

Analyse et prévision des marées à partir des observations du marégraphe d'Alger

A.Ayouaz, M.Haddad & H.Taibi

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

Email : a_ayouaz@yahoo.fr

ملخص : في هذه الدراسة، تم إجراء تجربة لتحديد الثوابت التوافقية للمد والجزر وكذا متوسط مستوى سطح البحر لميناء الجزائر العاصمة، بواسطة التحليل التوافقي لبيانات المد والجزر.

يمكن استغلال الثوابت التوافقية التي تم تحديدها للتنبؤ بالمد والجزر. هذا وقد أظهر تحليل البيانات وجود فرق ضعيف بين المرجع الحالي للمستوى المتوسط للبحر والمرجع المتحصل عليه من خلال تحليل المعطيات : 9.8 سم.

الكلمات الأساسية : المد والجزر، التحليل التوافقي، التنبؤ، المستوى المتوسط، قياس المد والجزر.

Résumé : Dans le cadre de cette étude, une expérimentation a été menée en vue de la détermination des constantes harmoniques de la marée et du niveau moyen de la mer au niveau du port d'Alger, à partir de l'analyse harmonique des données issues du nouveau marégraphe à acquisition automatique.

Notons ici que les composantes harmoniques identifiées peuvent être utilisées pour la prédiction de la marée. L'analyse des données a fait ressortir un décalage assez faible entre la référence actuelle du niveau moyen et celle déterminée dans le cadre de cette étude : 9.8 cm.

Mots clés : marée, analyse harmonique, prédiction, niveau moyen, marégraphie.

Abstract : In this study, an experiment was conducted for the determination of the tide and the average level of harmonic constants of the sea at the port of Algiers, from the harmonic analysis of data from the new tide gauge automatic acquisition.

Note here that the identified harmonic components can be used for prediction of the tide. Data analysis has revealed a rather low offset between the current reference and that the average level determined in the context of this study : 9.8 cm.

Key words : tide, harmonic analysis, prediction, average, tide gauges.

1. Introduction

Parmi tous les moyens d'observation de l'océan, la mesure marégraphique est l'une des techniques majeures de l'océanographie. Quel que soit son principe de mesure, un marégraphe est susceptible de fournir à tout instant une information locale sur la hauteur de la surface de la mer par rapport à une référence.

La marégraphie a fait l'objet depuis quelques années d'un regain d'intérêt, principalement en raison d'un besoin nouveau de mesures de bonne qualité qui étaient souvent assujetties aux imprécisions des appareils traditionnels, en l'occurrence les marégraphes à flotteur à enregistrement analogique [Gouriou, 2012].

A cet effet et dans la perspective de définir une nouvelle référence pour le Nivellement Général Algérien (NGA), qui est actuellement basée sur le médimarémètre de La Goulette (Tunisie), l'Institut National de Cartographie et de Télédétection (INCT) a installé en décembre 2011 au niveau du port d'Alger un nouveau marégraphe à acquisition numérique, de type LOG_alevel [General Acoustics, 2011]. L'installation du nouveau marégraphe s'est faite avec la collaboration du Service Hydrographique des Forces Navales (SHFN) ; qui assure la gestion et la maintenance du réseau de marégraphes analogiques en Algérie.

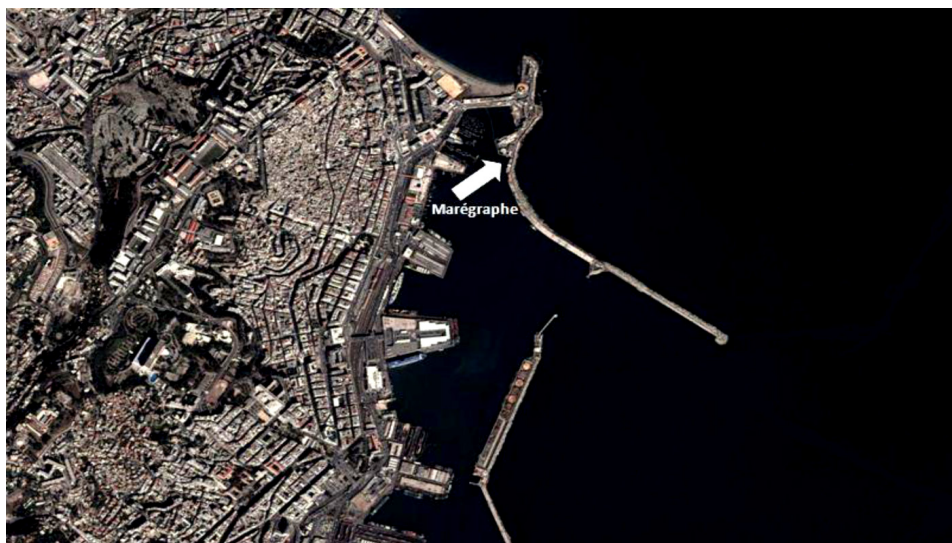


Fig. 1 Localisation du site marégraphe d'Alger [source d'image satellitaire: Google Earth].

Cette présente étude porte sur l'analyse et la prévision de la marée à partir des observations issues du nouveau marégraphe d'Alger. La méthode dite « analyse harmonique » permet de fournir une approche pratique et précise de l'analyse et de prédiction de la marée. La formule harmonique s'appuie sur des paramètres (constantes harmoniques de la marée) à déterminer expérimentalement à partir d'observations marégraphiques. L'obtention d'une bonne précision nécessite des observations de bonne qualité et il faut noter que les résultats de l'analyse harmonique sont uniquement valables là où les observations ont eu lieu.

A titre de rappel, le marégraphe ne mesure pas la marée mais le niveau de la mer, dont la marée n'est qu'un des phénomènes qui fait varier ce niveau. En effet, la variation du niveau de la mer est soumise à diverses influences en plus du phénomène de marée, comme les phénomènes atmosphériques, la circulation océanique, la variation stérique (volume spécifique de l'eau) et la variation de la température de l'eau.

2. Analyse harmonique de la marée

La marée est un mouvement oscillatoire du niveau de la mer dû aux effets de l'attraction de la lune et du soleil sur les particules liquides. Ce phénomène peut être correctement représenté comme la résultante de la composition d'un nombre illimité d'oscillations élémentaires strictement périodiques. Ainsi la hauteur de la marée à un instant quelconque t peut s'exprimer par la formule suivante [document de SHOM] :

$$h(t) = Z_0 + \sum_j \sum_i A_{ij} \cos(V_{ij} - G_{ij}) \quad (1)$$

où : Z_0 est le niveau moyen autour duquel oscille le niveau de l'eau. Il permet de rapporter la hauteur d'eau au niveau zéro de référence des cartes qui est généralement le niveau des plus basses mers.

A_{ij} et G_{ij} sont respectivement l'amplitude (en mm) et la situation d'une onde élémentaire (en degrés) qui ne dépendent que du port considéré.

V_{ij} est l'argument astronomique lié au temps t (en degré par heure).

L'indice i caractérise la nature de l'onde, l'indice j se rapporte à sa période. Ainsi : $j = 0$ pour les ondes annuelles, $j = 1$ pour les ondes "diurnes" qui ont une période voisine de la journée et $j = 2$ pour les ondes "semi-diurnes" qui ont une période voisine de la demi-journée, etc.

La meilleure méthode pour la détermination des coefficients A_{ij} et G_{ij} est la méthode des moindres carrés. Si l'on dispose d'une série temporelle d'observations $O(t)$, la minimisation de $\sum_t [O(t) - h(t)]^2$ donne les coefficients. Cette méthode présente les avantages suivants :

- 1) : la série peut être discontinue, 2) : la longueur est quelconque, 3) : il n'y a aucune hypothèse sur les données hors de la fenêtre, 4) : il n'y a pas de phénomènes transitoires, 5) : le pas de temps entre deux observations est quelconque.

L'argument astronomique V_{ij} s'exprime par la formule [Simon, 2005] :

$$V_{ij} = 15jt + n_1s + n_2h + n_3p + n_4N' + n_5p_1 + n_6D \quad (2)$$

où : t est le temps solaire moyen local exprimé en heures décimales

$n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6$ sont des coefficients constants entiers.

$n_1, \dots, n_5$ sont appelés nombres de Doodson

h : la longitude moyenne du soleil

s : la longitude moyenne de la lune

p : la longitude du périégée de la lune

N : la longitude du nœud ascendant de la lune et $N' = -N$

p_1 : la longitude du périégée du soleil

$D = 90^\circ$

$n_0 = 0$ ou 1 ou -1 pour que le terme correspondant du potentiel soit de la forme $G = \cos V_{ij}$ avec G positif.

Ces paramètres exprimés en degrés sont, en première approximation, des fonctions linéaires du nombre T de jours écoulés depuis l'instant origine des temps qui peut être choisi de façon arbitraire.

Afin de pouvoir séparer les composantes analysées, il est indispensable que la série temporelle respecte le critère de Rayleigh. Ce critère traduit le fait que pour séparer deux ondes de périodes T_1 et T_2 ($T_2 > T_1$), il faut que la durée d'enregistrement T_e soit supérieure à [Letellier, 2004] :

$$T_e > (n+1) T_1 = nT_2 \quad (3)$$

avec n = entier.

Le critère de Rayleigh se présente sous la forme :

$$T_e \geq \left| \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \right| = \left| \frac{1}{f_1 - f_2} \right| \quad (4)$$

avec f_1 et f_2 , les fréquences associées à T_1 et T_2 .

La durée d'observation est un facteur important pour l'analyse harmonique. Le tableau 1 nous donne la durée d'observations (en heures) nécessaire pour extraire le constituant. Il faut au moins deux points par cycle pour résoudre un cycle (Critère de Nyquist). En pratique, un échantillonnage toutes les heures est suffisant pour résoudre M2.

Tab 1. Durée d'observations en heures nécessaire pour extraire le constituant [Source : Foreman, 1977].

Longueur des données nécessaires (h) pour inclure le constituant	Onde de longue période	Onde diurne	Onde semi-diurne	Onde tiers-diurne	Onde quart-diurne	Onde 5 ^e diurne	Onde 6 ^e diurne	Onde 7 ^e diurne	Onde 8 ^e diurne
13	Z0	M2							
24		K1				2MK5		3MK7	
25				M3	M4				
26							M6		M8
178						2SK5			
328		O1							
355	MSF		S2	SK3	MS4		2MS6		
651		OO1							
656				MO3 MK3					
662		2Q1 Q1 NO1 J1 UPS1	N2		MN4		2MN6		
764	MM	ALP1	EPS2 MU2 L2		SN4				
4383	MF	TAU1 BET1 P1 PHI1 SO1	MKS2 K2 MSN2	SO3	MK4 SK4		2MK6 MSK6		
4942	MSM	SIG1 RHO1 CHI1 THE1	OQ2 2N2 NU2 LDA2						
8766	SA								
8767		PI1 S1 PSI1 H1	H2 T2 R2						
11326			GAM2						

3. Analyse des données

Les données marégraphiques utilisées dans cette étude sont celles issues du marégraphe LOG_alevel d'Alger, couvrant la période du 13 décembre 2011 au 26 novembre 2012.

Ces données, échantillonnées à 1 minute d'intervalle, représentent les mesures de la hauteur de la mer (en mètre) par rapport à la référence zéro hydrographique (qui se trouve à 34 cm au-dessous de la référence zéro NGA). Les mesures brutes de la hauteur de la mer sont représentées par la figure 2.

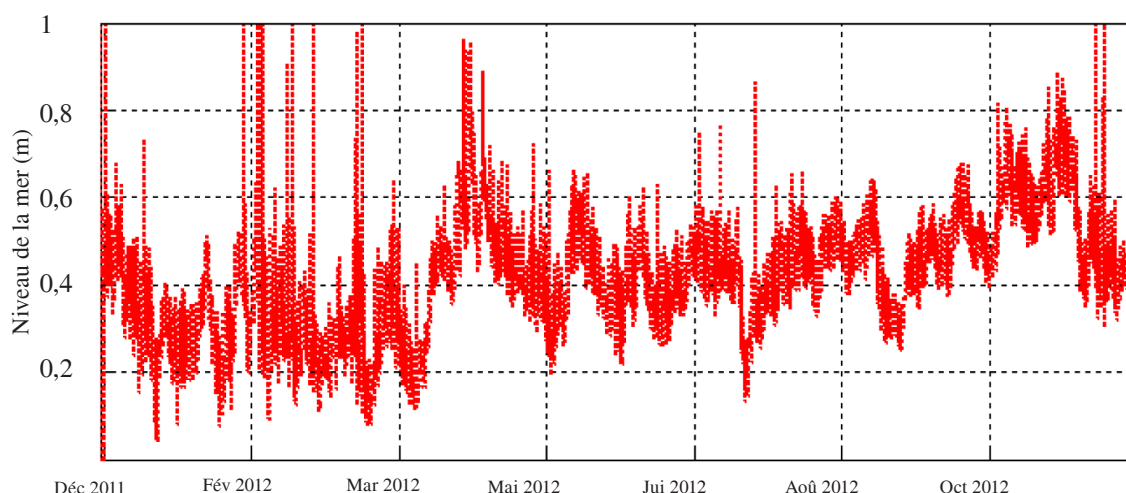


Fig. 2 Mesures brutes de la hauteur de la mer (m).

Le Pack T-Tide [Pawlowicz et al., 2002] a été utilisé pour estimer les composantes de la marée au niveau du port d'Alger à partir des données marégraphiques dont nous disposons. T_tide est une boîte à outils contenant plusieurs programmes écrits sous MATLAB et permettant de réaliser une analyse harmonique et des prédictions de la marée.

La première version de T_Tide est apparue en décembre 2001. Deux mises à jour, contenant des améliorations de programmes, ont ensuite été publiées en janvier 2003 et en mars 2011. Ce logiciel est disponible gratuitement en ligne, et son code est libre d'accès. Il est largement utilisé par les chercheurs du monde entier puisqu'à ce jour, au moins 313 articles sont issus de travaux de recherche effectués avec T_Tide [Gouriou, 2012].

Le fichier d'entrée n'est autre que celui des mesures de la hauteur de la mer par rapport à la référence zéro hydrographique (du 13/12/2011 au 26/11/2012). Néanmoins, l'utilisateur doit formuler plusieurs paramètres permettant de mener à bien l'analyse harmonique. Parmi ces paramètres : l'intervalle de temps en heure séparant deux mesures, la date et l'heure de la première mesure (au format MATLAB) et la latitude de l'observatoire en degrés décimaux.

Les deux critères de Rayleigh et de SNR (rapport signal à bruit : Signal-to-Noise Ratio) ont été fixés respectivement

à 1 et à 2. Ces deux valeurs sont fréquemment utilisées comme valeurs par défaut lors de ce genre d'analyse. Notons ici que le SNR est une mesure de bruit par rapport à l'amplitude du signal utile. Une grande valeur de SNR signifie que l'amplitude du signal utile est grande par rapport à celle du bruit.

Le résultat obtenu en sortie est une matrice contenant la liste des constantes harmoniques définies pour le port d'Alger : nom de l'onde, sa fréquence, son amplitude et son incertitude ainsi que sa phase et son incertitude. A l'aide de cette matrice, on a ensuite calculer les « prédictions » de hauteurs d'eau pour la période des observations dont nous disposons.

Les deux figures 3 et 4 représentent respectivement les amplitudes (en mm) et les phases (en degré) des 45 ondes de marées identifiées à partir de l'analyse harmonique de la série marégraphique. Ces ondes justifient la condition $SNR \geq 2$.

La figure 5 représente l'ensemble des constituants : en rouge: $SNR \geq 2$; Bleu ≤ 2 ; Vert=2. Enfin la figure 6 représente la série marégraphique brute et la marée astronomique reconstruite à partir des ondes qui justifient la condition $SNR \geq 2$, sur laquelle, nous constatons que la marée astronomique suit l'allure générale des observations marégraphiques brutes.

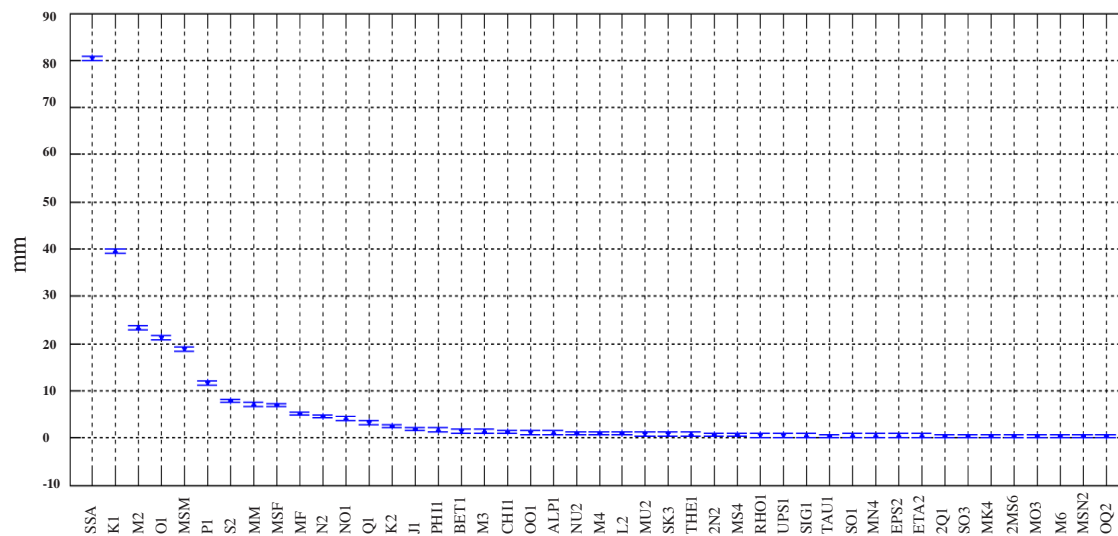


Fig. 3 Amplitudes des ondes identifiées (intervalle de confiance 95%).

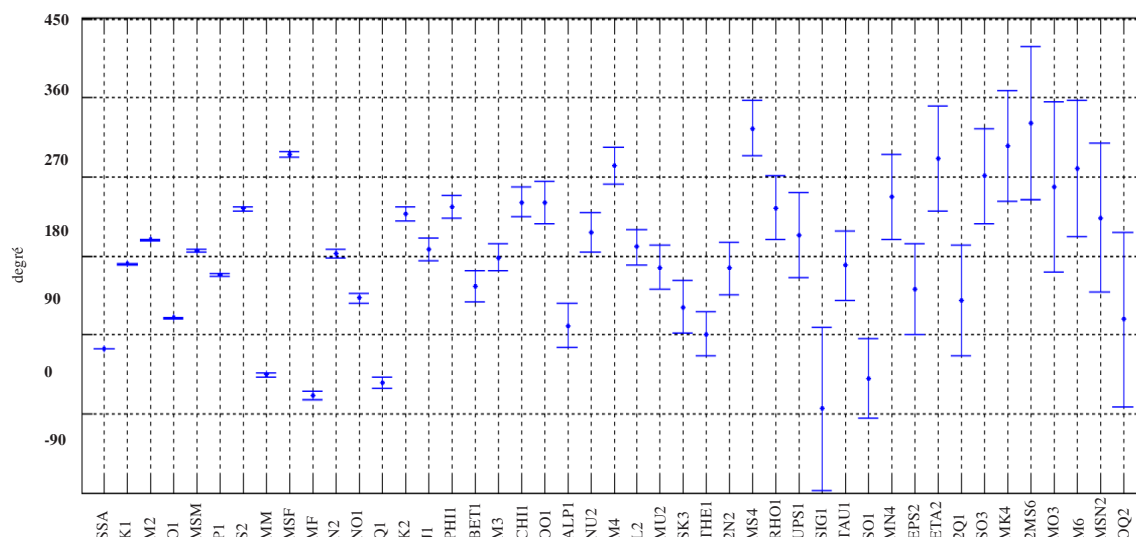


Fig. 4 Phases des ondes identifiées (intervalle de confiance 95%).

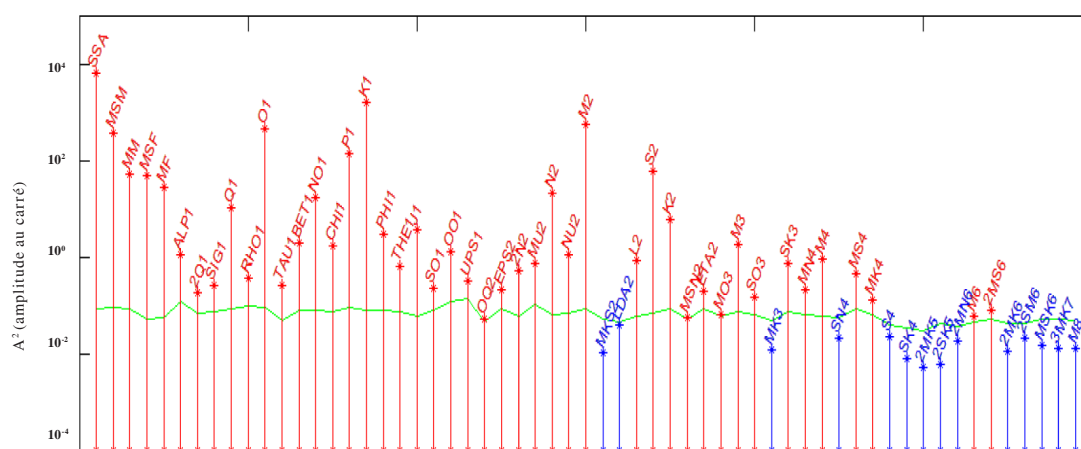


Fig. 5 Ensemble des constituants. En rouge: $SNR \geq 2$; Bleu ≤ 2 ; Vert=2.

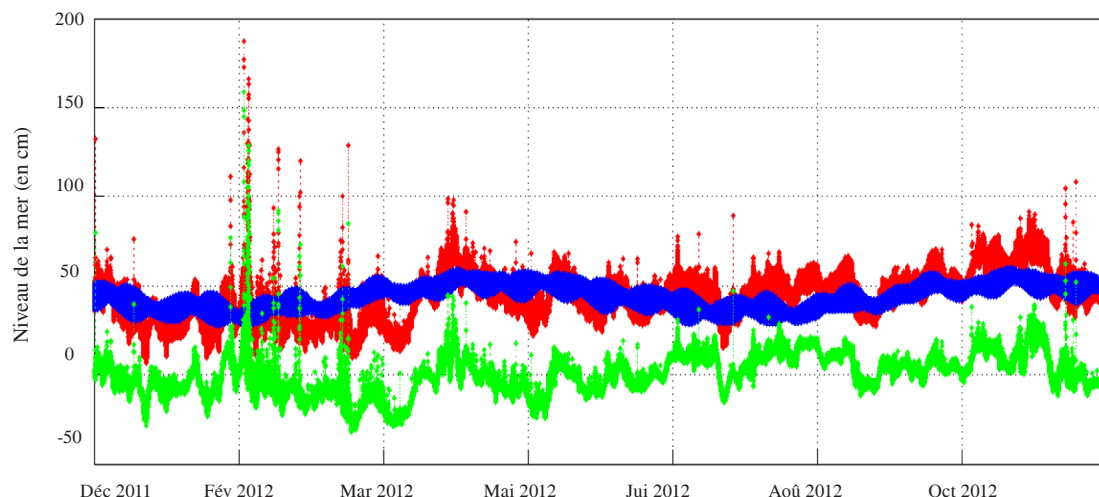


Fig 6 Niveau de la mer par rapport à la référence zéro hydrographique. En rouge : la mesure brute, en bleu la marée prédite, en vert la différence.

Le type de marée dépend de l'importance relative des composantes diurnes par rapport aux composantes semi-diurnes selon le facteur $F = (K1 + O1) / (M2 + S2)$ [Defant, 1958]. C'est le rapport des amplitudes diurnes (solaire O1 et lunaire K1) sur les amplitudes

semi-diurnes (solaire S2 et lunaire M2).

Dans notre cas, la valeur de F au port d'Alger est de 1.95, ce qui indique que la marée est de type mixte. On observe donc une seule pleine mer et basse mer par jour. La figure 7 représente la marée estimée pour la journée du 17/02/2012.

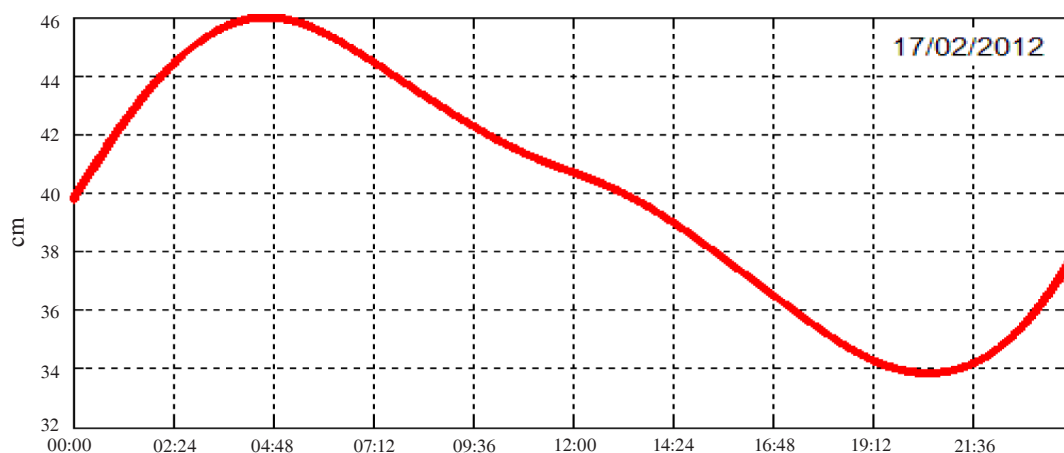


Fig. 7 Marée estimée pour la journée du 17/02/2012.

Le niveau moyen autour duquel oscille le niveau de l'eau est estimé à 43.8 cm, soit une différence de 9.8 cm par rapport à la référence actuelle zéro hydrographique.

4. Conclusion

L'expérimentation menée dans le cadre de cette étude a permis la détermination des constantes harmoniques de la marée et du niveau moyen préliminaire de la mer au niveau du port d'Alger. Les composantes harmoniques ainsi identifiées peuvent être utilisées pour la prédiction. L'analyse des données a fait ressortir un décalage assez faible (9.8 cm) entre la référence actuelle du niveau moyen

et celle que nous avons déterminé. Toutefois, ce résultat ne peut être considéré comme définitif, compte tenu notamment de la courte durée des observations utilisées pendant une année.

Cette étude qui est une contribution au projet mené par l'Institut National de Cartographie et de Télédétection et l'Agence Spatiale Algérienne, portant sur la définition d'un système moderne de référence altimétrique pour l'Algérie. Les travaux de recherche à effectuer dans le cadre de ce projet donneront lieu à des résultats pratiques : prédiction précise de la marée, suivi de l'évolution du niveau moyen de la mer, ...

Références bibliographiques

Defant A. (1958) Ebb and Flow. Ann Arbor Science Paperbacks, Ann Arbor. 121 p.

Foreman M.G. (1977) Manual for tidal heights analysis and prediction. Pacific Marine Science Report Institute of Ocean Sciences, Sidney, B.C: 101. 77-10.

General Acoustics (2011) LOG_aLevel. User Manual for Stationary and Mobile Version, Vers. 03.34.

Gouriou T. (2012) Evolution des composantes du niveau marin à partir d'observations de marégraphie effectuées depuis la fin du 18e siècle en Charente-Maritime. Thèse soutenue le 26 mars 2012 pour l'obtention du grade de Docteur de l'université de La Rochelle.

Letellier T. (2004) Etude des ondes de marée sur les plateaux continentaux. Thèse Université Toulouse III, 279.

Pawlowicz R., Beardsley b, and lentz S. (2002) Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. Computers & Geosciences 28(8), 929-937.

SHOM. Formulation de la méthode de calcul. [http://starpsi.free.fr/TIPE/ressources_tipe/Boîte 20% à 20% idée/ Tipe_maree/formulation](http://starpsi.free.fr/TIPE/ressources_tipe/Boîte%20à%20idée/Tipe_maree/formulation)

Simon B. (2005) Cours de marée. Service Hydrographique et Océanographique de la Marine, France.

