

Note scientifique

CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DE MARÉE A MAHAJANGA

RAVOLANIRINA Alain Jean de Dieu^{1,3},
HARY Jean^{1,3}, RATIARISON Adolphe^{2,3},
TSIFOHINJANAHARY Andrianantoanina Gael³

1-Enseignant Chercheur de la FSTE de l'Université de Mahajanga, Tél : +261 34 51 066 76 / +261 32 60 851 49, E-mail : mahitavelo@gmail.com

2-Enseignant Chercheur de la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo,

3-Laboratoire de la Dynamique de l'Atmosphère, du Climat et des Océans (DyACO)

Résumé

Ce travail de recherche concerne la contribution à l'étude de marée à Mahajanga. Elle a pour objectif d'évaluer l'évolution de la hauteur de la mer pendant la pleine Lune. L'analyse de la tendance nous a permis de montrer que la hauteur de la mer pendant la pleine Lune a connu une diminution de -0,001m par an. Le test de Pettitt est utilisé pour déterminer la date de rupture qui a eu lieu pendant l'année 1997. La prévision durant 2018 à 2038 a été faite à l'aide du réseau de neurone artificiels qui a prédit que la future heure de passage de pleine Lune oscille entre 3h03mn à 4h21mn tandis que la hauteur de la mer est comprise entre 4.15 m et 5,23 m.

Mots-clés : Marée, Pleine Lune, Hauteur de la mer, Réseau de Neurone Artificielle, Prévision

Abstract

This research work concerns the contribution to the tidal study at Mahajanga. Its objective is to evaluate the evolution of the height of the sea during the full moon. The trend analysis allowed us to show that the sea height during the full moon experienced a decrease of -0.001m per year. Pettitt's test is used to determine the date of rupture which occurred during the year 1997. The prediction during 2018 to 2038 was made using the artificial neural network which predicted that the future passage time of full moon oscillates between 3:03 mins to 4:21 mins while the height of the sea is between 4.15 m and 5.23 m.

Keywords: Tide, Full Moon, Sea Height, Artificial Neuron Network, Forecast

Introduction

Les variations du niveau d'eau ont fasciné et questionné l'humanité depuis bien longtemps. La première contribution scientifique à la caractérisation du niveau d'eau date dès environs de 330 avant J-C quand Pythéas constate que la marée était liée d'une manière ou d'une autre au mouvement de la Lune (Fabien, 2015). Plusieurs théories ont été avancées pour expliquer le phénomène des marées. Par rapport aux modèles théoriques des marées basées sur l'application de la Loi Fondamentale de la Dynamique, la méthode que nous proposons utilise l'analyse statistique descriptive basée sur la Transformée de Fourier Rapide, la transformation en ondelette, le test de Pettitt et le réseau de neurone artificiel. Ces méthodes permettent d'étudier en détail les différentes composantes du phénomène des marées telles que la période, la tendance et cycles, les fluctuations résiduelles et la date de rupture (Nainamahefa, 2017).

Matériel et méthodes

Localisation de la zone d'étude

Elle est située selon les coordonnées géographiques suivantes :

Latitude:15°44 S

Longitude : 46°19 E

Bases de données

La donnée climatologique utilisée est la hauteur de la mer pendant la pleine Lune dans la région de Mahajanga que nous avons téléchargé à partir de la base de données du logiciel de la marée du monde.

Matériels utilisés

Nous avons utilisé dans notre étude les logiciels comme :

- MATLAB, Netlab
- Microsoft Office Excel

Méthodes utilisés

Statistiques descriptives

Outils statistiques de base

Dans ce travail, nous utilisons principalement : la moyenne, la variance, l'écart type.

-La moyenne arithmétique :

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n X_t \quad (2.1)$$

-La variance :

$$Var(X) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (X_t - \bar{X}_t)^2 \quad (2.2)$$

-L'écart-type :

$$\sigma(X) = \sqrt{Var(X)} \quad (2.3)$$

L'écart-type est par excellence l'indicateur de la variabilité climatique. Si $\sigma(X)$ est faible les valeurs de $\{X_t\}$ sont regroupées autour de la moyenne ; s'il est important, elles sont en revanche très dispersées (Nicolle, ANNÉE).

Indice de dépendance :

Ces notions, plus spécifiques à l'étude de série temporelle, renseignent sur la dépendance entre les données X_t . L'auto-covariance empirique renseigne sur la dépendance entre deux données successives (Barthes & Girondot, 1988).

$$\gamma(k) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (X_t - \bar{X}_t)(X_{t+k} - \bar{X}_t) \quad (2.4)$$

Tendance

La tendance est une droite de régression au sens des moindres carrés qui a pour expression $y = a + bx$. Elle est obtenue à partir

du calcul du coefficient directeur a et de l'ordonnée à l'origine b (Guillaume, 2012). Elle dépend du signe de b :

- Si $b > 0$: tendance vers une augmentation.
- Si $b < 0$: tendance vers une diminution.

Test de Mann et Kendall (MK) donné par :

$$MK = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{signe}(x_j - x_k) \quad (2.5)$$

En pratique, nous utilisons la statistique normalisée :

$$MK_{norm} = \begin{cases} (MK - 1) / \sigma_{MK} & \text{si } MK > 0 \\ 0 & \text{si } MK = 0 \\ (MK + 1) / \sigma_{MK} & \text{si } MK < 0 \end{cases} \quad (2.6)$$

$$\text{Où } \sigma_{MK} = \sqrt{\frac{n(n-1)(2n+5)}{18}} \quad (2.7)$$

Autocorrélations empiriques

Les autocorrélations empiriques sont les quotients des covariances par la variance noté $\rho(k)$, donné pour un certain ordre de décalage k par :

$$\rho(k) = \frac{\gamma(k)}{\gamma(0)} \quad (2.8)$$

Avec $\gamma(k)$, la covariance de décalage k est définie par :

$$\gamma(k) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (X_t - \bar{X}_t)(X_{t+k} - \bar{X}_t) \quad (2.9)$$

Elle indique la dépendance entre deux données écartées de k unité de temps et ainsi de suite. Nous supposons que la variance $V(X) > 0$ car l'éventualité $V(X) = 0$ est possible, mais voudrait dire que la suite de valeurs est constante.

$$\gamma(0) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (X_t - \bar{X}_t)(X_t - \bar{X}_t) \quad (2.10)$$

Les décalages admissibles, pour que la fonction d'autocorrélations soit significative, sont définis dans l'intervalle ci-dessous :

$$\frac{T}{6} \leq k \leq \frac{T}{3}$$

Si bien qu'en passant des auto-covariances aux autocorrélations nous perdons une information qui n'est autre que dispersion de la série autour de la moyenne. Ceci dit, ce sont les autocorrélations qui caractérisent le mieux la dépendance (Guillaume, 2012).

Intervalle de confiance

L'intervalle de confiance (IC) à 95% est un intervalle de valeurs qui a 95% de chance de contenir la vraie valeur du paramètre estimé. Pour déterminer le seuil de corrélation à partir duquel les deux séries sont indépendantes, il faut déterminer l'erreur sur l'estimation de $\gamma(k)$

L'intervalle de confiance calculé sur $\gamma(k)$ permet de connaître le seuil à partir duquel chaque valeur du coefficient de corrélation peut être considéré comme égale à 0 (Barthes & Girondot, 1988).

Test de Pettitt

Le test de Pettitt s'apparente, dans sa construction, au test de Mann-Kendall, à la seule

différence est que celui de Pettitt est plutôt dédié à la détection des ruptures plutôt que des tendances (Vania, 2006). Dans ce test, il s'agit de calculer le variable $U_{t,N}$:

$$U_{tN} = \sum_{k=1}^t \sum_{p=t+1}^N D_{kp} \quad (2.11)$$

La rupture se trouve à la valeur maximale de $U_{t,N}$

Inter-corrélation

Le concept que nous proposons de mettre en œuvre l'inter-corrélation entre deux signaux est de chercher le maximum de ressemblance entre deux séries s et s' . La philosophie de l'inter-corrélation est de calculer le retard (ou translation t). Ce retard t maximise la ressemblance entre s et s' (Vania, 2006).

La dentition mathématique de ce concept est :

$$x_{corr}(s, s')(t) = \sum_{i=-n}^n (s_i s_{i-t}) \quad (2.12)$$

Méthode de Réseau de Neurones Artificiels (RNA)

L'utilisation de la méthode de RNA requiert l'exécution des étapes suivantes :

- Traçage de la fonction d'autocorrélation afin d'estimer le nombre de couches d'entrées.
- La préparation des données sous forme de matrice à p colonnes, de telle façon à ce que la dernière colonne soit considérée comme la sortie souhaitée et les $p-1$ colonnes utilisées pour la couche d'entrée.
- La répartition des données en deux parties, la 1^{ère} partie est utilisée pour la base d'apprentissage

de la prévision et la 2^{ème} partie est utilisée pour le test de validation.

L'optimisation du nombre de neurones cachées qui se fait par visualisation de la courbe obtenue par la programmation MATLAB.

Calcul de MAPE

Il est rare que l'on réussisse à prédire exactement les données. Le calcul de l'erreur moyenne faite par un modèle prévisionnel nous donne une mesure de l'exactitude. L'équation suivante montre comment le MAPE est calculée (Andriamparany, 2009) :

$$MAPE = \left(\frac{100}{N} \right) \sum_{t=1}^N \left| \frac{D_t - P_t}{D_t} \right| \quad (2.13)$$

Le tableau 1 ci-dessous représente les classifications de la qualité de prévisions selon le pourcentage de la valeur de MAPE.

Tableau 1 : Classifications de la qualité de prévisions

MAPE	Qualité de prévision
MAPE < 10%	Excellent
10% < MAPE < 20%	Bon
20% < MAPE < 30%	Moyen
MAPE > 30%	Mauvais

Résultats et discussions

L'évolution mensuelle de la hauteur de marée à Mahajanga pendant la pleine Lune depuis 1979 jusqu'à 2018 est illustrée par la figure 1. Nous observons que la hauteur de la mer oscille autour de 5 m au mois de Janvier.

Elle est égale à :

- ✓ 5,06 m entre le mois de janvier 1982 et janvier 1991
- ✓ 5,05 m le mois de janvier 1988
- ✓ 5,08 m au mois de janvier 1996

- ✓ 5,10 m le mois de janvier 2009, sa hauteur vaut.

Elle atteint la valeur maximale de 5,19 m au 470^{ème} mois qui correspond au mois de février 2018. La hauteur minimale est de 4 m qui est observée au 367^{ème} mois correspondant au mois de juillet 2009. Nous pouvons conclure qu'au mois de janvier et février la hauteur de la mer est très élevée et ne cesse de s'accroître jusqu'à atteindre le maximum possible. Ce qu'on appelle MASCARET.

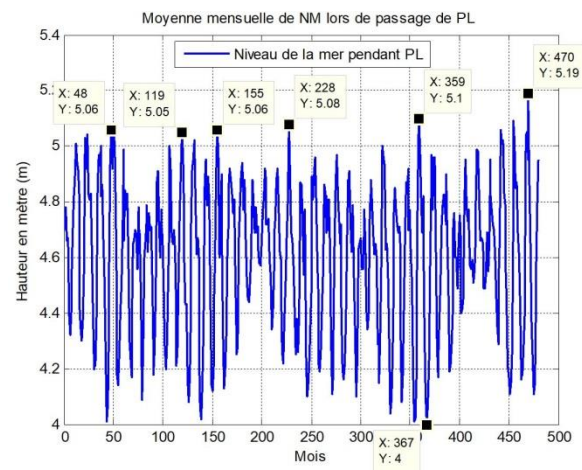


Figure 1 : Evolution mensuelle de hauteur de la mer pendant la pleine Lune durant 1979- 2018

La variation annuelle de la hauteur de marée pendant la pleine Lune durant 1979 jusqu'à 2018 est montré sur la figure 2. Nous observons que la hauteur maximale de la marée vaut 4,72 m qui a eu lieu en 1995 tandis que la valeur minimale est égale à 4,5 m qui correspond l'année 2006. Elle montre également une diminution de la hauteur annuelle de la marée qui est observée à partir de la courbe de tendance de pente négative de -0,001. Nous pouvons conclure que la hauteur de la mer pendant la pleine Lune a connu une diminution de -0,001 par an.

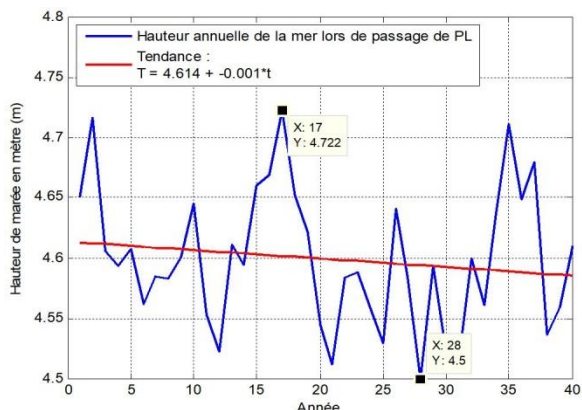


Figure 2 : Courbe et droite de tendance de la hauteur annuelle de marée pendant la pleine Lune en 1979 à 2018

Le résultat obtenu par le test de Pettitt relatif à la hauteur de marée lors de passage de pleine Lune pendant 1979 à 2018 qui est représenté par la courbe en bleu (figure 3). La date de rupture correspond à la valeur maximale du point qui a pour abscisse $x=19$ et ordonné $y=168$. Ce point correspond à l'année 1997.

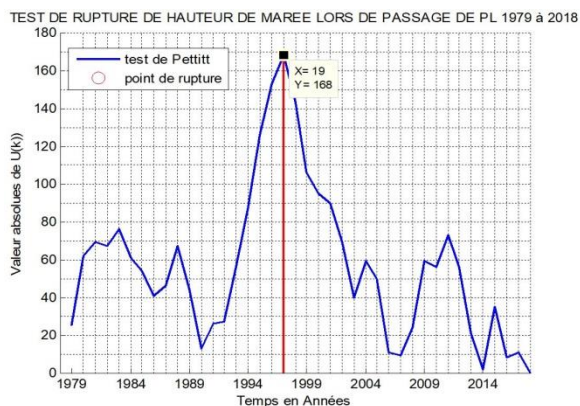


Figure 3 : Représentation de la date de rupture de la hauteur de marée

La variation de la moyenne avant et après la rupture de 1997 est donnée dans le tableau 2. La hauteur moyenne de la mer pendant la pleine Lune avant et après cette date vaut respectivement 4,6019 m et 4,5948 m.

Tableau 2 : Variations des moyennes de la hauteur de la mer pendant la pleine Lune

Donnée	Date de rupture	Moyenne avant la rupture	Moyenne après la rupture
Hauteur de la mer pendant la pleine Lune	1997	4,6019 m	4,5948 m

La figure 4 montre l'évolution simultanée entre la variation mensuelle de la hauteur de la mer pendant la pleine Lune et pendant la nouvelle Lune. La courbe colorée en rouge indique la hauteur mensuelle de la mer pendant la pleine Lune et celle colorée en bleu la hauteur mensuelle de la mer pendant la nouvelle Lune. D'après cette figure, nous constatons que les deux hauteurs de la mer sont en phases et aussi de même translation c'est-à-dire ils sont périodiques.

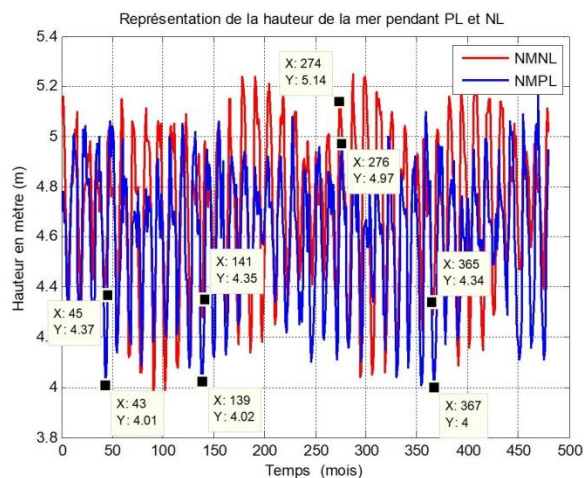


Figure 4 : Evolution simultanée entre la hauteur de la mer pendant la pleine Lune et pendant la nouvelle Lune

La courbe en bleu sur la figure 5 montre la courbe de la fonction d'autocorrélation de la hauteur de marée pendant la pleine Lune. Il est constaté que la courbe décroît sinusoïdalement et

les deux droites parallèles en rouge représentent un intervalle de confiance à 95% où la fonction d'autocorrélation comprise entre cet intervalle est considérée comme nulle. L'effet mémoire est observé à la date de la première intersection de la courbe d'autocorrélation avec la borne supérieure de l'intervalle de confiance qui a pour coordonner $x=7$ et $y=0,08836$. La connaissance de ce point est essentielle pour le modèle de prévision utilisant le réseau de neurone artificielle (RNA) car elle consiste à introduire 6 unités d'entrées pour la prévision par le RNA.

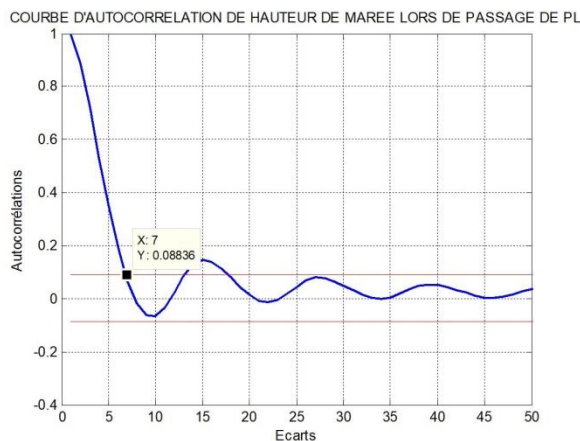


Figure 5 : Fonction d'autocorrélation de la hauteur de la mer pendant le passage de la pleine Lune à partir 1979-2018

La prévision de la future hauteur mensuelle de la mer pendant le passage de la pleine Lune par la méthode de réseau de neurone artificielle qui est représenté par la courbe en bleu tandis que la courbe en rouge est la prévision historique (figure 6). Il a été constaté que les deux courbes sont bien accolées c'est-à-dire qu'ils sont en phase. Les résultats de prévision montrent que la hauteur de la mer pendant le passage de la pleine Lune entre 2018 à 2038 oscille entre 4,15 m à 5,23 m.

La validation du modèle de prévision a été faite en calculant la valeur de MAPE qui est égale à 3,1574% (inférieur à 10%). Ce qui justifie que le modèle obtenu par la méthode de RNA est bien représentatif.

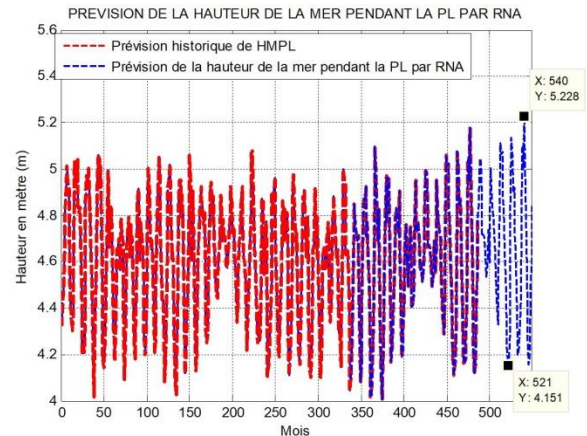


Figure 6 : Prédiction de la hauteur mensuelle de la mer pendant la pleine Lune par la méthode de RNA.

Conclusion

Notre étude concerne la contribution à l'étude de marée à Mahajanga. L'étude est basée sur les données de marées collectées auprès du logiciel marée du monde sur la période de 1979 à 2018. Pour ce faire, les données mensuelles des heures de passage de la pleine Lune, la hauteur de la marée maximale et minimale pendant la pleine Lune ont été étudiées. Des outils mathématiques sont utilisés notamment l'analyse statistique descriptive, la transformée de Fourier rapide, la transformation en ondelette, le test de Pettitt et le réseau de neurone artificiel.

Les résultats nous a montré que (1) La hauteur minimale de la mer à Mahajanga est de 4 m au mois de juillet 2009 tandis que la hauteur maximale est de 5,19 m au mois de février 2018 ;

(2) Nous avons constaté aussi que l'année 1997 est la date de rupture. La hauteur moyenne de la mer pendant la pleine Lune avant et après l'année 1997 vaut respectivement 4,6019 m et 4,5948 m et (3) la prévision à partir du réseau de neurone nous a affirmé que la hauteur de la mer varie autour de 4,15 m à 5,23 m.

Références bibliographiques

- Andriamparany, A.B. (2009). *Contribution à l'étude du gisement éolien – Modélisation du comportement de la vitesse du vent par les Réseaux de Neurones Artificiels*. Université d'Antananarivo, p.43.
- Barthes, L., et M. Girondot (1988). Cours de navigation de l'Ecole Navale, Marine Nationale.
- Fabien, R., (2015). *Modélisation du niveau instantané de la mer en conditions paroxysmales*. Université de Montpellier.
- Guillaume, R. (2012). *La marée*. Université de Bretagne Occidentale ENSTA Bretagne, p.29.
- Nainamahefa, R.A. (2017). *Analyse et prévision des pleines et basses mers par la méthode Census X11 Arima-Garch : Application au cas de Hell-Ville*. Université d'Antananarivo
- Nicolle, A. (2009). Mesure de la salinité de l'eau de mer (Partie 1). Spécialité physique TS. p.1.
- Vania, A. (2006). *Utilisation des données météo et des réseaux de neurones pour la prédiction de la vitesse du vent*. Université de Sofia Bulgarie.