

Traitement du signal marégraphique par analyse harmonique pour la détermination d'une référence altimétrique pour l'Algérie

A. Rami⁽¹⁾, M. Nechimi⁽²⁾, M. Haddad⁽¹⁾, S. Maârouf⁽²⁾ & T. Benkouider⁽¹⁾

(1) Centre des Techniques Spatiales, Arzew - Algérie

(2) Institut National de Cartographie et de Télédétection, Alger - Algérie

ملخص : لتحديد مرجعية وطنية للإرتفاع بالنسبة للجزائر، أنهى المعهد الوطني للخرائط و الكشف عن بعد (INCT) تركيب ثلاثة أجهزة لقياس المد و الجزر أوتوماتكيا (Log_aLevel) على مستوى موانئ الجزائر العاصمة، جيجل و وهران.

يسمح التحليل التوافقي لمعطيات قياس المد و الجزر المنبثقة عن هذه المحطات الثلاث و التي وفرها INCT بموجب اتفاقية INCT / CTS، بتحديد الثوابت التوافقية من المد و الجزر و متوسط مستوى البحر في كل ميناء.

متوسط مستوى سطح البحر الناتج من خلال هذا العمل هو 40.6 سم على مستوى ميناء الجزائر العاصمة، 39.8 سم على مستوى ميناء جيجل و 58 سم بميناء وهران. يسمح التحليل الطيفي لنا بتحديد سعة كبيرة من التباين الزمني من المد و الجزر، و بالتالي للكشف عن نوع من المد و الجزر في كل محطة.

الكلمات الأساسية : المد و الجزر، قياس المد و الجزر. المستوى المتوسط لسطح البحر. التحليل التوافقي، التحليل الطيفي.

Résumé : Afin de déterminer une référence altimétrique nationale pour l'Algérie, l'Institut National de Cartographie et de Télédétection (INCT) a procédé à l'installation de trois marégraphes numériques à acquisition automatique (Log_aLevel) aux ports d'Alger, de Jijel et d'Oran.

L'analyse harmonique des données marégraphiques issues de ces trois stations, nous a permis la détermination des composantes harmoniques de la marée et du niveau moyen de la mer au niveau de chaque port.

Le niveau moyen de la mer calculé, par traitement d'une année de séries temporelles de la marée pour chaque station, est de 40.6 cm au port d'Alger, 39.8 cm au port de Jijel et 58 cm au port d'Oran.

L'analyse spectrale a permis de localiser les amplitudes significatives relatives aux variations temporelles de la marée et donc de détecter le type de marée à chaque station.

Mots clés : marée; marégraphe; niveau moyen de la mer ; analyse harmonique; analyse spectrale.

Abstract :

For the Algerian vertical datum determination, the National

Institute of Cartography and Remote Sensing (INCT) completed the installation of a three automatic acquisition tide gauge (Log_aLevel) at Algiers, Jijel and Oran harbors.

The harmonic analysis of tide gauge data from these stations, allowed us to determine the tide harmonic constants and the mean sea level at each station.

The mean sea level calculated in this work, after one year processing of tidal time series for each station, is 40.6 cm at the Algiers harbor, 39.8 cm at Jijel and 58 cm at Oran.

Spectral analysis has allowed us to locate the significant amplitudes of the tide temporal variation and thus to detect the tide type at each station.

Key words : Tide ; tide gauge ; mean sea level ; harmonic analysis ; altimetric reference, spectral analysis.

1. Introduction

L'Institut National de Cartographie et de Télédétection (INCT) en sa qualité d'organisme national Algérien, en charge de l'information géographique, a inscrit au titre de son plan recherche et développement, un projet visant la réalisation d'un nouveau référentiel altimétrique national.

Notons ici également, que l'origine du réseau du nivellement général de l'Algérie (NGA), qui remonte à l'époque coloniale française (1889), se base toujours sur le médimarémètre de La Goulette (prés de Tunis) dont peu d'informations existent sur sa définition et sa précision [INCT, 2007]. Cette origine se trouve à 34 cm au-dessus du niveau hydrographique qui représente le niveau des basses mers.

Les marégraphes enregistrent les variations de la hauteur du niveau de la mer par rapport à une référence locale attachée au socle sur lequel ils reposent à la côte. L'information contenue dans leurs enregistrements va bien au-delà du seul phénomène de la marée océanique [Wöppelmann et al., 2009].

Aujourd'hui, les marégraphes constituent la seule source d'observations directes disponibles sur plusieurs décennies, voire centaines années, qui apporte une information précieuse pour décrire et comprendre les variations enregistrées du niveau des océans [Pouvreau, 2008].

Au port d'Alger, un marégraphe à acquisition automatique (électronique) a été installé en mai 2003 par l'INCT, près du marégraphe à flotteur à enregistrement analogique (installé en 1985). Le traitement des données de la même période (du 29/03/2004 au 27/02/2006) issues de ces deux

marégraphes a permis de situer la référence altimétrique à 39.8 cm au dessus du zéro hydrographique [Haddad et al., 2006], soit une différence de 5.8 cm par rapport à la référence actuelle (la Goulette).

Dans ce contexte, l'INCT avec la collaboration du Centre des Techniques Spatiales (CTS) a procédé à l'installation de marégraphes numériques de *General Acoustics* de type "Log-aLevel" le long des côtes algériennes pour la définition d'une nouvelle référence altimétrique pour l'Algérie. Ces stations marégraphiques sont réparties comme suit : au port d'Alger (novembre 2011), au port de Jijel (mai 2012) et au port d'Oran (mai 2013).

Dans cet article, sont traitées par l'analyse harmonique de la marée, les données issues des trois stations marégraphiques et fournies par l'INCT afin de déterminer le niveau moyen de la mer à chaque station. Ce qui représente une première détermination d'une référence d'altitude zéro.

L'analyse spectrale permet de déterminer les composantes harmoniques significatives.

Les aspects qui sont développés dans cet article portent sur la présentation du marégraphe, la phase d'étalonnage, le phénomène de la marée, la méthode d'analyse harmonique ainsi que les résultats obtenus.

2. Le marégraphe "Log-aLevel"

2.1 Description du marégraphe

Les marégraphes à acquisition numérique, installés par l'INCT sont de type Log-aLevel (figure 1), ils sont équipés d'un capteur à ultrasons ULL6080, d'un module d'enregistrement et d'une alimentation électrique [Log-aLevel, 2007].

Log-aLevel est un système robuste et précis, destiné à mesurer la hauteur de la mer et des vagues en se basant sur la technologie ultrason, il enregistre en continu le niveau de la mer.

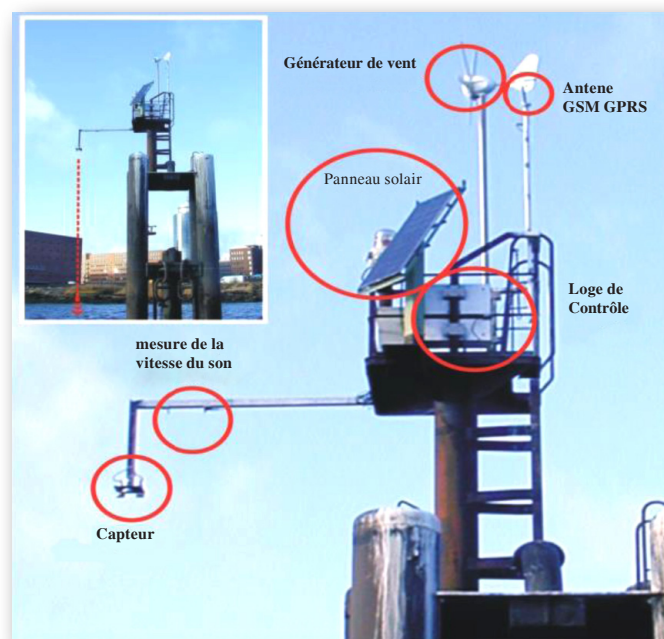


Fig. 1 Le Marégraphe Log-aLevel [Log-aLevel, 2007].

2.2 Étalonnage du marégraphe

Le zéro hydrographique, ou zéro des cartes marines est le niveau de référence à partir duquel sont exprimées les profondeurs des cartes marines [Wöppelmann et al., 2006]. Ce niveau de référence est aussi commun avec les hauteurs d'eau prédites dans les Annuaires des marées.

En Algérie, le zéro hydrographique est le niveau atteint par les plus basses mers astronomiques ainsi que le recommande l'Organisation Hydrographique Internationale (OHI).

Il se situe à 34 cm au-dessous du niveau moyen actuel de la mer aux ports d'Alger, de Jijel et d'Oran.

Pour configurer le marégraphe, il faut introduire l'altitude du capteur par rapport au zéro hydrographique dans le logiciel du marégraphe, cette valeur est appelée "Adjustment level" [Log-aLevel, 2007].

La technique du nivellement nous permet d'avoir l'altitude du capteur par rapport au niveau NGA, en ajoutant 34 cm, et ainsi déduire facilement la valeur de "Adjustment level" (figure 2).

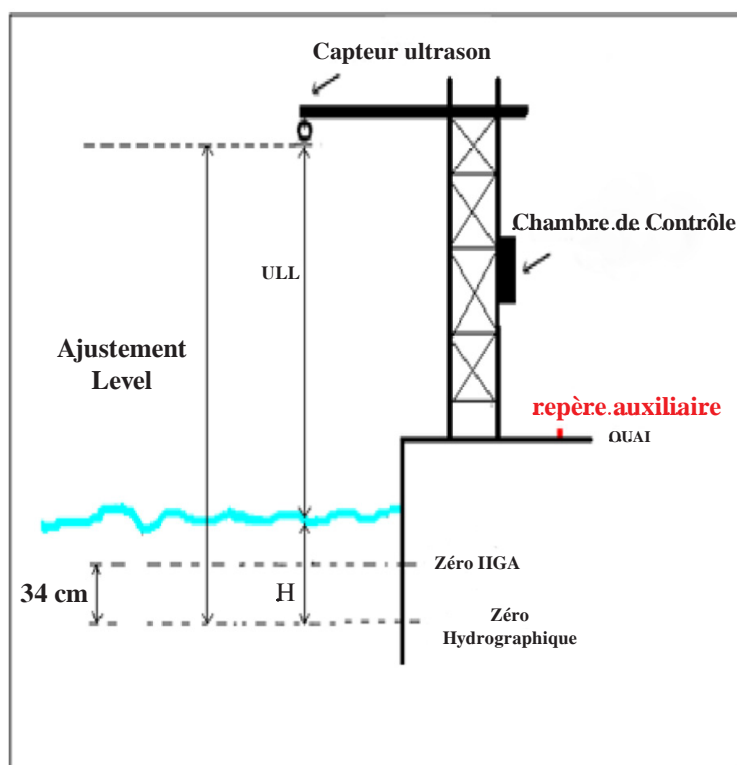


Fig. 2 Étalonnage du marégraphe installé au port d'Oran.

Donc, la valeur mesurée par le marégraphe sera la hauteur du niveau instantané de la mer par rapport au zéro hydrographique.

2.3 Données fournies par le marégraphe numérique

Les mesures brutes de ce type de marégraphe sont structurées en quatre fichiers en format ASCII :

- Fichier contenant les mesures de la hauteur de la mer (m) par rapport à la référence du zéro hydrographique ;
- Fichier des mesures de la pression (hPa) ;
- Fichier des mesures de la direction (degré) et de la vitesse du vent (m/s) ;
- Fichier contenant des informations sur la pression atmosphérique, la température de l'air, l'humidité et la pluviométrie.

3. Méthodologie

La marée océanique est définie comme étant les variations à allure périodique du niveau des océans dues aux effets de l'attraction de la Lune et du Soleil. C'est le mouvement relatif apparent de ces corps célestes qui génère des forces d'attraction gravitationnelle périodiques entraînant un déplacement périodique et ondulatoire des masses d'eaux océaniques [Cartwright, 2003].

La description du phénomène de marée a nettement évolué au fur et à mesure que des observations précises du niveau de la mer devenaient disponibles. Après une première approche statique développée par Newton (1687), la théorie

dynamique, proposée par Laplace (1790) est à la base de tous les développements ultérieurs.

3.1 Analyse Harmonique de la Marée

D'après Cartwright (2003), les mécanismes de génération de la marée sont connus et décrits depuis de nombreuses décennies grâce aux apports successifs de nombreux scientifiques : Newton [1643-1727] ; Laplace [1749-1827] ; Darwin [1809-1882] et Doodson [1890-1968] sont à l'origine du développement de la méthode harmonique.

S'appuyant sur les travaux antérieurs, Thomson (1868) introduit l'opération mathématique nommée analyse harmonique, perfectionnée par la suite par Darwin et Doodson. A partir d'observations du niveau de la mer, il devient alors possible d'extraire pour le site considéré, les composantes harmoniques, pour prédire la marée astronomique.

Darwin présenta le premier développement du potentiel générateur de la marée en fonctions sinusoïdales du temps. Il est quasi-harmonique car il contient des pseudo-composantes qui varient très lentement dans le temps [Pouvreau, 2008].

L'expression des équations linéarisées de la marée océanique amène donc à chercher la dénivellation du niveau des océans créée par la force génératrice des marées, dont dérive le potentiel, sous la forme d'une somme de fonctions sinusoïdales élémentaires [Lefèvre, 2000] :

$$\Delta h_{MO}(\varphi, \lambda, t) = Z_0 + \sum_i H_i(\varphi, \lambda) \cos(\omega_i t - \psi_i(\varphi, \lambda)) \quad (1)$$

Où :

Z_0 est le niveau moyen rapporté au zéro des cartes autour duquel oscille le niveau de la mer.

H_i est l'amplitude de l'onde i .

ψ est la phase exprimée à l'instant de passage du corps perturbateur (lune ou soleil) au méridien de Greenwich.

ω_i est la fréquence de l'onde i : elle est donnée par le développement de Doodson.

En 1921, Doodson présenta un développement du potentiel générateur beaucoup plus complet. En s'appuyant sur la théorie lunaire de Brown, il a exprimé les coordonnées de la Lune par rapport à l'écliptique. Ses développements, contrairement à ceux de Darwin, sont purement harmoniques. Ils conduisent à environ 400 composantes du potentiel [Doodson, 1921].

Doodson a utilisé les cinq angles fondamentaux ainsi que le temps lunaire moyen pour positionner les mouvements de la Lune et du Soleil dans le repère terrestre [Doodson, 1921].

L'équation (1) devient [Lefèvre, 2000] :

$$\Delta h_{MO}(\varphi, \lambda, t) = Z_0 + \sum_i F_i (A_i \cos(\xi_i) + B_i \sin(\xi_i)) \quad (2)$$

où :

$$\xi_i = \omega_i t + X_i + U_i, \quad A_i = H_i \cos(\psi_i) \quad \text{et} \quad B_i = H_i \sin(\psi_i)$$

A_i et B_i sont appelées constantes harmoniques du port considéré.

F_i : Coefficient de la correction nodale de l'amplitude de l'onde i .

U_i : Correction nodale de la phase de l'onde i .

X_i : Argument de Doodson.

L'analyse des jeux d'observations horaires permet l'exploration des composantes harmoniques jusqu'aux douzièmes diurnes. Néanmoins, certains types de marées nécessitent des cadences d'échantillonnage supérieures vu que l'énergie est perceptible au delà des trentièmes diurnes [Pouvreau, 2010].

3.2 Effet du baromètre inverse

La réponse du niveau de la mer aux variations de la pression atmosphérique est désignée sous le nom de l'effet du "baromètre inverse". Elle provient du changement de la force de pression de la masse d'air surplombant la surface marine.

La correction de l'effet du baromètre inverse est donnée par la formule suivante [Aviso user Handbook, 2008] :

$$INB = \frac{P_a - P_{atm}}{\rho g} = -9.948 (P_{atm} - 1013.25) \quad (3)$$

Où :

P_a : Pression introduite au niveau de la mer.

$\overline{P_a} \approx 1013.25 \text{ m}$: Pression atmosphérique moyenne.

$\rho \approx 1.025 \text{ g / cm}^3$: Densité moyenne de l'eau de la mer.

$g \approx 981 \text{ cm / s}^2$: Accélération de la pesanteur.

4. Données utilisées

Les données marégraphiques utilisées dans ce travail sont les données brutes enregistrées par les marégraphes au niveau de chaque station.

Pour chaque station, ces données s'étalent sur 12 mois, Alger (du 13/12/2011 au 12/12/2012), Jijel (du 22/05/2012 au 22/05/2013) et Oran (du 10/05/2013 au 10/05/2014). Toutes ces données sont par la suite, échantillonnées sur une (01) heure et structurées dans un fichier en format ascii.

Le logiciel utilisé pour le traitement de ces données marégraphiques est le T_tide version mars 2011, permettant de réaliser une analyse harmonique et des prédictions de marée ; il est disponible sur le site du "Department of earth and ocean Science", University of British Columbia - Canada : [http://www.eos.ubc.ca/~rich/#T_Tide].

T_tide a été conçu en 2001 par Pawlowicz [Pawlowicz et al., 2002] ; il est largement utilisé par les chercheurs de par le monde et jusqu'à 2012, au moins 313 articles sont issus de travaux de recherche effectués avec T_tide [Gouriou, 2012].

Les corrections nodales appliquées dans T_tide sont conçues de telle façon qu'elles ne peuvent pas être utilisées précisément pour des lots de mesures de plus d'un an. Les auteurs recommandent donc d'effectuer une analyse harmonique sur des fichiers ne contenant qu'une année de mesures maximum, donc fragmenter le fichier original en lots de données d'une année d'observations [Gouriou, 2012].

Un prog ramme a été développé au niveau du département de Géodésie Spatiale (CTS) pour l'échantillonnage des données marégraphiques sur une heure et la correction de l'effet du baromètre inverse.

5. Résultats et Analyse

L'analyse harmonique, en utilisant T_tide, des données marégraphiques corrigées de l'effet du baromètre inverse, permet d'avoir le niveau moyen de la mer (référence d'altitude Zéro) et les composantes harmoniques pour chaque station.

5.1 Référence Altimétrique

Avant de lancer l'analyse harmonique de la marée, il faut corriger les données brutes de l'effet du baromètre inverse en se basant sur l'équation (3) et en utilisant les mesures de la pression au niveau de la mer obtenues à partir du fichier d'observations.

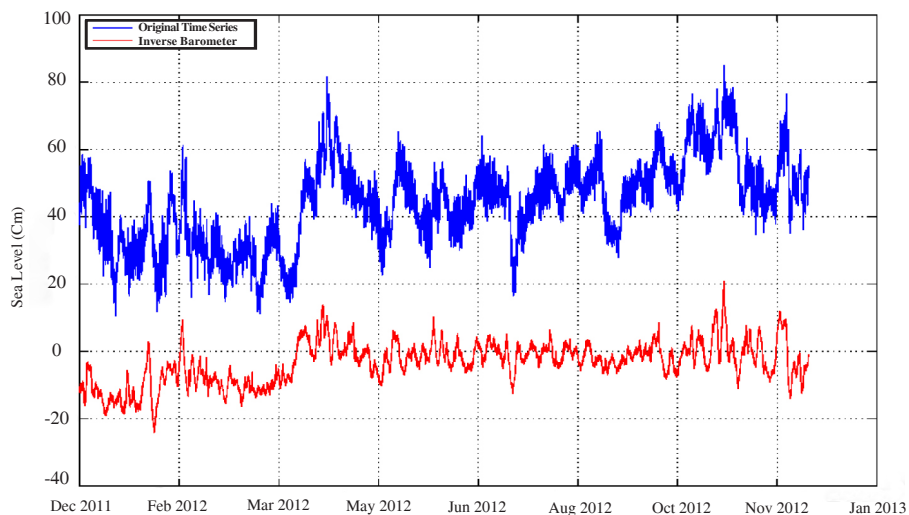


Fig. 3 Niveau de la mer au port d'Alger : en bleu, la hauteur brute, en rouge l'effet du baromètre inverse.

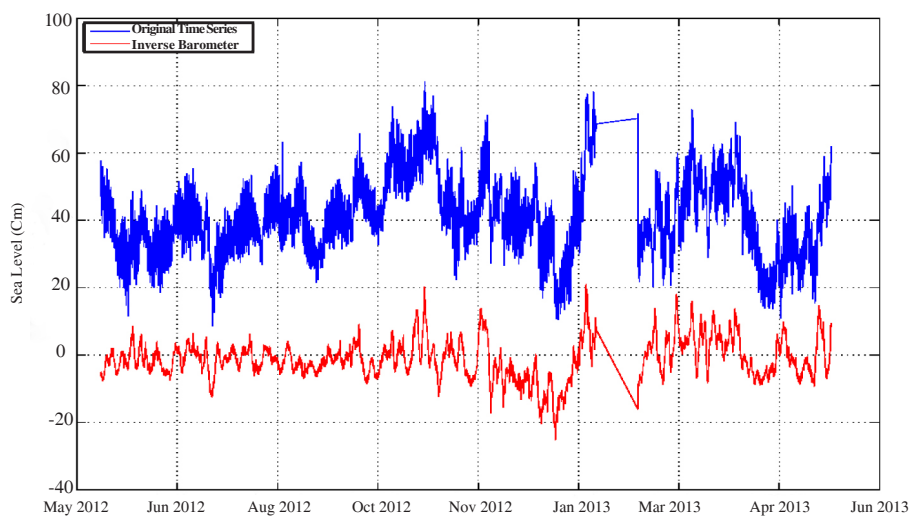


Fig. 4 Niveau de la mer au port de Jijel : en bleu, la hauteur brute, en rouge l'effet du baromètre inverse.

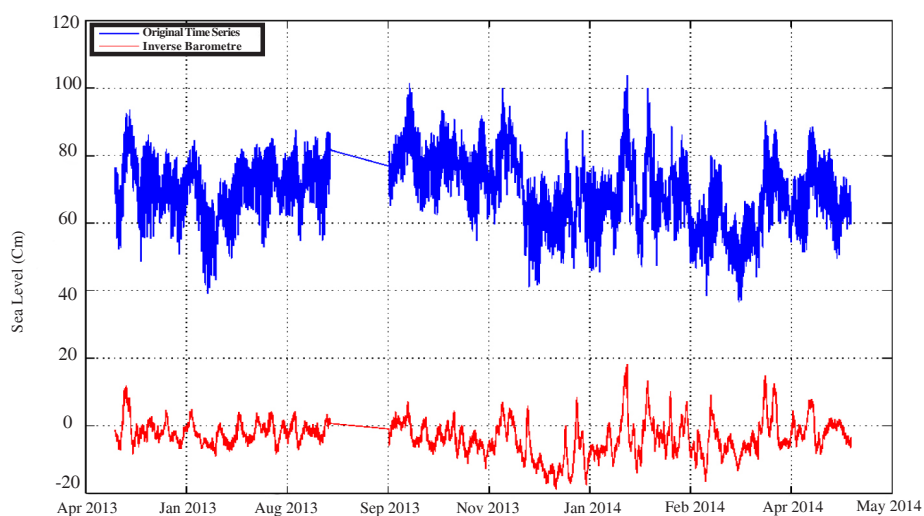


Fig. 5 Niveau de la mer au port d'Oran : en bleu, la hauteur Brute, en rouge l'effet du baromètre inverse.

Les figures 3, 4 et 5 représentent les mesures brutes du niveau de la mer et l'effet du baromètre inverse pour les trois stations. On remarque que l'allure des variations du niveau de la mer de chaque station suit parfaitement celle du baromètre inverse.

On remarque, dans les figure 3 et 4, une absence de données d'une durée de 20 jours pour Jijel et 28 jours

pour Oran, ceci est dû à un arrêt d'enregistrement. L'analyse harmonique des données marégraphiques corrigées de l'effet du baromètre inverse, permet d'avoir le niveau moyen de la mer ainsi que les composantes harmoniques définies pour les trois stations : nom de l'onde, sa fréquence, son amplitude et son incertitude.

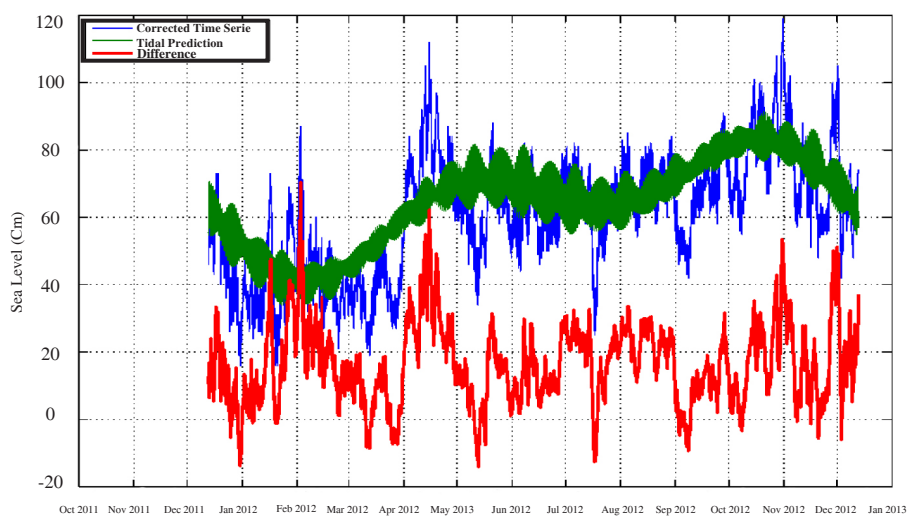


Fig. 6 Niveau de la mer au port d'Alger par rapport au zéro hydrographique.

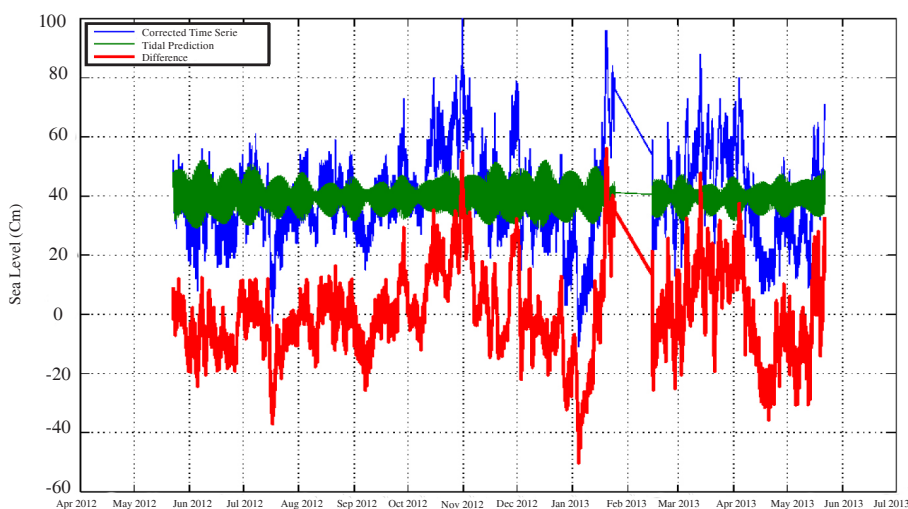


Fig. 7 Niveau de la mer au port de Jijel par rapport au zéro hydrographique.

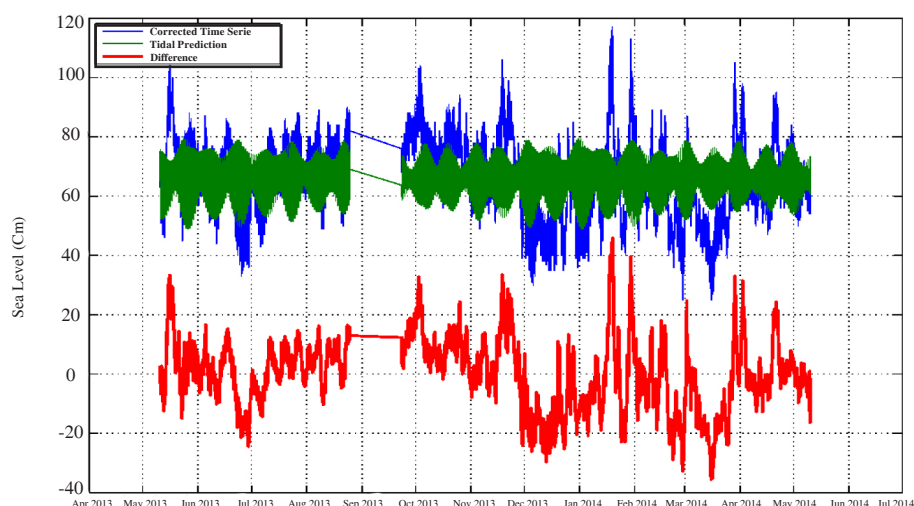


Fig. 8 Niveau de la mer au port d'Oran par rapport au zéro hydrographique.

Les figures 6, 7, et 8 représentent la série marégraphique corrigée de l'effet du baromètre inverse et la marée astronomique reconstruite à partir des composantes harmoniques identifiées avec un $SNR \geq 2$ (Signal-to-noise ratio).

Le SNR est un indicateur de la qualité de la transmission d'une information ; il est exprimé par le rapport entre l'amplitude du signal et l'erreur sur celle-ci : $SNR = \frac{A_s}{\sigma_{A_s}}$

Nous constatons à partir des figures 7, 8 et 9 que la marée astronomique reconstruite (vert) suit l'allure générale des observations marégraphiques (bleu).

Le niveau moyen calculé autour duquel oscille le niveau de l'eau au port d'Alger est de 40.6 cm, soit une différence de 6.6 cm par rapport à la référence actuelle. Celui calculé au port de Jijel est de 39.8 cm, soit une différence de 5.8 cm par rapport à la référence actuelle. Le niveau moyen de la mer déterminé au port d'Oran est estimé à 58 cm, soit une différence de 24 cm par rapport à la référence actuelle.

5.2 Étude des composantes du niveau de la mer

L'analyse harmonique de la marée nous a permis de calculer les constantes harmoniques des composantes détectées lors de l'analyse spectrale.

Le spectre de la marée est une représentation objective du signal étudié.

Il représente l'amplitude des composantes harmoniques en fonction de la fréquence du signal. La caractéristique principale de ce mode de représentation de la marée est la répartition des raies en groupes distincts, appelés espèces, selon leur fréquence [Gourou, 2012].

L'analyse spectrale a été appliquée, à l'aide de T_tide, aux données de la station d'Alger (figure 9), de Jijel (figure 10) et d'Oran (figure 11) afin d'identifier les composantes harmoniques à chaque station, et constituer ainsi l'identité locale de la marée.

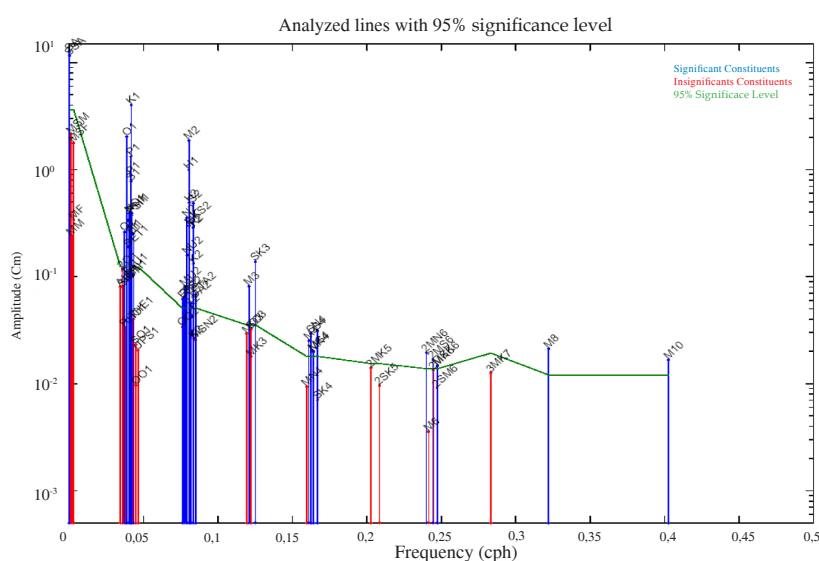


Fig. 9 Spectre des composantes harmoniques de la marée au port d'Alger. L'axe des abscisses représente la fréquence. L'axe des ordonnées représente les amplitudes en échelle logarithmique.

Nous remarquons que le spectre de la marée à Alger est dominé par les espèces diurnes et semi-diurnes qui forment le groupe de composantes harmoniques ayant les plus fortes amplitudes, avec à leurs têtes, K1 (≈ 4.01 cm) pour l'onde diurne et M2 (≈ 1.87 cm) concernant les ondes semi-diurnes.

En effet, les espèces diurnes et semi-diurnes représentent la majeure partie de la marée astronomique directement issue des actions de la Lune et du Soleil. Donc on peut dire que la marée au niveau du port d'Alger est mixte.

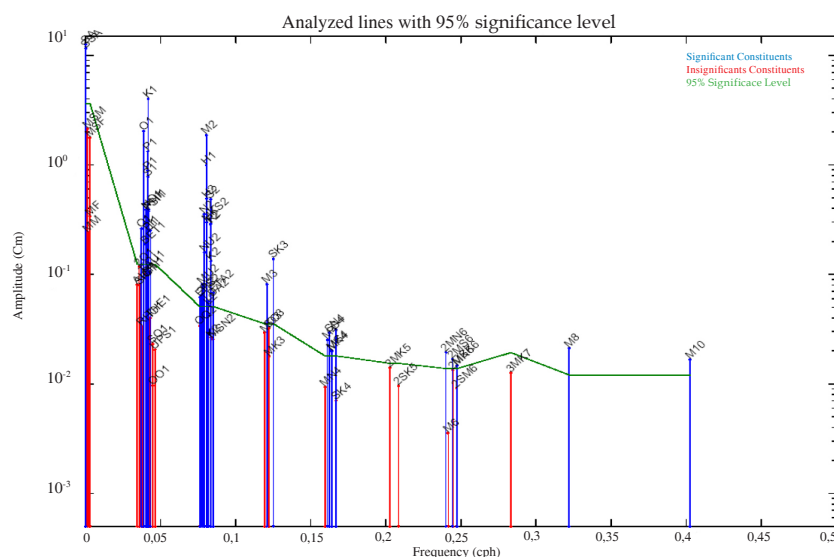


Fig. 10 Spectre des composantes harmoniques de la marée au port de Jijel. L'axe des abscisses représente la fréquence. L'axe des ordonnées représente les amplitudes en échelle logarithmique.

Les résultats de l'analyse spectrale de la station de Jijel sont en grande partie statistiquement similaires à ceux d'Alger. Le spectre est également dominé par les espèces diurnes et

semi-diurnes, K1 (≈ 2.65 cm) et M2 (≈ 3.55 cm). Au port de Jijel, on peut dire que la marée est mixte.

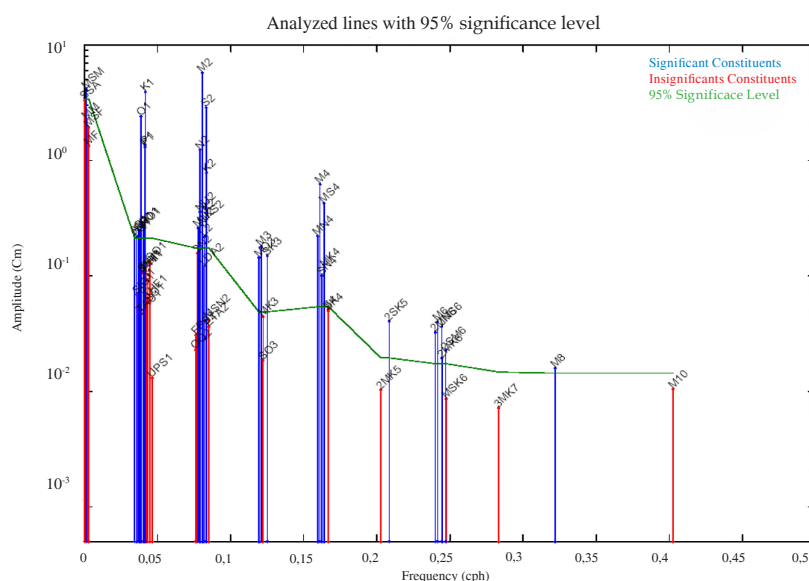


Fig. 11 Spectre des composantes harmoniques de la marée au port d'Oran. L'axe des abscisses représente la fréquence. L'axe des ordonnées représente les amplitudes en échelle logarithmique.

Le résultat de l'analyse spectrale de la station d'Oran montre une domination des espèces diurnes et semi-diurnes, K1 (≈ 3.94 cm) et M2 (≈ 5.73 cm) et montre également l'importance des espèces quart-diurnes et sixième-diurnes, groupes de composantes harmoniques d'interaction.

Pour la station d'Oran la marée est aussi mixte.

6. Conclusion

L'installation de trois stations marégraphiques le long de la côte algérienne (Alger, Jijel et Oran) est d'un grand intérêt, notamment pour le suivi du niveau de la mer, la définition d'une référence d'altitude Zéro, etc...

L'objectif de ce travail qui rentre dans le cadre du projet « définition d'un système de référence altimétrique pour l'Algérie », objet d'une convention entre l'INCT et le CTS, est de déterminer une référence d'altitude zéro à partir des données marégraphiques issues de ces trois stations à acquisitions automatiques.

Le traitement des données marégraphiques de chaque station par analyse harmonique nous a permis de déterminer le niveau de la mer aux ports d'Alger, de Jijel et d'Oran. L'analyse des résultats montre un décalage faible entre la référence altimétrique actuelle et celle déterminée au port d'Alger (6.6 cm) et au port de Jijel (5.8 cm), mais relativement important au port d'Oran (24 cm).

On peut dire donc que le niveau moyen de la mer le long des côtes algériennes, n'est pas à une distance égale par rapport à la surface du zéro hydrographique, car on n'a pas trouvé la même valeur entre le zéro hydrographique et la nouvelle référence à chaque station.

L'analyse spectrale nous a permis d'identifier, dans une gamme de fréquences, les amplitudes significatives relatives aux variations temporelles de la marée. On peut dire donc que la marée dans les trois stations marégraphiques, en fonction des données disponibles, est mixte.

En perspective, et dans le cadre de la convention CTS/INCT, l'analyse de série de données marégraphiques de longue durée permettra la définition d'une nouvelle référence altimétrique qui servira d'origine zéro pour le réseau de nivellement général algérien. Notons ici que les composantes harmoniques identifiées seront utilisées pour la prédiction de la marée.

L'installation des nouvelles stations marégraphiques, notamment à Ténès (Chlef), Ghazaouet (Tlemcen) et Annaba, va sûrement améliorer la précision sur la définition d'un système de référence altimétrique national.

Références bibliographiques

- Aviso and PoDaac User Handbook (2008). *IGDR and GDR Jason-1 Products*, SMM-MU-M5-OP-13184-CN. Edition 4.1.
- Cartwright D. E. (2003). *History of Oceanography*, Vol.15, pp. 2-3.
- Darwin G. H. (1883). *The harmonic analysis of tidal observations*. (Report of a Committee consisting of Professors G. H. Darwin and J. C. Adams for the harmonic analysis of tidal observations). British Association Report, pp.49-118.
- Doodson A. T. (1921). *Harmonic development of the tide generating potential*. Proceedings of the Royal Society of London A, 100, pp.305-329.
- Gouriou T. (2012). *Evolution des Composantes du Niveau Marin à partir d'Observations de Mare graphie effectuées depuis la fin du 18e Siècle en Charente-Maritime*. Thèse de doctorat de l'université de la Rochelle - France.
- Haddad M., H. Abdellaoui, N. Amrane (2006). *Determination of the Mean Sea Level at Algiers Harbor from the Tidal Data Analyses*. Bulletin des Sciences Géographiques - Institut National de Cartographie et de Télédétection - N°18 : pp18-20 – ISSN-1112-3745.
- Institut National de Cartographie et de Télédétection (2007). *Rapport national de l'Algérie*, XXIV IUGG General Assembly, July 2-13, 2007 Perugia - Italy.
- Lefevre, F. (2000). *Modélisation des marées océaniques à l'échelle globale : Assimilation de données in situ et altimétriques*. Thèse de doctorat de l'université Toulouse III – France.
- Log-aLevel (2007). *User Manual for Stationary and Mobile Version*, Vers. 12.07. General Acoustics.
- Pawlowicz R., B. Beardsley and S. Lentz (2002). *Classical tidal harmonic analysis including error estimates in Matlab using T-tide*. Computers and Geosciences 28 (8), 929-937.
- Pouvreau N. (2008). *Trois cents ans de mesures marégraphiques en France : outils, méthodes et tendances des composantes du niveau de la mer au port de Brest*. Thèse de doctorat de l'université de la Rochelle – France.
- Pouvreau N. (2010). *Vers une coordination de l'observation du niveau de la mer en France*. Actes des XI^e Journées Nationales Génie Civil - Génie Côtier, Sables d'Olonne, 22-25 juin 2010 (539-548).
- Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) (2007). *Documentation de MAS. Fascicule : mode opératoire n°2007-061*.
- Simon B. (2007). *La marée océanique côtière*. Collection "Synthèse", ed. Institut Océanographique, 433pp.
- Thomson W. (1869). *Report of the Committee of the purpose of promoting the extension, improvement and harmonic analysis of Tidal Observations*. In: Report of the 38th Meeting of the British Association for the Advancement of Science, 1868, John Murray, London, pp.489-510.
- Wöppelmann G, S. Zerbini, M. Marcos (2006). *Tide gauges and Geodesy : a secular synergy illustrated by three present-day case studies*. CRAS – Géosciences, n°338, pp.980-991.

Site web:

[http://www.eos.ubc.ca/~rich/#T_Tide]. *T_Tide Harmonic Analysis Toolbox*. Departement of earth and Ocean Science – University of British Columbia.