avec une échelle d'ordonnées agrandie.

Fig. 5 : Ajustement des 31 marégraphes.

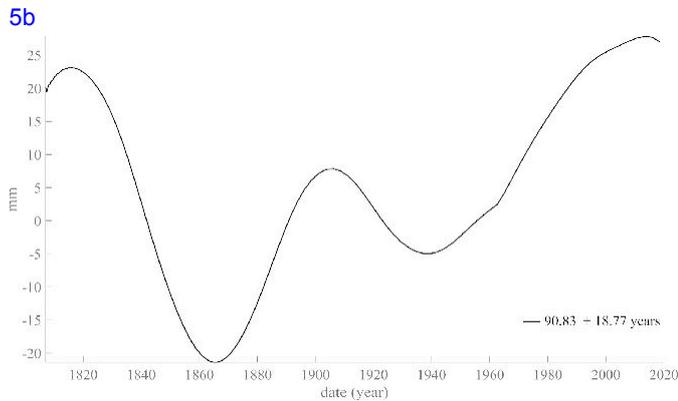
des mêmes localités côtières (Figure 9). La médiane obtenue pour les marégraphes est de +2,0 mm/an et 92,7 % des marégraphes montrent des pentes comprises entre -10 et +10 mm/an ; la médiane du VLM est de -0,6 mm/an et 96,0 % des valeurs sont comprises entre -10 et +10 mm/an. Les emplacements et les valeurs des marégraphes et du VLM sont tracés respectivement sur la figure 9a et Figure 9b. Pour une grande partie des zones côtières, les signaux des marégraphes et du VLM semblent être de signe opposé, c'est-à-dire antisymétrique (par exemple, en Amérique du Nord, dans la région méditerranéenne). Les résultats de cette analyse sont en plein accord avec l'étude approfondie de Hammond et al. (2021); là où l'eau monte, la terre a tendance à s'affaisser et vice versa.

Si nous supposons que le VLM récent (30 ans) à Brest est resté le même de 1807 à nos jours, alors nous pouvons évaluer l'élévation moyenne du niveau de la mer par rapport au centre de masse de la Terre (équation 3) à 1,5 mm/an. Cette estimation approximative est en plein accord avec une série d'études récentes (par exemple Tsimplis et Baker (2000); Marcos et Tsimplis (2008); Wahl et al. (2013); White et al. (2014); Wahl et Chambers (2015); Hammond et al. (2021); Le Mouél et al. (2021)).

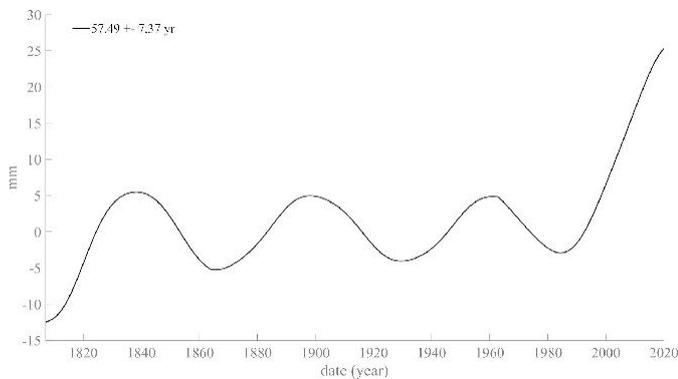
La base de données MIDAS fournit les pentes des données GPS sur toute leur durée (durée de vie), qui peut aller de 2 à plus de 20 ans. Hammond et al. (2021) considèrent que, mis à part les événements tectoniques, ceux-ci donnent une idée précise de VLM. Pour chaque marégraphe, nous avons ajusté de la même manière des segments



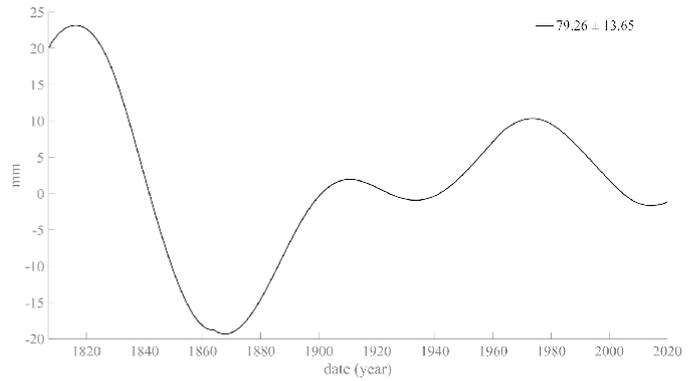
(a) Première composante ASS (1 an) de la série de données GSLTG de la figure



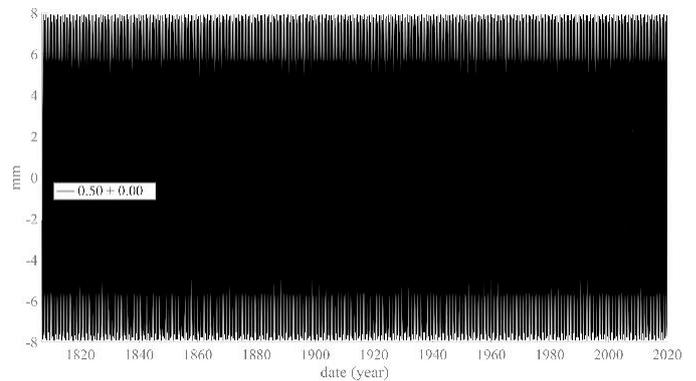
(b) Deuxième composante ASS (90 ans) de la série de données GSLTG.



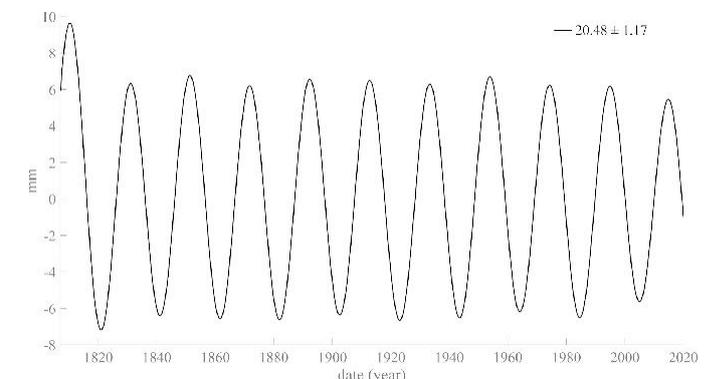
(c) Troisième composante ASS (60 ans) de la série de données GSLTG



(d) Quatrième composante ASS (80 ans) de la série de données GSLTG.



(e) Cinquième composante ASS (0,5 an) de la série de données GSLTG.



(f) Sixième composante ASS (20 ans) de la série GSLTG

Fig. 6 : Les six premiers composantes les plus importants extraites du GSLTG

de lignes droites aux données du niveau de la mer (mais sur une durée beaucoup plus longue entre 3 et 217 ans).

4. ASS des courbes GSL obtenues avec inclusion des données satellitaires

Dans la mesure où nous nous intéressons à l'élévation à long terme du niveau de la mer et à ses composantes quasi-périodiques, mais que nous ne disposons pas de données VLM sur le long terme, nous pouvons tout de même analyser par analyse spectrale singulière un certain nombre de courbes globales du niveau de la mer dont les données sont disponibles dans la Littérature.

Nous avons d'abord sélectionné celles obtenues par Church et White (2011), Figure 10. Ces auteurs estiment l'élévation du niveau moyen mondial de la mer à partir d'une combinaison de données altimétriques satellitaires obtenues pour les années 1993–2009 et de mesures du

niveau de la mer (marégraphes) sur les côtes et les îles entre 1880 et 2009. Les variations GSL en fonction du temps sont

fourni par la Nasa³. L'ASS de la courbe résultante GSLI (l pour long) donne une tendance et des composantes à $54,5 \pm 8,7$, $19,4 \pm 1,7$, $10,1 \pm 0,6$, $3,9 \pm 0,1$ et $31,0 \pm 5,5$ ans (tableau fig. sept et Figure ?) par ordre d'amplitude décroissante (ou plus grossièrement, compte tenu des incertitudes, tendance, 60, 20, 11, 4 et 30 ans). Ces composantes sont représentées sur la Figure 09 (par ordre de période décroissante) ; leur somme équivaut à 89,4 % de la variance totale de la série (Figure 10). La composante de 3,9 ans pourrait correspondre à la deuxième harmonique du cycle de Schwabe (Le Mouél et al. 2020b). Notez que les principales variations sur 1 et 0,5 an ont été filtrées par Church et White(2011).

³ https://podaac-tools.jpl.nasa.gov/drive/files/allData/merged_unlt/L2/TF

Planet	Associated periods (yr)	SSN pseudo cycles	Church and White (GSLI)	Beckley et al (GSLs)	This study (GSLTG)
Earth	0.5 1.0 11.85 (Schwabe) 5.92			0.59 ± 0.01, 1.0 ± 0.02	0.5 ± 0.0, 1.0 ± 0.0
Jupiter		10.56, 11.3, 13.43 5.30, 5.52	10.15 ± 0.28		10.64 ± 1.17 5.26 ± 0.13
Saturn	31.04 15.72	33.36 15.31	30.96 ± 5.55	15.36 ± 4.70	33.75 ± 9.30
Uranus	83.97 (Gleissberg)	90.03			90.83 ± 18.77 79.36 ± 13.65
Neptune	164.78 (Jesi) 83.39	131.02, 190.25 90.03			
Jupiter Saturn	9.79, 21.64 (Hale)	9.98, 21.42 35.56, 45.21	19.41 ± 1.74		20.48 ± 1.17
Uranus Neptune	80.40, 124.57	45.21, 131.02			
3 4	57.79, 67.08		51.06 ± 8.68		57.49 ± 7.37

Fig. 7 : Périodes commensurables des planètes joviennes Mörth et Schlamming (1979); Lopes et al. (2021). Les périodes des composantes extraites par ASS des séries de taches solaires SSN, GSLI, GSLs et GSLTG sont surlignées en rouge.

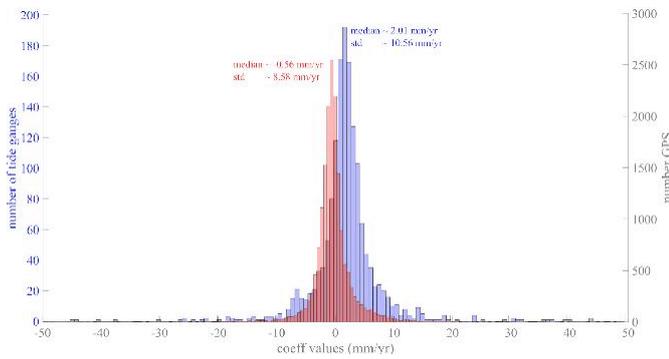
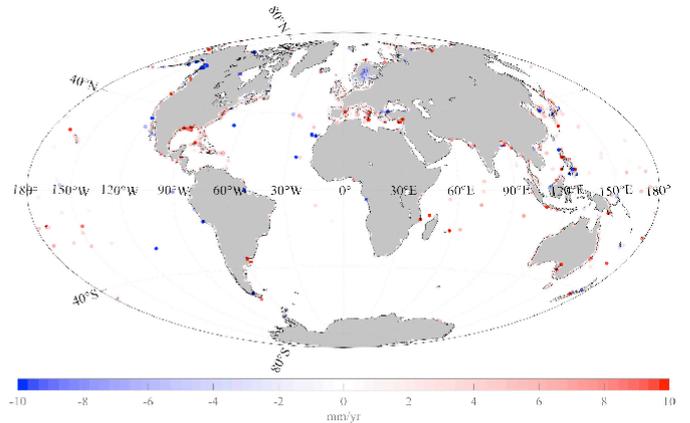


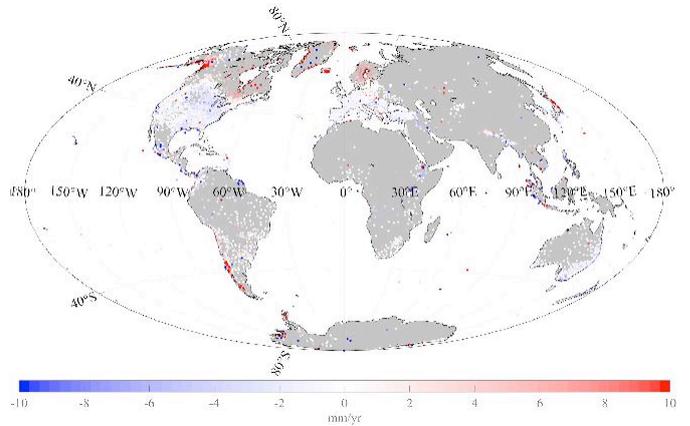
Fig. 8 : Superposition de l'histogramme des pentes récentes de 1548 marégraphes avec celui des données MIDAS (GPS) (à partir de Hammond et al. (2021)).

Comme le **GSLI** 1880-2009 intègre deux ensembles de données très différents (mesures des marégraphes et des satellites), nous avons repris l'analyse pour le **GSL** 1993-2009 (s pour court) sur la base des données satellitaires uniquement. Pour plus de détails sur la structure des données, nous renvoyons le lecteur à [Beckley et al \(2015\)](#). Pour des explications sur la constitution du jeu de données à partir des 27 années de mesures altimétriques par les satellites successifs TOPEX/Poseidon (T/P), Jason-1, Jason-2 et Jason-3, nous renvoyons le lecteur à [Beckley et al \(2010, 2017\)](#). Les données du niveau moyen des mers à l'échelle mondiale assemblent plusieurs ensembles de séries chronologiques, certains avec "Global Isostatic Adjustment applied", d'autres avec "GIA not applied". Ce dernier (sans GIA) est illustré sur la figure 12, de janvier 1993 à août 2020, avec un intervalle d'échantillonnage de 9,92 jours.

L'ASS de la courbe résultante GSL donne une tendance et des composantes à $1,00 \pm 0,02$, $0,49 \pm 0,01$, $3,06 \pm 0,25$, $15,4 \pm 4,7$, $1,50 \pm 0,05$, $6,06 \pm 0,73$ ans par ordre d'amplitude décroissante (ou plus grossièrement, compte tenu des incertitudes, tendance, 15-20, 6, 3, 1,5, 1 et 0,5 ans). Ces composantes sont représentées sur la Figure 13 (par ordre de période décroissante) ; leur somme équivaut à 87,3 % de la variance totale de la série (Figure 12). La somme des sept premières composantes extraites par l'ASS est tracée sous la forme d'une courbe rouge. Les quasi-périodes de 6,1, 3,1 et 1,5 ans pourraient correspondre à des harmoniques du cycle de Schwabe (cf. [Le Mouët et al. \(2020b\)](#), Tableau 1).



(a) Emplacements des marégraphes et valeurs locales de la pente de variation du niveau de la mer. Le code couleur va du positif (rouge) au négatif (bleu).



(b) Emplacements des sites GPS et changements locaux (pentes) du mouvement vertical du sol (VLM) à partir de la base de données MIDAS. Le code couleur est identique à celui de la figure 9a

Fig. 9 : Comparaison des pentes GPS et des pentes marégraphiques.

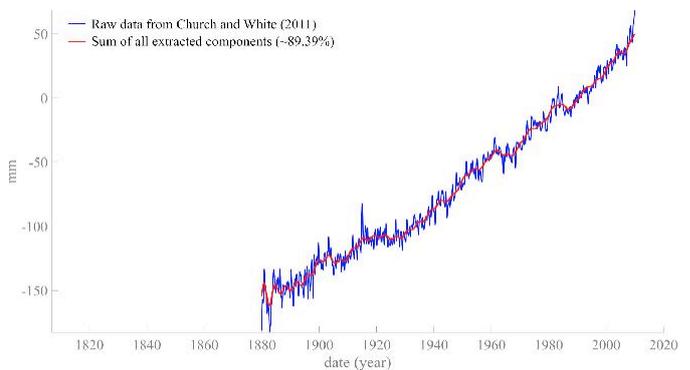
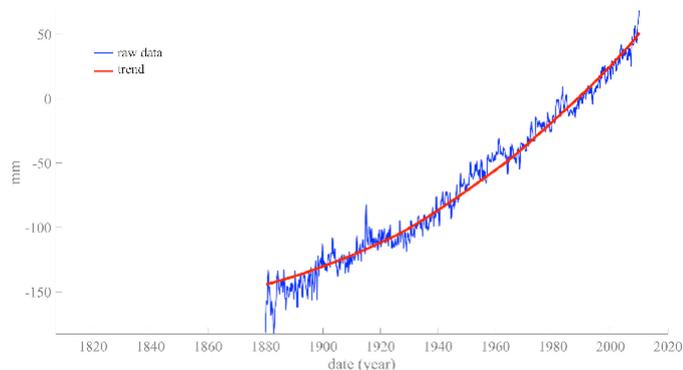


Fig. 10 : Courbe GSLI mondiale du niveau de la mer à partir de Church et White (2011) en bleu. Somme des 6 premières composantes extraites par ASS, courbe rouge.

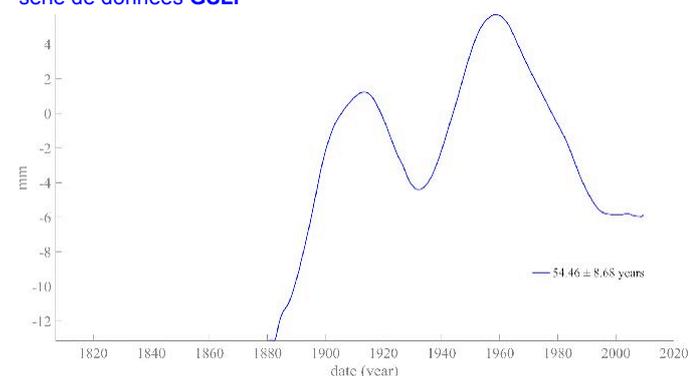
5. Discussion

5.1 Composantes partagés par **GSLI**, **GSLTG** et **SSN**.

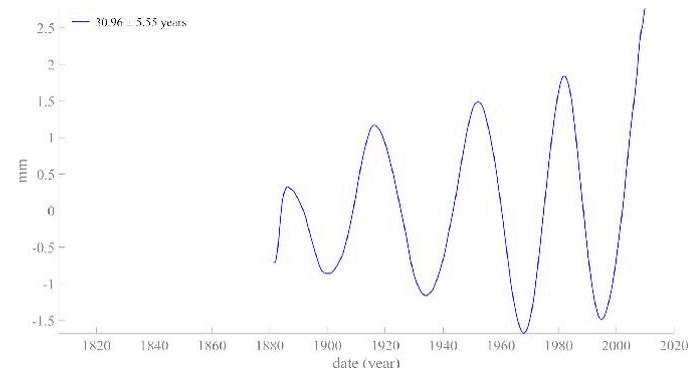
Malgré le fait que l'une soit incluse dans l'autre, les séries **GSLI** et **GSLs** ne partagent pas beaucoup de caractéristiques (cf. Tableau fig7). Leurs tendances sont similaires et elles possèdent toutes deux



(a) Première composante **ASS** (tendance, en rouge) superposée à la série de données **GSLI**



(b) Deuxième composante **ASS** (pseudo-période de 60 ans) de la série de données **GSLI**.

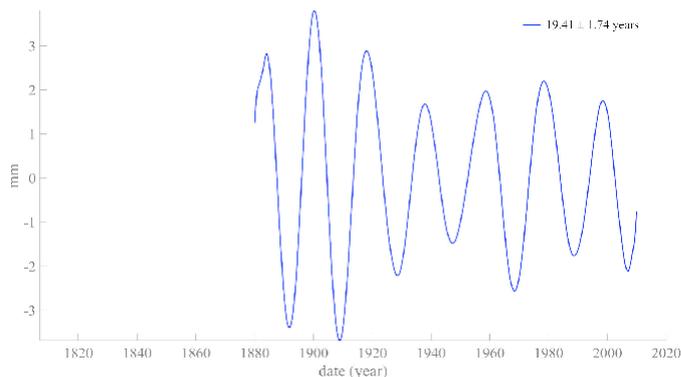


(c) Troisième composante **ASS** (pseudo-période de 30 ans) de la série de données **GSLI**.

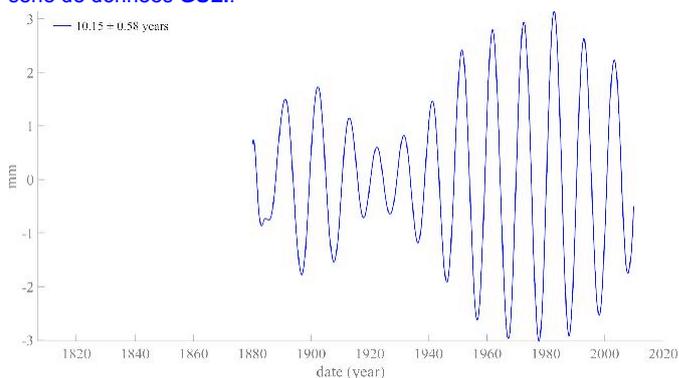
d'importantes composantes à 1 an et 6 mois, mais les deux séries ne partagent pas d'autres composantes quasi-périodiques (à moins que la composante 15 ans des **GSLs** puisse être considérée comme la même que la composante 20 ans des **GSLI**, compte tenu des incertitudes). De fait, la durée des données **GSLs** n'étant que de 27 ans, elle ne devrait pas être utilisée pour identifier les composants avec des périodes plus longues que, disons, 27/2 ou 15 ans.

En revanche, **GSLI** partage sept composantes avec **GSLTG** : une tendance, des composantes à 60, 30, 20, 10, 1 et 0,5 ans (cf. Tableau fig. 7).

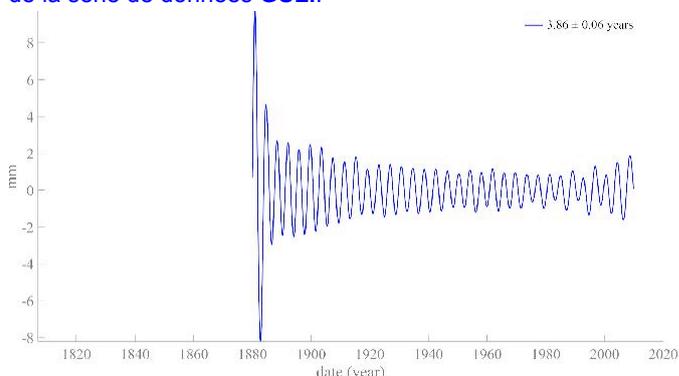
Le Mouët et al. (2019b) et Courtillot et al (2021) ont calculé les composantes **ASS** du nombre de taches solaires **SSN**, caractéristique de l'activité solaire. Quatre composants **SSN** sont retrouvées dans



(d) Quatrième composante **ASS** (pseudo-période de 20 ans) de la série de données **GSLI**.



(e) Cinquième composante **ASS** (pseudo-période de 11 ans) de la série de données **GSLI**.



(f) Sixième composante **ASS** (pseudo-période de 4 ans) de la série de données **GSLI**.

Fig. 11 : Six premières composantes extraites par **ASS** de la série de données **GSLI**.

GSLI (60, 30, 20, 10 ans) et six dans **GSLTG** (90, 60, 20, 30, 10, 5 ans), en tenant compte des incertitudes (par ex. $10,15 \pm 0,58$ et $10,64 \pm 1,17$ sont tous deux considérés comme équivalents au paquet **SSN** de 10,6 et 11,3 ans).

Une observation surprenante est l'amplitude de la composante annuelle des **GSLs** qui n'est que de 8 mm du sommet au creux. (Figure 13b), alors que les marégraphes enregistrent une amplitude moyenne d'un ordre de grandeur supérieur (80 mm ; figure 6a). Ceci pourrait être dû au fait que les marégraphes sont situés dans des eaux peu profondes où l'amplitude des vagues est amplifiée ; en tout état de cause, c'est là que le niveau de la mer est le plus pertinent

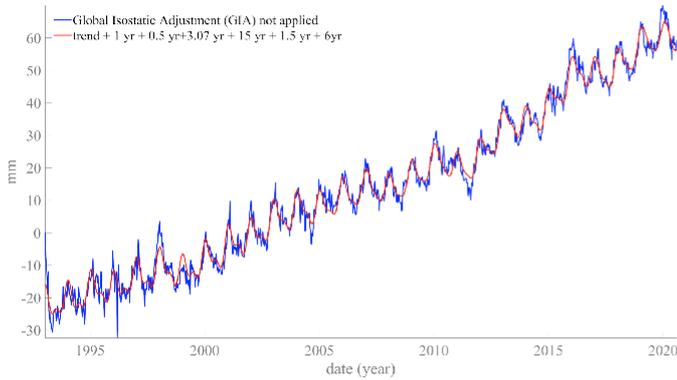
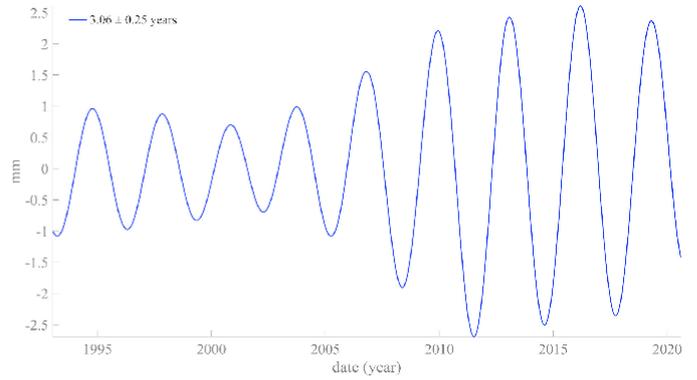
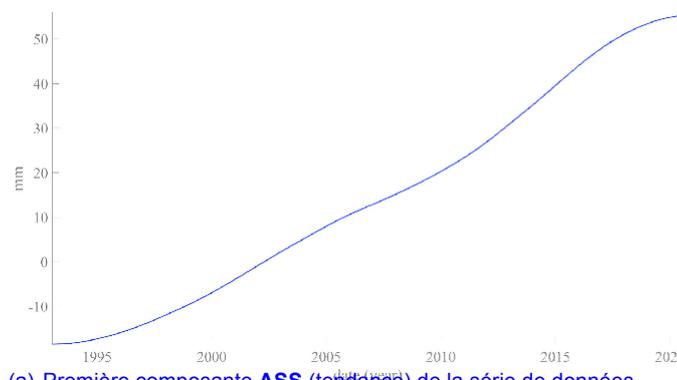


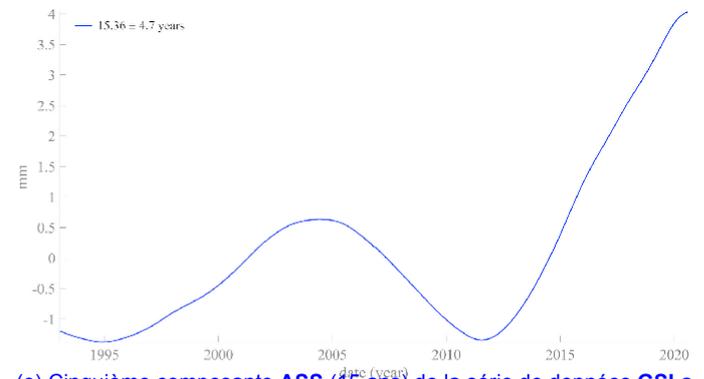
Fig. 12 : Niveau **GSLs** mondial de la mer (courbe bleue). Somme des premières sept composantes **ASS** (courbe rouge)



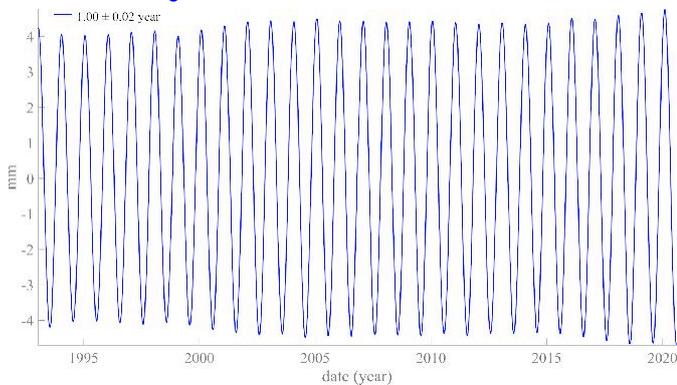
(d) Quatrième composante **ASS** (3 ans) de la série de données **GSLs**



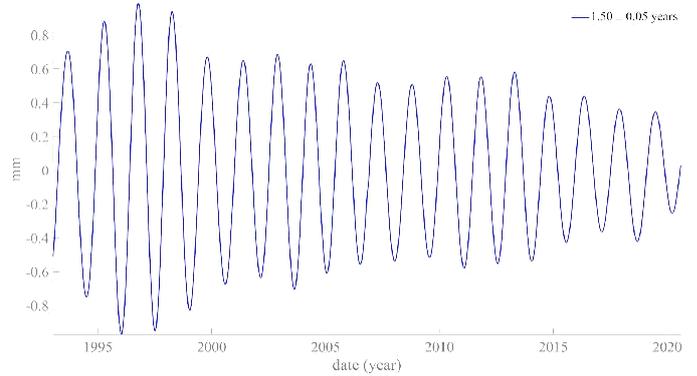
(a) Première composante **ASS** (tendance) de la série de données **GSLs** de la figure 12.



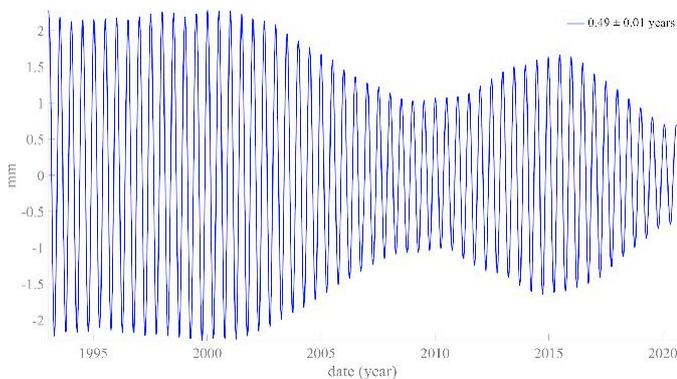
(e) Cinquième composante **ASS** (15 ans) de la série de données **GSLs**



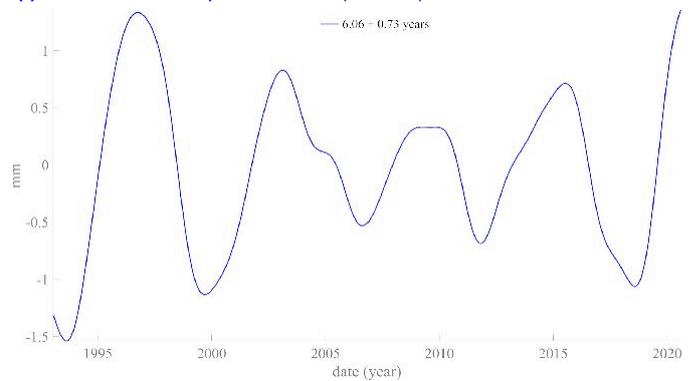
(b) Deuxième composante **ASS** (1 ans) de la série de données **GSLs**



(f) Sixième composante **ASS** (1,5 ans) de la série **GSLs**



(c) Troisième composante **ASS** (0,5 ans) de la série de données **GSLs**



(d) Septième composante **ASS** (6 ans) de la série **GSLs**

Fig. 13 : Sept premières composantes extraites par **ASS** de la série de données **GSLs**

pour les activités humaines. L'amplitude de la tendance entre 1860 et 2020 est de 80 mm pour le **GSLTG** (Figure 5b) et plus de 200 mm pour **GSLI** (Figure 10). De plus, avec une courbe **GSLTG** s'étendant sur deux siècles, nous voyons que la tendance des séries **GSLs** plus courtes pourrait en fait faire partie d'un cycle plus long (du même ordre que le cycle de 90 ans de Gleissberg).

5.2 Comparaison avec la pression globale PG. Ainsi, l'**ASS** révèle que **GSLI** et **GSLTG** partagent de nombreuses caractéristiques qui pourraient peser sur les mécanismes qui contrôlent les deux séries de variations du niveau des mers. Pour appuyer cette hypothèse, on peut essayer de trouver si un autre phénomène géophysique ne posséderait pas des traits caractéristiques similaires, avec les mêmes signatures spectrales. Nous avons voulu savoir si la pression moyenne globale de la Terre (**PG**) répondait à ces exigences. Une série de pressions atmosphériques moyennes mensuelles (sur toute la planète) est disponible à partir de 1846 (Allan et Ansell 2006). Elle est accessible via le site internet du Met Office Hadley Center ⁴ sous le nom HadSPL2. En suivant les travaux de Laplace sur le thème de la stabilité spatiale et temporelle de la pression (Laplace (1799), livre IV, chap 4, page 294), nous avons élaboré une série mensuelle des **PG** et l'avons soumise à l'**ASS** : les 4 premières composantes, c'est-à-dire la tendance suivie des périodes de 1 an, 6 mois et ~25 ans, représentent 98% de la variance totale. **GSLTG** et **PG** partagent ainsi trois composantes majeures à 20/25 ans, 1 an et 6 mois. La comparaison de certaines des caractéristiques de **GSLTG** et **PG** sont illustrées figure 14. Les composantes annuelles et semestrielles correspondent en phase et en fréquence et sont légèrement modulées avec une constante de temps de l'ordre d'un siècle ou plus. Les deux séries ont des composantes 20/25 ans qui dérivent l'une par rapport à l'autre. Il est intéressant de noter que la dérivée de la tendance de la pression **PG** correspond à la tendance de **GSLTG**, suggérant une relation de la forme $GSLTG \sim (d/dt) PG$. De même, les rapports des amplitudes des différentes composantes **ASS** de **GSLTG** et **PG** restent approximativement constants. (tableau fig. 15). Le niveau de la mer et la pression réagissent de manière similaire sur toutes les échelles de temps.

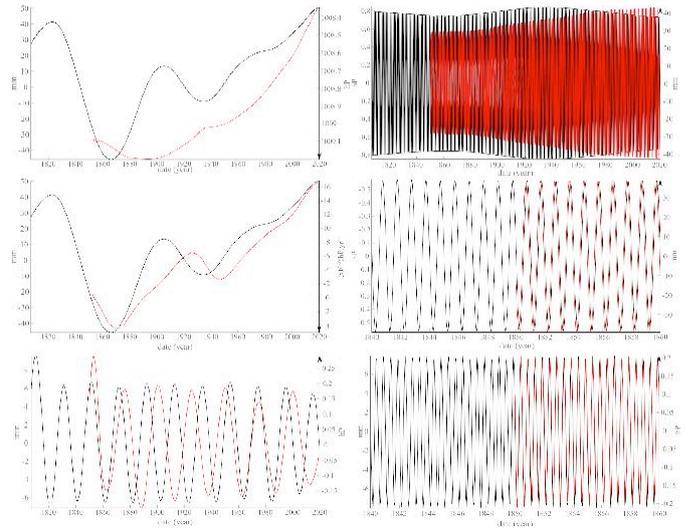


Fig. 14 : En haut à gauche, la superposition des tendances **GSLTG** (en noir) et **PG** (en rouge). Au milieu à gauche, la superposition de la tendance **GSLTG** (en noir) et de la dérivée première de la tendance de **PG** (en rouge). En bas à gauche, les composantes 20 ans de **PG** (rouge) et **GSLTG** (noir). En haut à droite et au milieu à droite (en zoom), les oscillations annuelles de **GSLTG** (noir) et **PG** (rouge). En bas à droite, les cycles semestriels de **PG** (rouge) et **GSLTG** (noir).

Cycles (yr)	GSLTG		
	Sea Level (mm)	Pressure (hPa)	ratio (hPa/mm)
Trend	45	0.8	0.019
20-30	18	0.45	0.025
1	80	1.6	0.020
0.5	16	0.3	0.019

Fig. 15 : Rapports des composantes **ASS** de **PG** à **GSLTG** avec les mêmes périodes (voir texte).

5.3 Comparaison avec le mouvement moyen du pôle de rotation (PR). Il est généralement admis (par exemple Nakiboglu et Lambeck (1980) que le mouvement moyen du pôle de rotation (**PR**) et le niveau moyen de la mer (qu'il s'agisse de **GSLTG** ou de **GSL**) appartiennent à une même famille, en raison de la réorganisation des masses de surface due au mouvement du pôle. Comme les équations de Liouville-Euler sont un système différentiel linéaire du second ordre, on comprend la ressemblance entre **PR** et **GSLTG** ou **GSL**, au moins pour les longues périodes. L'analyse de la série **RP** peut-elle apporter un éclairage supplémentaire sur la question de l'augmentation du niveau de la mer (nous renvoyons le lecteur aux travaux antérieurs sur le mouvement polaire de Lopes et al. (2017); Le Mouët et al. (2020a); Lopes et al. (2021)) ?

La série de données décrivant les coordonnées du pôle de rotation (**PR**) est maintenue par l'International Earth Rotation and

Reference Systems Service (**IERS**)⁵. Deux séries de mesures des coordonnées polaires m_1 et m_2 sont fournies par l'**IERS** sous les codes EOP-C01-IAU1980 et EOP-14-C04. La première s'étend de 1846 au 1er juillet 2020 avec un taux d'échantillonnage de 18,26 jours, et la seconde s'étend de 1962 au 1er juillet 2020 avec un échantillonnage quotidien. La Figure 16 montre les tendances (en haut) et les dérivées (en bas) des coordonnées du pôle de rotation (**RP**) m_1 et m_2 ainsi que ceux du **GSLTG** (1807-2020). Il existe une anti-corrélation significative entre la tendance de **GSLTG** et la dérivée de la tendance de m_2 (**GSLTG** (d/dt) **RP**), la première devant la seconde de plusieurs décennies (Figure 16, en bas à gauche). Cette caractéristique a également été notée pour le marégraphe de Brest par Le Mouët et al. (2020a). Il s'agit d'une autre série de preuves observationnelles que la courbe du niveau de la mer basée sur les

⁴ <http://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadspl2/data/download.html>

⁵ <https://www.iers.org/IERS/EN/DataProducts/EarthOrientationData/eop.html>

marégraphes obéit à un mécanisme physique sous-jacent.

Les trois principales composantes du mouvement du pôle, c'est-à-dire la dérive de Markovitch, l'oscillation de Chandler (qui n'a encore jamais été détectée dans le niveau de la mer) et l'oscillation forcée annuelle, transportent plus de 75 % de l'énergie totale du signal (variance), [Lopes et al. 2017, 2021, 2022](#). [Lopes et al. \(2017\)](#) ont également démontré la présence d'autres composantes à 22 ans (Hale), 11 ans (Schwabe) et une harmonique à 5,5 ans. L'ordre de grandeur de ces composantes solaires est de 10^{-12} à 10^{-14} rad.sec⁻¹, soit de un à 4 ordres de grandeur plus petit que les composantes principales (10^{-11} à 10^{-10} rad.sec⁻¹). Dans [Courtillot et al \(2021\)](#), [Le Mouët et al. \(2021\)](#), [Lopes et al. \(2021\)](#), il a été montré que la dérivée de la composante de Markovitch incluait le cycle de 90 ans (Gleissberg) comme tendance. [Lopes et al. \(2021\)](#) ont identifié d'autres composantes qui apparaissent également dans la série des taches solaires SSN ([Courtillot et al., 2021](#)). Nous nous sommes limités aux (quasi-)périodes partagées de 90, 22, 11, 5,5, 1,4 (Chandler) et 1 an.

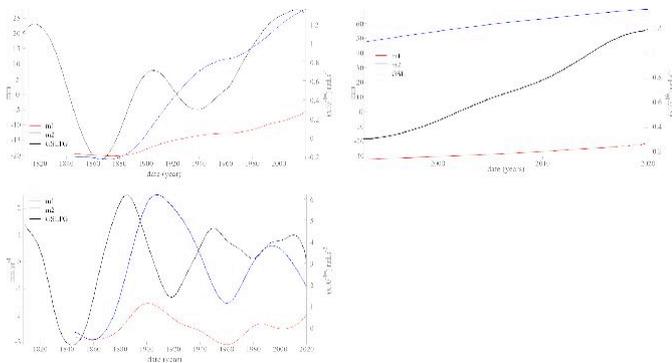


Fig. 16: Tendances (en haut) et leurs dérivées (en bas) des coordonnées du pôle de rotation (PR) m_1 (rouge) et m_2 (bleu) par rapport à ceux du GSLTG (à gauche ; 1807-2020).

5.4 Le système Liouville-Euler et les composantes solaires dans le niveau de la mer. Le système d'équations de Liouville-Euler peut s'écrire (cf. [Lambeck \(2005\)](#); chapitres 3 et 4) :

$$(1/\sigma_1) \frac{dm}{dt} + m = f \tag{4}$$

$$\frac{dm_3}{dt} = f_3$$

$dm/dt = m_1 + i m_2$, où (m_1, m_2) sont les coordonnées du mouvement du pôle de rotation de la Terre (PR) et $f = f_1 + if_2$ et f_3 sont les fonctions d'excitation. Celles-ci sont explicitement décrites dans [Lambeck \(2005\)](#), chapitre 4, système 4.1.1, page 47. Ces fonctions appartiennent à trois familles distinctes : les masses, les mouvements (de masses) et les forces imposées (couples). Les paramètres (m_1, m_2, m_3) fournissent un scalaire global pour le mouvement des pôles, et les fonctions d'excitation sont également globales. Le système couplé (4) étant linéaire, toute composante périodique trouvée dans les données/observations (m_1, m_2, m_3) doivent également être présentes dans (f_1, f_2, f_3) .

Si le système (4) s'applique, puisque les variations du niveau de la mer sont la partie mobile des fonctions d'excitation, et puisque le cycle de Gleissberg (90 ans) et les composantes annuelles ont été trouvés, on devrait également retrouver la composante de Chandler (1,4 an). De la même manière, [Moreira et al.\(2021\)](#) ont identifié une oscillation de 11 ans, [Jevrejeva et al.\(2006\)](#) une oscillation de 22 ans et [Chambers et al. \(2012\)](#) une autre de 60 ans (solaire, cf. [Courtillot et al \(2021\)](#)) de faible amplitude dans le mouvement de rotation du pôle (cf. [Lopes et al. 2021, 2022](#)). Ainsi, les cycles qui sont généralement associés au Soleil sont également détectés dans le niveau de la mer, bien qu'ils soient une composante très faible du mouvement polaire.

5.5 Forçage planétaire. Laplace a prédit que toutes les masses terrestres devaient être influencées par d'autres corps célestes, sur des périodes beaucoup plus longues (bien qu'il n'ait pas eu les données pour le démontrer expérimentalement). Pour ces durées plus longues, les planètes représentent donc des responsables potentielles. Si l'on étudie des durées courtes par rapport à une décennie, la composante de 11 ans sera incluse dans la tendance. De même, si l'on regarde les variations inférieures à 5 jours, le cycle lunaire de 28 jours sera inclus dans la tendance. Ceci est particulièrement vrai pour les enveloppes fluides. Dans [Courtillot et al \(2021\)](#), nous avons montré que les taches solaires, qui se déplacent sur l'enveloppe fluide externe du Soleil, comportent des composantes dont les périodes peuvent être liées aux éphémérides planétaires (périodes commensurables des planètes joviennes, comme proposé par [Mörth et Schlamminger, 1979](#)), à savoir 165 ans (cycle de José, associé à Neptune), 90 ans (cycle de Gleissberg, associé à Uranus), 30 ans (Saturne), 22 ans (cycle de Hale, une commensurabilité Jupiter/Saturne), 11 ans (cycle de Schwabe, associé à Jupiter), etc.

La Terre solide agit comme intégrateur (ex. [Lambeck \(2005\)](#), chapitre 3) aux périodes plus longues (par exemple [Lopes et al. \(2021\)](#)), mais réagit presque instantanément aux périodes plus courtes (ex. [Le Mouët et al. \(2019c\)](#)). Les effets sont importants dans le premier cas, moins dans le second. Comme le souligne [Laplace \(1799\)](#), Livre IV, Chapitres 4 et 5, comme l'atmosphère et les océans sont des fluides de faible viscosité, ils se comportent en fait comme des enveloppes solides sur les périodes plus longues. C'est par exemple la raison pour laquelle les oscillations annuelles observées sur les marégraphes (Figures 13) ont des amplitudes similaires. À cette réponse s'ajoute la solution décrite par les équations de Liouville-Euler. Elle est utilisée par exemple par [Nakiboglu et Lambeck \(1980\)](#), qui considèrent qu'il y a une réorganisation des masses de surface lorsque l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre évolue dans l'espace. Les forces externes influencent le mouvement polaire et cela devrait également s'observer dans le niveau de la mer et la pression. Nous retrouvons ainsi les signatures de ces influences dans les tendances (directement ou à travers leurs dérivées) et les composantes les plus énergétiques. L'élévation apparente du niveau de la mer est donc similaire à la courbe du mouvement polaire : c'est pourquoi, comme d'autres, nous trouvons le motif en entonnoir des marégraphes. La masse du système est constante, ce qui concorde avec le fait que la variation de pression reste constante et liée au niveau de la mer. En suivant l'hypothèse d'un forçage externe commun (commun à la Terre solide et à ses enveloppes fluides), on

explique pourquoi la dérivée de la tendance de **PG** (avec un signe inversé) et la tendance du **GSLTG** se correspondent assez bien (Figure 14, milieu gauche).

6. Résumé et conclusions

Dans le présent article, nous avons d'abord analysé les variations du géoïde, en utilisant les données marégraphiques pour la période 1807-2020 (**GSLTG**) puis les variations du niveau global de la mer combinant marégraphes et données satellitaires (**GSLI** ; Church et White (2011)), enfin, avec une bien meilleure couverture spatiale mais un horizon temporel beaucoup plus restreint (1993-2020), celles des données satellitaires uniquement (**GSLs**, Beckley et al (2015)). Notre objectif principal a consisté à déterminer les tendances et les composantes périodiques ou quasi-périodiques successives de ces séries temporelles, en utilisant la puissante méthode d'analyse spectrale singulière (**ASS**) que nous avons utilisée, avec des résultats intéressants, dans une série d'articles précédents (Lopes et al. 2017, 2021; Le Mouél et al. 2019a,b, 2021; Courtillot et al 2021).

Comme les données satellitaires sont d'abord corrigées à l'aide de marégraphes, nous avons analysé séparément les données des marégraphes de 71 stations (série **GSLTG**). Nous avons observé toutes sortes de caractéristiques, avec des valeurs moyennes croissantes, stables ou décroissantes (tendance), donnant à l'ensemble complet des données, une forme caractéristique d'entonnoir. La moyenne **GSLTG** résultante oscille autour d'une valeur presque constante. Entre 1860 et 2020, la tendance augmente de 90 mm, soit une contribution au taux d'élévation moyen de 0,56 mm/an.

Nos observations sont compatibles avec des résultats antérieurs également basés sur des données marégraphiques mais utilisant des méthodes différentes : Gornitz et coll. (1982) figure 02, Warrick et Oerlemans (1990) figures 9.1 et 9.2 et Douglas (1992) figure 03 montrent la distribution en forme d'entonnoir des données avec des valeurs en accord avec **GSLTG**.

L'analyse **ASS** de la série **GSLTG** identifie des composantes avec des périodes célestes déjà trouvées lors de l'analyse des données du marégraphe de Brest (Le Mouél et al. 2021). Nous avons montré (tableau fig. 15) que les rapports des amplitudes des composantes **ASS** (tendance, 20-30 ans, 1 an et 0,5 an) du **GSLTG** par rapport à la pression globale **PG** sont presque constants (à 0,02 hPa/mm). Cette observation soutient l'idée que les données marégraphiques contiennent des informations importantes sur les liens physiques entre la pression moyenne et le niveau de la mer (géoïde).

Les périodes plus longues (annuelles à multi-décennales) que nous avons rencontrées dans les courbes du niveau de la mer **GSLTG** et **GSLI** de la présente étude ont déjà été rencontrées dans un certain nombre de séries chronologiques géophysiques et héliophysiques. Ces périodes (ou quasi-périodes) sont de 90/80, 60, 30, 20, 10/11 et 4/5 ans. Elles peuvent être comparées aux périodes commensurables des planètes joviennes agissant sur la Terre et le Soleil, comme proposé par Mörth et Schlamminger (1979). La combinaison des périodes de révolution de Neptune (165 ans), Uranus (84 ans), Saturne (29 ans) et Jupiter (12 ans) et de plusieurs périodes commensurables fait apparaître des pseudo-cycles supplémentaires de 60 et 20 ans au niveau des taches solaires (Le Mouél et al. 2020a; Courtillot et al 2021) ainsi que dans un certain nombre de phénomènes terrestres (Mörth et Schlamminger 1979; Courtillot et al 2013; Scafetta 2016; ?; Lopes et al. 2017;

Le Mouél et al. 2020a; Lopes et al. 2021; Scafetta et al. 2020; Bank et Scafetta 2022), en particulier au niveau de la mer (Chambers et al. 2012; Parker 2013; Parker et Ollier 2016). Il n'est donc pas surprenant de trouver ces périodes joviennes dans les données **GSLTG**. Même les tendances pourraient s'inscrire dans des cycles commensurables plus longs que la période pour laquelle les données sont disponibles.

Les périodes (souvent conjointes) rencontrées dans les changements du niveau de la mer, le mouvement de rotation polaire **RP** et l'évolution de la pression globale **PG** et les relations entre certaines de leurs tendances (telles que déterminées à l'aide de l'**ASS**) suggèrent qu'il peut exister des liens physiques et des relations de causalité entre ces phénomènes géophysiques et les séries chronologiques d'observations disponibles. L'omniprésence de nombreuses composantes communes dans les variations de nombreux phénomènes naturels (qui a priori pourraient sembler largement sans rapport) nous a conduit à revenir au forçage général envisagé par Laplace (1799) et à toute la théorie qu'il a développée. Dans son Traité de mécanique céleste de 1799, Laplace a ainsi établi les équations différentielles partielles de Liouville-Euler qui décrivent la rotation et la translation de l'axe de rotation de tout corps céleste, et montré que le seul paramètre qui influençait la rotation des corps célestes était l'action des autres corps célestes. Laplace a souligné qu'il fallait tenir compte des moments cinétiques orbitaux de toutes les planètes en plus des attractions gravitationnelles et conclu que l'axe de rotation de la Terre devait subir des mouvements dont les composantes comportaient les périodes ou combinaisons de périodes du Soleil, de la Lune et des planètes (en particulier les planètes joviennes).

Dans Lopes et al. (2021, 2022), nous avons testé les résultats théoriques de Laplace à l'aide des observations accumulées depuis son époque. Dans Courtillot et al (2021), nous avons mis en évidence l'influence motrice des planètes (essentiellement les planètes joviennes) sur l'axe de rotation de la Terre (Lopes et al. 2021), et sur l'activité solaire, par des échanges de moment cinétique. Dans le présent article, nous avons étendu cette analyse aux changements du niveau global de la mer, tel que mesuré par les marégraphes (**GSLTG**), et nous avons en outre montré qu'il existait plusieurs composantes périodiques partagées avec la pression globale **PG** et l'axe de rotation de la Terre **RP**.

Les calculs de Laplace montrent que les moments cinétiques des planètes agissent à la fois directement sur la Terre et sur les couches externes fluides du Soleil, et perturbent sa rotation, donc sa révolution et éventuellement l'axe de rotation **RP** de la Terre. L'analyse **ASS** des enveloppes des dérivées des trois premières composantes du mouvement polaire donne un certain nombre de périodes supplémentaires qui appartiennent à la série des périodes commensurables, parmi lesquelles 70 ans, 60 ans (Saturne ; également trouvée dans les températures globales et les oscillations océaniques), 40 ans (une période de révolution commensurable des quatre planètes joviennes), 30 ans (Saturne), 22 ans (Jupiter et Soleil). Il en va de même pour les trois premières composantes **ASS** de la série des taches solaires **SSN** (tendance ou cycle de Jose 175 ans, lié à Neptune ; cycle de Schwabe de 11 ans, lié à Jupiter ; et cycle de Gleissberg de 90 ans, lié à Uranus). Presque toutes les (quasi-)périodes trouvées dans les composantes **ASS** du niveau de la mer (**GSLI** et **GSLTG**), de la pression globale (**PG**) et du mouvement polaire (**RP**), de leurs modulations et de leurs dérivées peuvent ainsi être associées aux planètes joviennes (Tableau fig. 15). Elles complètent la liste des composantes **ASS** quasi-périodiques

et périodiques que l'on retrouve dans **GSLI**, **GSLTG**, **GP**, **RP** et **SSN** (90, 60, 30, 20, 10, 5, 1 et 0,5 ans) et qui peuvent toutes être associées à des forçages planétaires, comme l'envisage Laplace. En particulier, les facteurs de forçage planétaires sont probablement responsables d'un grand nombre de composantes des variations du niveau de la mer mesurées par les marégraphes. Il serait particulièrement intéressant de rechercher des séries de données de haute qualité sur des intervalles de temps plus longs, qui pourraient permettre de vérifier si les tendances elles-mêmes peuvent être des segments de composantes de périodicités encore plus longues (par exemple, le cycle de 175 ans de Jose). En tout état de cause, les premières composantes **ASS** des séries analysées dans ce document comprennent une grande fraction de la variance du signal : 95% pour les 6 premières composantes de **GSLTG**, 89% pour les 6 premières composantes de **GSLI**, 87% pour les 6 premières composantes de **GSLs**, 98% pour les 4 premières composantes de **PG** et 75% pour les 3 premières composantes de **RP**. Il est clair que l'on devrait maintenant essayer de modéliser physiquement ces séries avec cet ensemble de périodes (composantes **ASS**) avant d'essayer d'invoquer d'autres sources (fonctions de forçage).

Références

- Allan, R. & Ansell, T., "A new globally complete monthly historical gridded mean sea level pressure dataset (HadSLP2): 1850–2004", *Journal of Climate*, 19(22), 5816-5842, 2006
- Bank, M. J. & Scafetta, N., "Scaling, mirror symmetries and musical consonances among the distances of the planets of the solar system", *arXiv preprint arXiv:2202.03939*, 2022
- Beckley, B.D., N. P. Zelensky, S. A. Holmes, F. G. Lemoine, R. D. Ray, G. T. Mitchum, S. D. Desai & S. T. Brown, "Assessment of the Jason-2 Extension to the TOPEX/Poseidon, Jason-1 Sea-Surface Height Time Series for Global Mean Sea Level Monitoring", *Marine Geodesy*, Vol 33, 2010.
- Beckley, B., Zelensky, N.P., Holmes, S.A., Lemoine, F.G., Ray, R.D., Mitchum, G.T., Desai, S. & Brown, S.T., "Global Mean Sea Level Trend from Integrated Multi-Mission Ocean Altimeters TOPEX/Poseidon Jason-1 and OSTM/Jason-2 Version 3", Ver. 3. PO.DAAC, CA, USA, Dataset accessed, 2015
- Beckley, B. D., Callahan, P. S., Hancock III, D. W., Mitchum, G. T., & Ray, R. D., "On the "Cal Mode" Correction to TOPEX Satellite Altimetry and Its Effect on the Global Mean Sea Level Time Series.", *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(11), 8371-8384, 2017.
- Blewitt, G., Kreemer, C., Hammond, W. C., & Gazeaux, J., "MIDAS robust trend estimator for accurate GPS station velocities without step detection", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(3), doi.org/10.1002/2015JB021252, 2054-2068, 2016
- Chambers, D. P., Merrifield, M. A. & Nerem, R. S., "Is there a 60-year oscillation in global mean sea level?", *Geophysical Research Letters*, 39(18), 2012
- Charvatova, I. & Strestik, J., "Long-term variations in duration of solar cycles", *Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia*, 42, 90-97, 1991
- Chen, Xianyao, Ying Feng, & Norden E. Huang. "Global sea level trend during 1993 - 2012.", *Global and Planetary Change*, 112: 26-32, 2014
- Church, J. A. & White, N. J., "Sea-level rise from the late 19th to the early 21st century", *Surveys in geophysics*, 32(4), 585-602, doi.org/10.1007/s10712-011-9119-1, 2011
- Cionco, R.G., Kudryavtsev, S.M. & Soon, W.H., "Possible Origin of Some Periodicities Detected in Solar Terrestrial Studies: Earth's Orbital Movements.", *Earth and Space Science*, 8.8: e2021EA001805, doi.org/10.1029/2021EA001805, 2021
- Coles, W. A., Rickett, B. J., Rumsey, V. H., Kaufman, J. J., Turley, D. G., Ananthakrishnan, S. A. J. W., ... & Sime, D. G., "Solar cycle changes in the polar solar wind", *Nature*, 286(5770), 239-241, 1980
- Courtillot, V., Le Mouél, J.-L., Kossobokov, V., Gibert, G. and Lopes, F., "Multi-Decadal Trends of Global Surface Temperature: A Broken Line with Alternating 30 yr Linear Segments?", *Atmospheric and Climate Sciences*, Vol.3, No.3, Article ID:34080, 2013
- Courtillot, V., Lopes, F. & Le Mouél, J.-L., "On the prediction of solar cycles", *Solar Physics*, 296.1, 1-23, 2021.
- Douglas, B. C., "Global sea level rise", *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 96.C4: 6981- 6992, 1991
- Douglas, B. C., "Global sea level acceleration", *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 97(C8), 12699-12706, 1992
- Douglas, B. C., "Global sea rise: a redetermination", *Surveys in Geophysics*, 18(2), 279-292, 1997
- Etkins, R., & Epstein, E. S., "The rise of global mean sea level as an indication of climate change", *Science*, 215(4530), 287-289, 1982
- Farrell, W. E. & Clark, J. A., "On post glacial sea level", *Geophysical Journal International*, 46(3), doi.org/10.1111/j.1365-246X.1976.tb01252.x, 647-667, 1976
- Glattig, G., Kletting, P., Reske, S. N., Hohl, K., & Ring, C. "Choosing the optimal fit function: Comparison of the Akaike information criterion and the F test", *Medical physics*, 34(11), 4285-4292, 2007.
- Glauert, W., "A table of secular variations of the solar cycle", *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*, 49(4), 243-244, 1944
- Golub, G. H., & Reinsch, C., "Singular value decomposition and least squares solutions", In *Linear algebra* (pp. 134-151), Springer, Berlin, Heidelberg, 1971
- Golyandina, N. et Zhigljavsky, A., "Singular Spectrum Analysis for time series", (Vol. 120). Berlin: Springer, 2013
- Gornitz, V., Lebede, S., & Hansen, J., "Global sea level trend in the past century", *Science*, 215(4540), 1611-1614, 1982
- Hammond, W. C., Blewitt, G., Kreemer, C., & Nerem, R. S., GPS Imaging of Global Vertical Land Motion for Studies of Sea Level Rise, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(7), e2021JB022355, doi.org/10.1029/2021JB022355, 2021
- Jacobs, W. C., "Sea level departures on the California coast as related to the dynamics of the atmosphere over the North Pacific Ocean", *J. mar. Res.*, 2(3), 181-194, 1939
- Jevrejeva, S., Moore, J. C., Grinsted, A. & Woodworth, P. L., "Recent global sea level acceleration started over 200 years ago?", *Geophysical Research Letters*, 35(8), 2006
- Jose, P. D., "Sun's motion and sunspots", *The Astronomical Journal*, 70(3), 193-200, 1965
- LaFond, E. C., "Variations of sea level on the Pacific coast of the United States", *J. Mar. Res.*, 2(1), 17-29, 1939.
- Lambeck, K. & Nakiboglu, S. M., "Recent global changes in sealevel", *Geophysical Research Letters*, 11(10), 959-961, doi.org/10.1029/GL011i010p00959, 1984
- Lambeck, K., "La rotation variable de la Terre : causes et conséquences géophysiques", Cambridge University Press, 2005
- Laplace, P. S., "Traité de mécanique céleste", de l'Imprimerie de Crapelet, 1799
- Lau, K.M. & Hengyi Weng. "Climate signal detection using wavelet transform: How to make time series sing », *Bulletin of the American meteorological society*, 76.12 : 2391-2402, 1995
- Le Mouél, J. L., Lopes, F. & Courtillot, V., "A solar signature in many climate indices", *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(5), 2600-2619, 2019a
- Le Mouél, J. L., Lopes, F. & Courtillot, V., "Singular spectral analysis of the aa and Dst geomagnetic indices", *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124(8), 6403-6417, 2019b
- Le Mouél, J. L., Lopes, F., Courtillot, V. & Gibert, D., "On forcings of length of day changes: From 9-day to 18.6-year oscillations", *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 292, 1-11, 2019c
- Le Mouél, J. L., Lopes, F. & Courtillot, V., "Characteristic time scales of decadal to centennial changes in global surface temperatures over the past 150 years", *Earth and Space Science*, 7(4), doi.org/10.1029/2019EA000671, 2020a
- Le Mouél, J. L., Lopes, F. & Courtillot, V., "Solar turbulence from sunspot records", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 492(1), 1416-1420, doi.org/10.1093/mnras/stz3503, 2020b

- Le Mouél, J. L., Lopes, F. & Courtillot, V., "Sea-Level Change at the Brest (France) Tide Gauge and the Markowitz Component of Earth's Rotation", *Journal of Coastal Research*, doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-20-00110.1, 2021
- Lemmerling, P. & S. Van Hu el, "Analysis of the structured total least squares problem for hankel/toeplitz matrices", *Numerical Algorithms* 27 (1), 89–114. 16, 2001.
- Lopes, F., Le Mouél, J. L. & Gibert, D., "The man-tle rotation pole position. A solar component", *Comptes Rendus Geoscience*, 349(4), 159-164, doi.org/10.1016/j.crte.2017.06.001, 2017
- Lopes, F., Le Mouél, J. L., Courtillot, V. & Gibert, D., "On the shoulders of Laplace", *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 316, 106693, 2021
- Lopes, F., Courtillot, V., Mouél, J. L. & Gibert, D., "On two formulations of polar motion and identification of its sources", arXiv preprint [arXiv:2204.11611](https://arxiv.org/abs/2204.11611), 2022
- McEwen, G. F., "Some energy relations between the sea surface and the atmosphere". Yale Univ, 1937
- Marcos, M., & Tsimplis, M. N., Coastal sea level trends in Southern Europe, *Geophysical Journal International*, 175(1), 70-82, doi.org/10.1111/j.1365-246X.2008.03892.x, 2008
- Marmer, H. A., "Tidal datum planes (No. 135)", US Government Printing Office, 1927.
- Meier, M. F., "Contribution of small glaciers to global sea level", *Science*, 226(4681), 1418-1421, 1984.
- Menke, W., "Geophysical data analysis: Discrete inverse theory", volume 45 of International geophysics series, 1989 Mitrovica, J. X. & Milne, G. A., "On post-glacial sea level: I. General theory", *Geophysical Journal International*, 154(2), 253-267, doi.org/10.1046/j.1365-246X.2003.01942.x, 2003
- Moreira, L., Cazenave, A., et Palanisamy, H. "Influence of interannual variability in estimating the rate and acceleration of present-day global mean sea level." *Global and Planetary Change*, 199, 103450, 2021
- Morth, H. T., & Schlamming, L., "Planetary motion, sunspots and climate", *Solar-terrestrial influences on weather and climate* (pp. 193-207), Springer, Dordrecht, 1979
- Nakiboglu, S. M., & Lambeck, K., "Deglaciation effects on the rotation of the Earth", *Geophysical Journal Inter.*, 62(1), 49-58, doi.org/10.1111/j.1365-246X.1980.tb04843.x, 1980
- Nomitsu, T., & Okamoto, M., "The causes of the annual variation of the mean sea level along the Japanese coast", *Memoirs of the College of Science, Kyoto Imperial University*. Series A, 10(3), 125-161, 1927
- Parker, A., "Sea level trends at locations of the United States with more than 100 years of recording", *Natural Hazards*, 65(1), 1011-1021, 2013
- Parker, A., & Ollier, C. D., "Coastal planning should be based on proven sea level data", *Ocean & Coastal Management*, 124, 1-9, 2016
- Peltier, W.R. & Andrews, J.T, "Glacial-isostatic adjustment – I", The forward problem, *Geophysical Journal Inter.*, 46(3), 605-646, 1976
- Peltier, W. R. & Tushingham, A. M., "Global sea level rise and the greenhouse effect: might they be connected?", *Science*, 244(4906), 806-810, 1989
- Scafetta, N., "Empirical evidence for a celestial origin of the climate oscillations and its implications", *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 72(13), 951-970, 2010
- Scafetta, N., "High resolution coherence analysis between planetary and climate oscillations", *Advances in Space Research*, 57.10 (2016): 2121-2135, 2016
- Scafetta, N., Milani, F. & Bianchini, A., "A 60-year cycle in the Meteorite fall frequency suggests a possible interplanetary dust forcing of the Earth's climate driven by planetary oscillations", *Geophysical Research Letters*, 47(18), e2020GL089954, 2020
- Scafetta, N., "Reconstruction of the Interannual to Millennial Scale Patterns of the Global Surface Temperature", *Atmosphere*, 12(2), 147, 2021
- Schlesinger, M. E. & Ramankutty, N., "An oscillation in the global climate system of period 65–70 years", *Nature*, 367(6465), 723-726, 1994
- Spada, G. & Stocchi, P., The sea level equation, theory and numerical examples, (pp. 1-96). Aracne Editrice, 2006
- Spada, G. & Stocchi, P., SELEN: A Fortran 90 program for solving the sea-level equation, *Computers & Geosciences*, 33(4), 538-562, doi.org/10.1016/j.cageo.2006.08.006, 2007
- Spada, G., Melini, D., Galassi, G., & Colleoni, F., Modeling sea level changes and geodetic variations by glacial isostasy: the improved SELEN code, arXiv preprint, [arXiv:1212.5061](https://arxiv.org/abs/1212.5061), 2012.
- Tsimplis, M. N. & Baker, T. F., "Sea level drop in the Mediterranean Sea: an indicator of deep water salinity and temperature changes?", *Geophysical Research Letters*, 27(12), 1731-1734, 943 doi.org/10.1029/1999GL007004, 2000
- Usoskin, I. G., "A history of solar activity over millennia", *Living Reviews in Solar Physics*, 14(1), 3, 2017
- Wahl, T., Haigh, I. D., Woodworth, P. L., Albrecht, F., Dillingh, D., Jensen, J., ... & Woppelmann, G., Observed mean sea level changes around the North Sea coastline from 1800 to present, *Earth-Science Reviews*, 124, 51-67, doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.05.003, 2013
- Wahl, T., & Chambers, D. P., Evidence for multidecadal variability in US extreme sea level records, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(3), 1527-1544, 954 doi.org/10.1002/2014JC010443, 2015.
- Warrick, R. A., and J. Oerlemans, "Sea level rise", 257-281, 1990
- White, N. J., Haigh, I. D., Church, J. A., Koen, T., Watson, C.S., Pritchard, T.R., & Tregoning, P., "Australian sea levels-Trends, regional variability and influencing factors", *Earth-Science Reviews*, doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.05.011, 136, 155-174, 2014
- Wood, C. A., & Lovett, R. R., Rainfall, drought and the solar cycle. *Nature*, 251(5476), 594-96, 1974
- Wu, P., & Peltier, W. R., "Glacial isostatic adjustment and the free air gravity anomaly as a constraint on deep mantle viscosity", *Geophysical Journal International*, 74(2), 377-449, 1983.

