

Océanographie

# Évolution de l'onde semi-diurne M2 de la marée à Brest de 1846 à 2005

Nicolas Pouvreau<sup>a</sup>, Belén Martin Miguez<sup>b</sup>, Bernard Simon<sup>b</sup>, Guy Wöppelmann<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Centre littoral de géophysique, université de la Rochelle, av. Michel-Crépeau, 17042 La Rochelle, France

<sup>b</sup> Service hydrographique et océanographique de la Marine, 13, rue du Chatellier, BP 30316, 29603 Brest, France

Reçu le 25 janvier 2006 ; accepté après révision le 4 juillet 2006

Disponible sur Internet le 21 août 2006

Présenté par Anny Cazenave

## Résumé

Cet article présente notre travail d'enquête, de sauvetage et de contrôle qualité autour des mesures anciennes du niveau de la mer à Brest, que nous avons découvertes récemment dans les archives historiques. Leur analyse, conjuguée à celle des observations accumulées depuis 1960, nous a permis de compléter l'étude menée en 1972 par Cartwright, qui concluait à une atténuation significative et régulière de l'amplitude de l'onde de marée semi-diurne M2 de 1% par siècle. Nos résultats montrent une augmentation de cette amplitude depuis 1960, ainsi qu'une diminution avant 1880 ; ils suggèrent davantage un phénomène cyclique à longue période plutôt qu'une tendance séculaire. *Pour citer cet article : N. Pouvreau et al., C. R. Geoscience 338 (2006).*

© 2006 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

## Abstract

**Evolution of the tidal semi-diurnal constituent M2 at Brest from 1846 to 2005.** The work of searching, recovering and quality control of ancient sea-level measurements at Brest is presented. This work enables us to complete a study carried out by Cartwright in 1972, which showed a decrease in the tidal M2 semi-diurnal amplitude of 1% per century. After including these ancient data, as well as the last four decades of observations in the analysis, our results show an increase of the amplitude of M2 after 1960 and a decrease before 1880, suggesting a long-period oscillation rather than a steady secular trend. *To cite this article: N. Pouvreau et al., C. R. Geoscience 338 (2006).*

© 2006 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

*Mots-clés :* Marée ; Marégraphes ; Variations du niveau marin ; Brest ; France

*Keywords :* Tides ; Tide gauges ; Sea-level variations ; Brest ; France

## Abridged English version

### Introduction

In 2000, the unexpected discovery of a set of sea-level measurements carried out in Brest between 1778 and 1792 led us to undertake the search for ancient

\* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : [gwoepelm@univ-lr.fr](mailto:gwoepelm@univ-lr.fr) (G. Wöppelmann).

unpublished data in the archiving centres all around France. We succeeded in completing the Brest time-series with the very earliest observations (1756–1778) as well as in finding the first tide-gauge measurements recorded between 1846 and 1860. The search was followed by a thorough, time-consuming process of recovering, digitising and controlling the quality of the sea-level data. Afterwards, we were able to approach the question of the long-term evolution of the mean sea level throughout ca 300 years [15].

These ancient data also shed new light over the variations of the amplitude of the M2 tidal constituent in Brest, an issue dealt with by Cartwright in 1972. In his study, he indicated a 1% per century decrease in the semi-diurnal amplitude and discussed the possible effects of the construction of a harbour; however, the relationship was dubious and the author himself discarded the hypothesis [2]. Subsequent efforts by other authors have not permitted to explain the origin of this variation [1,12], while some have even questioned the secular diminution of the M2 amplitude [10]. In the present study, we integrate all the data available with the aim of verifying the evolution of the M2 tidal constituent and its characteristics. Then, we present the data and the corrections that we had to apply (Section 2); we detail the analysis performed to study the evolution of M2 in Brest (Section 3) and, last, we discuss the results obtained to determine whether the variation can be oceanic or due to local changes (Section 4).

#### *Compilation and processing of tide-gauge measurements*

The first tide gauge was installed in Brest in December 1845 [4] and was used there until 1944, when it was destroyed as a result of the bombing of the city at the end of World War II. It was not until 2005 that we had access to the first tide-gauge recordings. Spanning from 1846–1860, these ancient, unpublished data were added to the more recent dataset covering the period 1949 to 1952, also unpublished until now. After digitisation to obtain hourly values, we undertook a quality control of the whole time series covering the period 1846–2005. The approach is based on the examination of the residuals between tidal predictions and observations [15]. It leads to finding and correcting timing errors, changes in the time reference system, changes in the tide-gauge zero and errors in the transcriptions of observations. Though laborious and time-consuming, the quality control process has proven worthwhile, since it has provided the longest quality-assessed time series of sea level in France. Furthermore, it showed that sev-

eral years of data (1937, 1939–1943) which had been supplied to the Permanent Service of Mean Sea Level in the past [13], mistakenly included an undue correction for atmospheric pressure.

#### *Computation of the M2 tidal amplitude at Brest*

We performed the harmonic analysis of the Brest hourly sea-level data and obtained year-by-year values for the amplitude of the semi-diurnal M2 tidal constituent. We used two different sets of programs: the first one is MAS, written by B. Simon for the SHOM, the second one is T\_TIDE [7]. Years that presented less than six months of valid data, namely 1857, 1859, 1938, 1944 and 1952, were not included in the analysis. The root mean square (RMS) of the differences between the amplitudes obtained from both sets of programs is  $0.0001 \pm 0.0030$  m. Fig. 1 shows the evolution of the amplitude of the M2 tidal constituent at Brest. Our results confirm the decreasing trend observed by Cartwright [2], but only between 1885 and 1960. From 1960 on, our results question the idea of a steady secular attenuation in the M2 amplitude. Moreover, data between 1846 and 1885 also show an increase in the amplitude of M2.

#### *Discussion*

The shape of the curve in Fig. 1 suggests a long-period oscillation rather than a steady secular decreasing trend. Should this be the case, we may try to estimate its period through a non-linear adjustment as in Fig. 2. This would yield a period of  $T = 141 \pm 5$  years with an amplitude of  $0.011 \pm 0.001$  m.

Even if the cause of this oscillation remains unknown for the time being, it is worth trying to already establish whether it might be global or local. For this purpose, we chose three stations out of the few ones with long enough records, and we analysed the evolution of the amplitude of M2 as we did in Brest. These stations are Newlyn (UK), Honolulu (USA) and Cristobal (Panama), whose data can be found on the web server of the University of Hawaii: <http://www.soest.hawaii.edu/UHSLC/>.

If the process underlying the oscillation in the M2 amplitude were not local but affected a greater region, we would also expect to see it in other time series. This is the case only for Newlyn (UK), which is 200 km away from Brest. The M2 amplitude there follows a pattern similar to that at Brest for the period 1915–2000. The RMS of the differences between the Newlyn amplitudes

of M2 and the predictions of the sinusoidal function obtained by fitting the Brest amplitudes is 0.01 m (after removal of the mean value in both cases). This RMS is identical to the one computed from a linear adjustment of the Newlyn data, indicating that both models are statistically equivalent.

### Conclusions and prospects

In 2003, as a result of our commitment to the project SONEL (<http://www.sonel.org>), which aims at developing the infrastructure of a French coastal sea-level monitoring system, we have made freely available all hourly Brest tide gauge data discovered so far. Since then, more data have been rescued, in particular those corresponding to the earliest tide gauge measurements (1846–1860). Those recently discovered data have been submitted to a thorough process of quality control and subsequent appropriate corrections. We have them already available on demand, pending their free accessibility on the SONEL data server.

Our study clearly discards the idea of a steady secular decrease of the M2 amplitude at Brest and rather suggests a long-period oscillation. Though this is much appealing, it cannot be demonstrated yet, as we cannot securely define its periodicity, which would be close to the length of the present time series. We hope that the further rescue of ancient high-/low-level observations (1807–1846) will help us to clarify the issue. For this purpose, new problems will have to be faced, as the sampling conditions for these data are incompatible with the classical harmonic analysis applied to hourly values. Provided these problems are solved, we hope to include the early-18<sup>th</sup>-century data in a future analysis.

## 1. Introduction

La découverte inattendue, en 2000, d'observations du niveau de la mer effectuées à l'échelle de marée à Brest entre 1778 et 1792, nous a conduits à entreprendre une recherche systématique des différents centres historiques d'archivage en France. Cette recherche s'est avérée fructueuse, puisque nous avons complété la série mentionnée ci-dessus des observations de 1756 à 1778 ; nous avons retrouvé les toutes premières observations du marégraphe de Brest, de 1846 à 1860, et nous avons commencé à valoriser l'ensemble, en étudiant la question très actuelle de l'évolution séculaire du niveau moyen de la mer sur près de 300 ans, ceci après un long travail d'enquête, de sauvetage, de numérisation et de contrôle de qualité des données [15].

Dans cette courte note, nous revenons sur la question de l'évolution séculaire de l'onde semi-diurne M2 de la marée océanique à Brest. En 1972, Cartwright [2] concluait à une atténuation significative et régulière de l'amplitude de cette onde, de l'ordre de 1% par siècle. Ses efforts pour expliquer l'origine de cette atténuation portèrent notamment sur l'effet potentiel de la construction des digues de la rade-abri de Brest (1895–1912), un argument que Courtier avait avancé en 1934 pour expliquer la mauvaise qualité des prédictions de la formule de Laplace–Chazallon. Simon montra cependant, en 1982, que cette formule était bien en cause, et non la modification de la marée à l'observatoire de la Penfeld à Brest [10]. Les calculs poussés de Cartwright [2] amenèrent également ce dernier à écarter cette hypothèse. L'origine de la diminution séculaire de l'onde M2 demeure inconnue.

L'étude de Cartwright [2] s'appuyait sur les observations des années 1864–1884, 1898–1914, 1916–1936, complétées de l'année 1960 et des années 1711 à 1716, qui servirent à Laplace pour valider sa théorie dynamique de la marée en 1790. Dans son étude de 1982, Simon signale que les observations accumulées depuis 1960 contredisent l'idée d'une diminution séculaire de l'amplitude de la marée à Brest. Mais Araujo et al. [1] reviennent sur l'idée de la diminution séculaire de l'onde M2, même si la valeur n'est plus que de 0,4%. Leur étude s'appuie sur l'analyse des observations marégraphiques disponibles en 2000, c'est-à-dire antérieures à nos découvertes, mais aussi au contrôle de qualité systématique que nous avons mené sur l'ensemble des données et aux corrections qui s'en sont suivies, rendues souvent possibles parce que nous sommes remontés jusqu'aux registres originaux.

Le sauvetage des mesures anciennes, la révision des données connues et les années d'observation accumulées depuis les études mentionnées ci-dessus sont autant d'éléments nouveaux, potentiellement utiles à la communauté intéressée par l'exploitation des observations d'une station quasiment unique dans le monde. Cette série est particulièrement intéressante par sa couverture temporelle dans un contexte de changement climatique [11]. Il était, par ailleurs, intéressant d'intégrer ces nouvelles données dans une analyse d'ensemble de la question particulière de l'évolution de l'onde M2 dans le signal marégraphique à Brest pour réévaluer les résultats publiés à ce jour et apporter de nouveaux éléments qui permettraient de mieux comprendre cette évolution. La Section 2 présente les données et les corrections que nous avons appliquées. Nous détaillons ensuite dans la Section 3 les traitements et les résultats que nous obtenons sur l'onde M2 à Brest. Enfin, la Section 4 discute

Tableau 1  
Synthèse des observations horaires de marégraphie à Brest

Table 1  
Synthesis of hourly tide gauge observations at Brest

Période d'observation	Appareil	Support des valeurs	Mesures inédites	Mesures utilisées dans cette étude
04/01/1846–30/05/1857	Marégraphe Chazallon	Registre	×	×
23/11/1859–20/01/1860	Marégraphe Chazallon	Registre	×	×
01/05/1860–31/12/1914	Marégraphe Chazallon	Registre		×
01/01/1915–31/12/1915	Marégraphe Chazallon	Marégramme	×	
01/01/1916–31/07/1937	Marégraphe Chazallon	Registre	×	×
01/08/1937–01/11/1937	Marégraphe Chazallon	Registre	×	×
01/01/1939–01/05/1944	Marégraphe Chazallon	Registre		×
22/06/1949–05/11/1952	Marégraphe FUESS 10518	Marégramme	×	
29/09/1952–31/12/1952	Marégraphe OTT 3268	Registre	×	×
01/01/1953–février 1977	Marégraphe OTT 3268	Marégramme		×
février 1977–31/12/1992	A OTT Kempton 20030	Marégramme		×
01/01/1992–aujourd'hui	MCN	Numérique		×

les résultats obtenus et, à défaut de trouver une explication satisfaisante, tente de déterminer si l'effet est local, ou bien s'il est également présent dans d'autres séries temporelles du niveau marin.

## 2. Compilation et traitement des mesures marégraphiques

De 1839 à 1842, Rémy Chazallon (1802–1872) met au point un appareil capable d'enregistrer de manière continue et automatique le niveau de la mer. Il sera récompensé d'une médaille d'argent par la « Société d'encouragement » et donnera à cet appareil le nom de « marégraphe » [4]. Il s'agit d'un instrument mécanique équipé d'un flotteur, dont le déplacement vertical suit le niveau de la mer [14]. Ce déplacement du flotteur est mécaniquement réduit par un système de poulies et d'engrenages, avant d'être inscrit sur un rouleau de papier calé autour d'un cylindre mû par un mouvement de rotation uniforme. Toulon sera le premier site équipé d'un marégraphe en France, en 1842 ; Brest le sera en décembre 1845. Fait pratiquement unique, le marégraphe de Brest fonctionne depuis cette date, avec une interruption en 1944, correspondant à sa destruction par les bombardements de la seconde guerre mondiale. De plus, grâce aux repères de marée, le marégraphe a pu être reconstruit dès juin 1949, en assurant la continuité de la référence des hauteurs jusqu'à nos jours. Ce point n'est toutefois pas critique dans l'étude présente sur l'onde de marée, mais le lecteur intéressé pourra se rapporter à la référence [15], dans laquelle la question est traitée sur près de 300 ans de mesures.

Outre les toutes premières observations du marégraphe de Brest, très complètes de 1846 à 1857, partielles de 1859 à 1860, nous avons également retrouvé les observations de 1949 à 1952, ainsi que quelques lots plus modestes. Le **Tableau 1** résume les caractéristiques de ces observations, en soulignant celles qui sont inédites.

Le travail de numérisation des observations inédites achevé, nous avons contrôlé l'ensemble des observations horaires de 1846 à 2005. L'approche employée pour détecter les erreurs ou les défauts repose sur l'examen détaillé des résidus obtenus de l'analyse harmonique des observations de hauteur d'eau horaires ; l'approche est décrite dans la référence [15]. Lorsque l'explication est trouvée, souvent en revenant à la source des registres originaux, les erreurs sont corrigées. Toutefois, Wöppelmann et al. [15] ne rentrent pas dans les détails de ces corrections, dont la liste synthétique suit :

- correction des observations de 1846 à 1897 pour passer du temps solaire vrai de Brest au temps universel ;
- correction des observations de 1897 à 1914 pour passer du temps solaire moyen de Brest au temps universel ;
- correction des observations du 22 au 30 novembre 1908 pour passer du temps civil au temps universel ;
- correction de l'erreur de décalage en temps portée sur les fiches de contrôle et sur les marégrammes pour les observations de 1956, 1961 et 1963 ;
- correction des décalages d'horloge entre le marégraphe de secours et le marégraphe principal

lorsque ce dernier est tombé en panne (21–23 mai et 13 au 20 août 1956) ;

- correction des retards en temps liés au rattrapage de jeu lors du changement de rouleau de papier des observations du 30 mai au 9 juin 1983 (difficiles à décèler, il pourrait en subsister entre 1975 et 1991) ;
- calage des observations de 1846 à 1860 et de 1897 à 1914 au zéro hydrographique de Brest, redéfini le 1<sup>er</sup> janvier 1996, en retranchant 50 cm à toutes les hauteurs ;
- correction des fautes de transcription proches des pleines et des basses mers, qui ressortent très nettement de l'examen des résidus de l'analyse harmonique.

Deux éléments méritent d'être soulignés. Le premier est la curiosité de l'usage du temps solaire vrai (local) de 1846 à 1897 avec un marégraphe. L'opérateur réglait tous les jours l'horloge du marégraphe, qui est par construction uniforme. Le deuxième est que nous avons désormais des éléments techniques qui permettraient d'expliquer la meilleure qualité des observations de 1846 à 1944, qualité seulement retrouvée avec l'installation d'un marégraphe numérique à ultrasons en 1992 [15]. Le facteur de réduction des déplacements verticaux du flotteur était de 10 [3], alors qu'il est typiquement de 30 ou de 50 dans les observatoires des côtes présentant un fort marnage. Le rouleau de papier sur lequel s'inscrivait la courbe de niveau de la mer était alors large de 1 m [9]. Cela permettait une meilleure lecture des courbes enregistrées sur le papier, et par suite une numérisation plus fine et juste. L'autre explication de la qualité de ces mesures est l'emploi à temps plein d'un opérateur ; après la seconde guerre mondiale, la fréquence des visites est devenue hebdomadaire, à l'occasion du changement du rouleau de papier (marégramme).

Enfin, notre travail a également permis d'informer le service permanent du niveau moyen de la mer, le PSMSL [13], que les valeurs des niveaux moyens de la mer mensuels et annuels des années 1937 et 1939 à 1943, qui leur furent communiquées dans le passé, sont incorrectes, dans la mesure où elles sont, par erreur, corrigées de la pression atmosphérique.

### 3. Calcul de l'amplitude de l'onde M2 à Brest

L'analyse harmonique des observations horaires de la hauteur d'eau instantanée à Brest permet de calculer les composantes de la marée, en particulier l'amplitude de l'onde semi-diurne M2, année par année. Pour ce faire, nous avons utilisé l'outil MAS développé

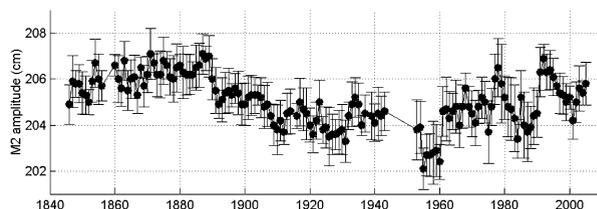


Fig. 1. Évolution de l'amplitude de l'onde de marée M2 à Brest (les barres d'erreur correspondent à  $\pm$  un écart-type).

Fig. 1. Evolution of the M2 tidal constituent amplitude at Brest (the error bars correspond to  $\pm$  one standard deviation).

par B. Simon au SHOM. Par souci de contrôle, nous avons comparé les résultats avec le logiciel T\_TIDE [7]. Les différences dans l'amplitude de l'onde M2, obtenues avec l'un ou l'autre des outils d'analyse de la marée, sont très faibles : l'écart moyen quadratique des différences d'amplitude de l'onde M2 à Brest est de  $0,0001 \pm 0,0030$  m. L'écart-type sur l'amplitude de l'onde M2 est de l'ordre de 0,009 m, soit 0,4% de l'onde en question. Nous n'avons retenu dans notre analyse que les années qui présentaient plus de six mois d'observation par an. Seules les années 1857, 1859, 1938, 1994 et 1952 sont écartées avec ce critère de sélection, suffisant pour isoler avec précision l'onde M2 à Brest.

La Fig. 1 confirme la tendance à la diminution observée par Cartwright en 1972, mais seulement entre 1885 et 1960. Depuis 1960, nos résultats indiquent que la tendance s'est inversée. Par ailleurs, une augmentation est également visible entre 1846 et 1885, remettant en cause l'idée d'une atténuation régulière et séculaire de l'amplitude de M2 depuis 1711.

### 4. Discussion

L'allure de la courbe de la Fig. 1 suggère plutôt un phénomène cyclique à longue période qu'une tendance séculaire à l'atténuation. Mais il est toutefois difficile de réellement conclure à un phénomène périodique, même si la tentation est grande d'en estimer la période, comme sur la Fig. 2. Elle serait alors de l'ordre de  $141 \pm 5$  ans, avec une amplitude de  $0,011 \pm 0,001$  m, résultat obtenu en effectuant un ajustement non linéaire de l'amplitude, de la période et de la phase d'une fonction sinusoïdale en appliquant l'algorithme de Levenberg–Marquardt. Le développement harmonique du potentiel générateur de la marée ne montre aucune composante qui puisse expliquer ce phénomène. L'hypothèse d'un effet non linéaire a été étudiée, mais s'est révélée infructueuse. Aucune combinaison valide du point de vue astronomique ne peut expliquer une modulation de M2 à cette période.

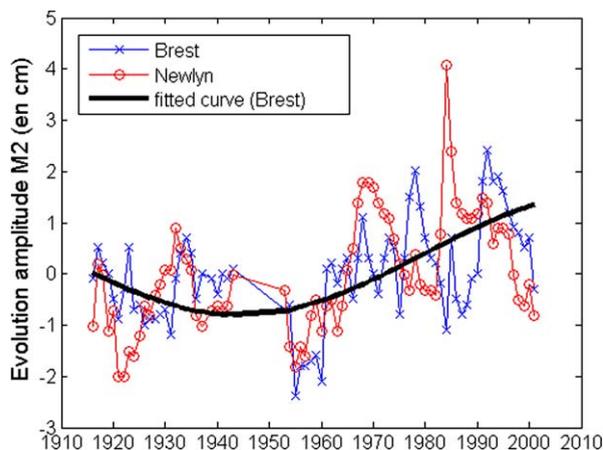


Fig. 2. Évolution comparée de l'amplitude de l'onde de marée M2 à Newlyn (Royaume-Uni) et à Brest (France). Les valeurs moyennes des amplitudes sont retirées. La courbe sinusoïdale provient de l'ajustement non linéaire des valeurs de Brest seules.

Fig. 2. Comparative evolution of the M2 tidal constituent amplitude at Newlyn (UK) and at Brest (France). The average values of the amplitudes are removed. The sinusoidal curve results from the nonlinear curve fitting of the Brest data only.

Si l'origine de la variation de l'onde M2 à Brest demeure encore une énigme, il est intéressant d'essayer d'établir si l'effet est local ou étendu à d'autres observatoires. Les études que nous avons trouvées dans la littérature portent essentiellement sur des tendances [1,2,12]. Les séries temporelles longues de marégraphie sont rares, et encore plus celles dont les données horaires sont accessibles, malgré les efforts louables du service européen du niveau de la mer ESEAS [8]. Nous avons néanmoins pu récupérer les observations horaires des marégraphes de Newlyn (Royaume-Uni), de Cristobal (Panama) et d'Honolulu (États-Unis), dans l'un des centres du programme mondial d'observation du niveau de la mer GLOSS [5], sur le serveur (<http://www.soest.hawaii.edu/UHSLC/>) de l'université d'Hawaii. Ces stations présentaient les caractéristiques nécessaires à notre étude : des séries de valeurs horaires, disponibles, sous forme numérique, sur une longue période. Seule la station de Newlyn, distante de quelque 200 km de Brest, présente des variations en accord avec Brest. L'ajustement par moindres carrés d'une tendance sur la période commune de 1916 à 2001 donne une augmentation de l'amplitude de l'onde M2 de  $0,015 \pm 0,004$  m/siècle pour Brest et de  $0,021 \pm 0,004$  m/siècle pour Newlyn, avec des écarts moyens quadratiques des résidus issus de l'ajustement de 0,009 m et de 0,010 m, respectivement. Toutefois, il est intéressant de noter que le calcul des écarts moyens quadratiques entre la courbe sinusoïdale ajustée ci-dessus sur les seuls résultats de

Brest entre 1846 et 2005 et les observations de Newlyn, auxquelles on a au préalable retiré la valeur moyenne, donne le même résultat de 0,01 m. Statistiquement, les deux modèles, linéaire et courbe sinusoïdale, sont aussi légitimes à Newlyn.

## 5. Conclusions et perspective

Les deux objectifs de cette note étaient : (i) de présenter le travail d'enquête, de sauvetage et de contrôle qualité des mesures anciennes du niveau de la mer à Brest, données que nous avons découvertes récemment dans les archives historiques, et (ii) de revoir la question de l'atténuation séculaire de l'onde de marée M2 à la lueur de ces nouvelles données. Notre engagement dans l'infrastructure d'observatoire de recherche SONEL (*Système d'observation du niveau des eaux littorales*) nous a déjà conduits à diffuser librement les observations horaires du marégraphe de Brest en 2003. Celles-ci portaient sur les périodes 1860–1944 et 1953–2003. Depuis, de nouvelles données ont été découvertes, en particulier les toutes premières observations marégraphiques de 1846 à 1860. Une révision d'ensemble de la qualité des observations a été accomplie en parallèle, souvent avec des corrections rendues possibles par étude des registres originaux. Par cette note scientifique, nous informons la communauté d'un long travail accompli pour le sauvetage d'observations historiques du niveau de la mer, à fort intérêt scientifique dans le contexte actuel de réchauffement climatique et de leur disponibilité sur demande, dans l'attente de leur mise à disposition prochaine sur le serveur de SONEL (<http://www.sonel.org>). Nous espérons ainsi perpétuer la démarche avant-gardiste de Joseph Jérôme de Lalande (1732–1807), de publication et de diffusion des observations effectuées par l'Académie royale des sciences au début du XVIII<sup>e</sup> siècle. Lalande soulignait alors assez sarcastiquement que les observations qu'une personne utilise pour défendre sa thèse peuvent parfois servir une autre personne pour défendre une thèse contraire [6].

En effet, si notre étude a permis d'écarter l'idée d'une atténuation séculaire de l'amplitude de l'onde M2 à Brest, elle ne permet ni de conclure à une variation cyclique, ni d'estimer avec confiance une période à peine plus courte que la durée du signal. Les mesures de 1756 à 1792 ne peuvent contribuer à cette démarche, car seules les pleines mers firent l'objet d'observation. En revanche, nous espérons que les observations de 1807 à 1846 complèteront utilement nos données actuelles, mais la tâche n'est pas immédiate. Ces observations ne se prêtent pas facilement à une analyse harmonique classique. Nos outils doivent être adaptés

à cet échantillonnage particulier, gouverné par l'occurrence des pleines et des basses mers, mais, surtout, leur exploitation doit se faire avec prudence. En particulier, nous avons récemment mis en évidence des effets pervers d'échantillonnage entre le jour et la nuit, entre les mortes-eaux et les vives-eaux, effets dont la prise en compte est indispensable pour réduire le bruit naturellement plus élevé dans les observations à l'échelle de marée que dans celles par marégraphes. Lorsque ces effets seront maîtrisés, nous pourrions alors même envisager d'exploiter les données de 1711 à 1716.

### Remerciements

Cette recherche est financée en partie par le conseil général de la Charente-Maritime (bourse doctorale) et par le Groupe de recherches en géodésie spatiale. Les observations horaires des marégraphes de Newlyn (Royaume-Uni), de Cristobal (Panama) et de Honolulu (États-Unis) proviennent du centre de données de l'université d'Hawaïi (UHSLC), dont nous saluons le travail inestimable de collecte, de contrôle et de diffusion, ainsi que le soutien des organismes qui l'alimentent régulièrement en observations. Les auteurs tiennent à remercier Jean-Claude Mercier, directeur du CLDG, pour ses commentaires très instructifs et ses encouragements dans la publication de ces travaux.

### Références

- [1] I. Araujo, D. Pugh, M. Collins, Trends in components of sea level around the English Channel, in: *The Changing Coast*, Eurocoast, Portugal, ISBN 972-8558-09-0, 2002, pp. 107–114.
- [2] D.E. Cartwright, Secular changes in oceanic tides at Brest (1711–1936), *Geophys. J. R. Astr. Soc.* 30 (1972) 433–449.
- [3] A. Courtier, Données numériques concernant les marées des côtes de France, publication SHOM n° 14-1016.
- [4] R. Chazallon, Lettre du 6 décembre 1859 au ministre de la Marine, Archives de l'établissement principal du SHOM, Brest, 1859.
- [5] IOC, Global Sea Level Observing System (GLOSS) – Implementation plan, Intergovernmental Oceanographic Commission, Technical Series, No. 50, 1997.
- [6] J.J. Lalonde, Mémoire sur le flux et le reflux de la mer, et spécialement sur les marées des équinoxes, *Hist. (Mém.), Acad. R. Sci. Paris* 85 (1772) 297–324.
- [7] R. Pawlowicz, B. Beardsley, S. Lentz, Classical tidal harmonic analysis error estimates in MATLAB using T\_TIDE, *Comput. Geosci.* 28 (2002) 929–937.
- [8] H.-P. Plag, The European Sea-Level Service (ESEAS), Assessment of the first three years, Paper presented at the 9<sup>th</sup> Session of the IOC Group of Experts on the Global Sea Level Observing System (GLOSS), Paris, France, 24–25 February 2005.
- [9] M. Rollet de l'Isle, Observation, étude et prédiction des marées, publication SHOM n° 13-155, 1905.
- [10] B. Simon, Prédiction de la marée à Brest, *Ann. Hydrogr., 5<sup>e</sup> Ser.* 10 (757) (1982) 33–50.
- [11] R.A. Warrick, C. Le Provost, M.F. Meier, J. Oerlemans, P.L. Woodworth, Changes in sea level, in: J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, K. Maskell (Eds.), *The Science of Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1996, pp. 359–405.
- [12] P.L. Woodworth, S.M. Shaw, D.L. Blackman, Secular trends in mean tidal range around the British Isles and along the adjacent European coastline, *Geophys. J. Int.* 104 (1991) 593–609.
- [13] P.L. Woodworth, R. Player, The Permanent Service for Mean Sea Level: an update to the 21<sup>st</sup> century, *J. Coast. Res.* 19 (2003) 287–295.
- [14] G. Wöppelmann, P. Pirazzoli, Tide gauges, in: M.L. Schwartz (Ed.), *Encyclopedia of Coastal Sciences*, Springer-Verlag, 2005, pp. 984–986.
- [15] G. Wöppelmann, N. Pouvreau, B. Simon, Brest sea-level record: a time series construction back to the early 18<sup>th</sup> century, *Ocean Dyn.*, in press.