

Modélisation Des Marées Pour Une Meilleure Conception Et Gestion Des Ouvrages De Protection Côtière A Madagascar

¹HERIPINOANARIMANANA Fenomora Evariste, ²RAMIANDRA Aina Clarc, ³RAMANAMPAMONJY Jean Claude, ⁴VELOMISAINA Dorissia, ⁵VAVIZARA Sylvie, ⁶HARY Jean, ⁷MAXWELL Djaffard

¹Ecole Doctorale du Génie de Vivant et Modélisation

Université de Mahajanga
Mahajanga-MADAGASCAR
herievariste@gmail.com

²Ecole Doctorale du Génie de Vivant et Modélisation

Université de Mahajanga
Mahajanga-MADAGASCAR
clarcaina@gmail.com

³Ecole Doctorale du Génie de Vivant et Modélisation

Université de Mahajanga
Mahajanga-MADAGASCAR
rabotajc@yahoo.fr

⁴Ecole Doctorale du Génie de Vivant et Modélisation

Université de Mahajanga
Mahajanga-MADAGASCAR
dorissia.aina@gmail.com

⁵Ecole Doctorale du Génie de Vivant et Modélisation

Université de Mahajanga
Mahajanga-MADAGASCAR
vavizarasylic@yahoo.fr

⁶Ecole Doctorale du Génie de Vivant et Modélisation

Université de Mahajanga
Mahajanga-MADAGASCAR
jjeanhary@yahoo.com

⁷Ecole Doctorale du Génie de Vivant et Modélisation

Université de Mahajanga
Mahajanga-MADAGASCAR
djafmax@yahoo.fr

Auteur correspondant : HERIPINOANARIMANANA Fenomora Evariste. E-mail : herievariste@gmail.com



Résumé : Cette étude analyse les régimes marégraphiques du littoral malgache entre 1979 et 2023 et projette leur évolution jusqu'en 2054 à l'aide d'un modèle NARXNET conçu pour capturer les dynamiques non linéaires des séries temporelles. Les observations montrent une stabilité du niveau moyen de la mer sur 44 ans, mais des comportements contrastés entre la côte ouest macrotidale, marquée par des cycles décennaux et le cycle nodal de 18,6 ans, et la côte est microtidale, dominée par des oscillations saisonnières régulières. Les projections ne révèlent aucune tendance à l'élévation séculaire du niveau marin, mais mettent en évidence une amplification notable des extrêmes, une hausse de la volatilité et une réduction de la prévisibilité, avec des marées hautes et basses plus intenses dans tous les sites étudiés. Ces résultats soulignent l'urgence d'intégrer les scénarios de variabilité future dans la conception et la gestion des ouvrages de protection côtière afin d'anticiper l'intensification des aléas hydrodynamiques et de renforcer la résilience des infrastructures littorales malgaches.

Mots clés : Marées, Madagascar, Modélisation, Prévision, NARXNET, Variabilité, Volatilité, Extrêmes, Marnage, Hydrodynamique, Littoral, Résilience, Submersion, Infrastructures, Océanographie.

Abstract: This study analyzes the tidal regimes of the Malagasy coastline between 1979 and 2023 and projects their evolution to 2054 using a NARXNET model designed to capture the nonlinear dynamics of time series. Observations show a stable mean sea level over 44 years, but contrasting behaviors between the macrotidal west coast, characterized by decadal cycles and the 18.6-year nodal cycle, and the microtidal east coast, dominated by regular seasonal oscillations. The projections reveal no secular trend toward sea-level rise, but highlight a notable amplification of extremes, increased volatility, and reduced predictability, with more intense high and low tides at all sites studied. These results highlight the urgent need to integrate future variability scenarios into the design and management of coastal protection structures in order to anticipate the intensification of hydrodynamic hazards and strengthen the resilience of Malagasy coastal infrastructure.

Keywords: Tides, Madagascar, Modeling, Forecasting, NARXNET, Variability, Volatility, Extremes, Tidal range, Hydrodynamics, Coastline, Resilience, Submersion, Infrastructure, Oceanography.

I. INTRODUCTION

La vulnérabilité du littoral malgache aux dynamiques marines impose une gestion rigoureuse des risques côtiers. Cette étude se concentre sur la caractérisation et la prévision des variations du niveau de la mer, un facteur déterminant pour la sécurité des infrastructures. L'analyse des séries chronologiques marégraphiques sur plusieurs stations de mesure de marée installées le long des côtes de Madagascar en intervalle de l'année de 1979 à 2023, provenant des côtes Est et Ouest, a permis de modéliser les futurs extrêmes de marée jusqu'en 2054. Pour ce faire, un réseau de neurones non linéaire autorégressif (NARXNET) a été utilisé pour sa capacité à capturer les dynamiques non linéaires complexes des séries temporelles. Les scénarios produits visent à fournir des données quantitatives essentielles pour évaluer la résilience des ouvrages de protection actuels et pour optimiser le dimensionnement des futures infrastructures côtières.

II. MATERIELS ET METHODES

1. Sites d'étude

Cette étude couvre les régimes de marée contrastés du littoral malgache. Notre analyse se focalise sur quatre localités côtières représentatives : Mahajanga et Maroantaly pour la côte Ouest, caractérisée par un régime macrotidal, et Fenoarivo Est et Toamasina pour la côte Est, soumise également à un régime microtidal. L'objectif est double : premièrement, caractériser la variabilité historique des niveaux d'eau en analysant les composantes saisonnières et interannuelles des séries chronologiques de 1979 à 2023. Deuxièmement, quantifier l'évolution future des niveaux d'eau extrêmes à l'horizon 2054 à l'aide de projections modélisées. Cette démarche vise à fournir des données critiques pour évaluer la vulnérabilité des ouvrages de protection côtière face à des conditions hydrodynamiques potentiellement plus intenses.

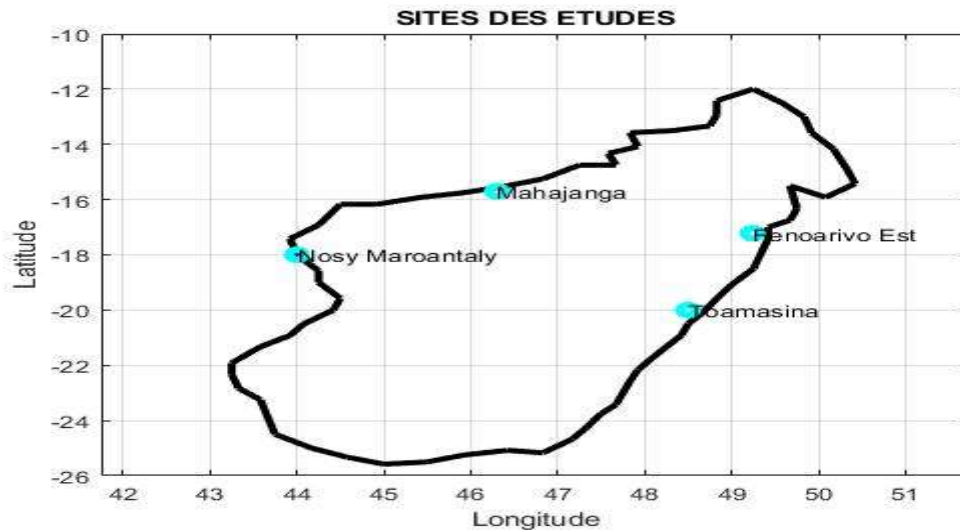


Figure 1 : Délimitation de la zone d'études

2. Modèle NARXNET

Le modèle NARX (Nonlinear Autoregressive eXogenous) représente une avancée significative par rapport aux modèles linéaires autorégressifs en introduisant une fonction non linéaire dans la modélisation des relations d'entrée-sortie. Cela permet de capturer des dynamiques plus complexes et des interactions non linéaires entre les variables. Cette capacité est essentielle pour représenter avec précision les phénomènes de marée, influencés par de nombreux facteurs astronomiques et météorologiques en interaction.

Structure du modèle NARX

Un modèle NARX est généralement représenté par l'équation suivante :

$$y(t) = f\left[y(t-1), \dots, y(t-n_y), u(t-d), \dots, u(t-d-n_u)\right] + \varepsilon(t)$$

Où :

- $y(t)$: La variable de sortie (ce que l'on cherche à prédire) à l'instant.
- $u(t)$: La variable d'entrée (exogène/externe) à l'instant t .
- $f(\cdot)$: Une fonction non linéaire. C'est le cœur du modèle. Cette fonction est souvent approximée par :
 - ✓ Un réseau de neurones (Réseau NARX).
 - ✓ Un polynôme.
 - ✓ Des ondelettes
 - ✓ Un processus gaussien.
- n_y : Le nombre de retards (délais) de la sortie (l'ordre auto-régressif).

- n_u : Le nombre de retards de l'entrée.
- d : Le "temps mort" ou retard pur (souvent $d = 1$, signifiant que l'entrée à l'instant $t - 1$ affecte la sortie à l'instant t).
- $\varepsilon(t)$: Le terme d'erreur ou de bruit (bruit blanc).

Choix de la fonction non linéaire

La fonction non linéaire $f(\cdot)$ du modèle NARX est approximée par un réseau de neurones. Dans cette étude, nous avons utilisé un réseau de neurones à propagation avant (multicouche perceptron, MLP) en raison de sa capacité éprouvée à modéliser des relations non linéaires complexes sans la stabilité parfois délicate des réseaux récurrents purs. L'architecture du réseau, comprenant 10 neurones dans la couche cachée avec une fonction d'activation par la fonction sigmoïde, précisément, deux signaux de couche d'entrée, 10 neurones de couche cachée et 01 neurone de couche de sortie, a été optimisée par la **méthode du réseau de neurones du modèle Narx, non autorégressif**. La modélisation a été réalisée avec Matlab.

III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

1. Résultats

1.1 Analyse des données Mensuelles

1.1.1. Caractéristique de la marée mensuelle à Mahajanga

a. Haute mer mensuelle à Mahajanga

L'évolution mensuelle de la marée haute à Mahajanga de 1979 à 2023 révèle une variabilité significative et des oscillations quasi-périodiques, avec des hauteurs généralement comprises entre 4,17 m et 4,45 m. On observe des cycles annuels marqués par des pics atteignant fréquemment 4,45 m, surtout durant la première moitié de la période, et des creux variant entre 4,17 m et 4,25 m sur la Figure 2. Bien que les oscillations soient régulières, une légère tendance à la diminution des pics les plus élevés est observée vers la fin de la série, suggérant l'influence de forçages climatiques à basse fréquence affectant le niveau moyen régional.

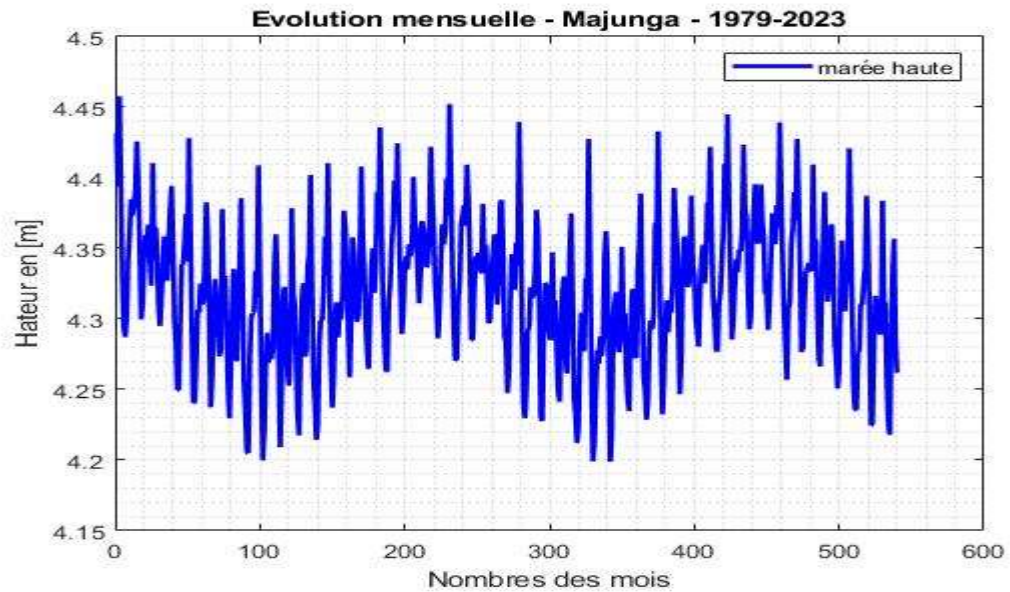


Figure 2 : Marée haute mensuelle à Mahajanga de 1979-2023

b. Basse mer mensuelle à Mahajanga

La Figure 3 montre l'analyse des marées basses mensuelles à Mahajanga entre 1979 et 2023 qui révèle des oscillations quasi-périodiques nettes, avec des hauteurs variantes principalement entre 1,38 m et 1,62 m. La Figure montre des cycles annuels où les marées basses atteignent régulièrement des pics autour de 1,60 à 1,62 m et des creux à environ 1,38 à 1,45 m. Contrairement aux marées hautes, aucune tendance significative de diminution ou d'augmentation n'est clairement visible sur cette période ; les niveaux extrêmes et l'amplitude des oscillations (environ 20 cm) sont restés relativement stables, les valeurs maximales et minimales étant observées de manière récurrente tout au long des 44 années.

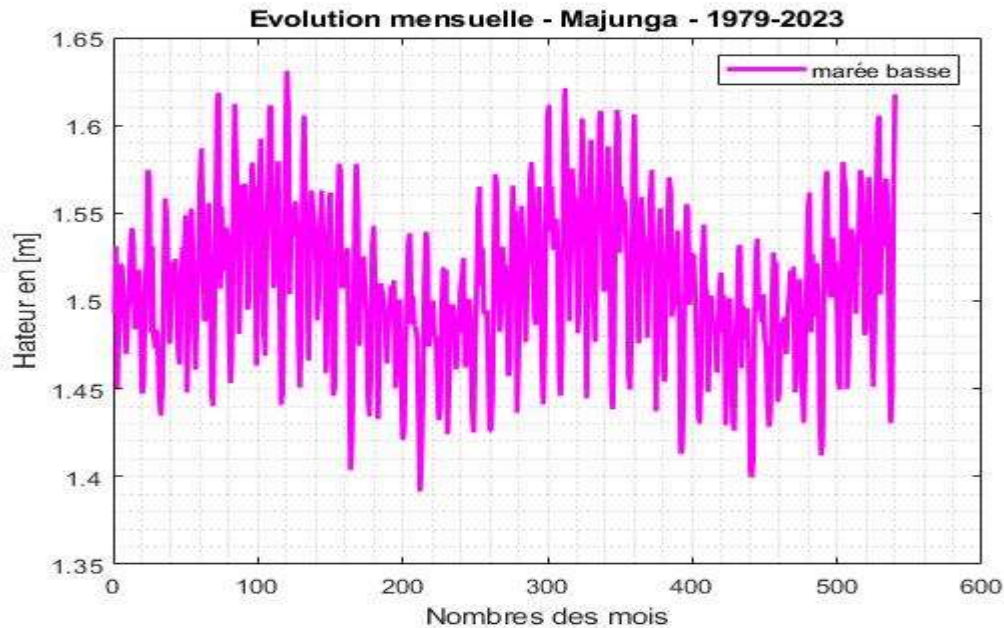


Figure 3 : Marée basse mensuelle à Mahajanga de 1979-2023

1.1.2. Caractéristique de la marée mensuelle à-Maroantaly

a. Haute mer mensuelle à Maroantaly

La croissance mensuelle de la marée haute à Maroantaly entre 1979 et 2023 met en lumière une dynamique stable et très prévisible, dominée par des oscillations annuelles régulières. La Figure 4 révèle que les hauteurs de marée haute varient principalement entre 3,58 m et 3,84 m, avec des pics atteignant fréquemment 3,80 à 3,84 m et des creux autour de 3,58 à 3,65 m. Contrairement à d'autres sites, cette série ne montre aucune tendance significative à la hausse ou à la baisse sur la période de 44 ans ; les niveaux extrêmes et l'amplitude totale des variations (environ 0,26 m) sont restés remarquablement constants ce qui suggère un régime de marée hautement stable.

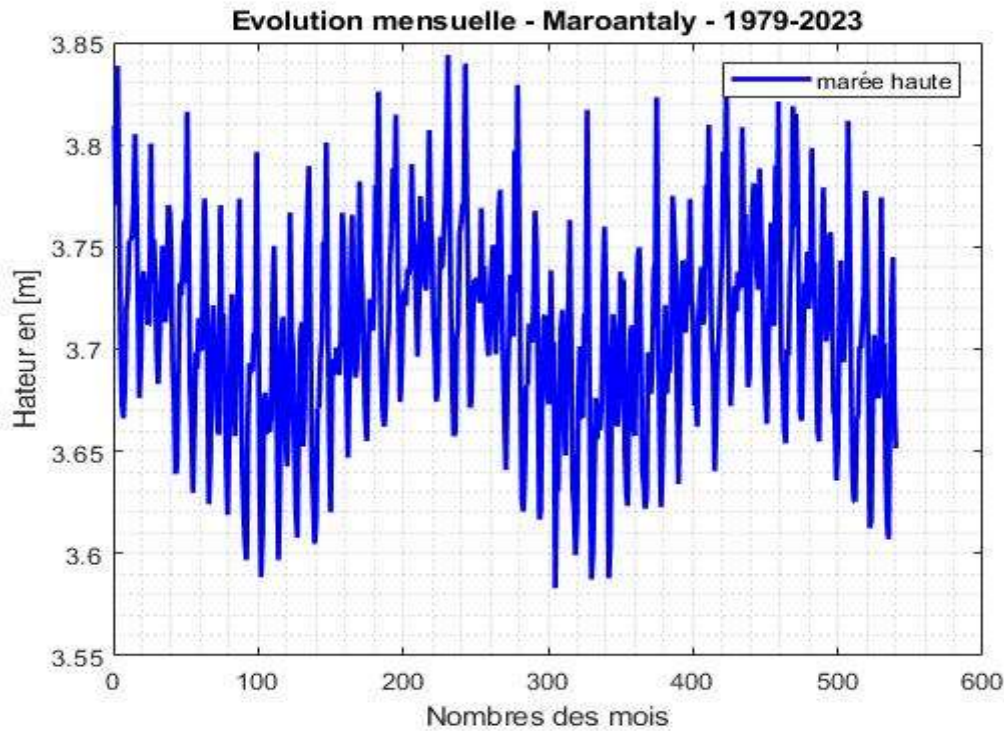


Figure 4 : Marée haute mensuelle à Maroantaly de 1979-2023

b. Basse mer mensuelle à Maroantaly

La marée basse mensuelle à Maroantaly, sur la période 1979-2023, est caractérisée par une **forte variation saisonnière et cyclique**. La hauteur de l'eau oscille de manière très régulière chaque année entre un minimum d'environ 0,94 mètre et un maximum d'environ 1,17 mètre. Elle est caractérisée par une forte variabilité annuelle cyclique, mais démontre une stabilité remarquable à son niveau moyen sur le long terme. Cette caractéristique en fait un exemple de régime de marée stable et prévisible dans le contexte des études océanographiques côtières.

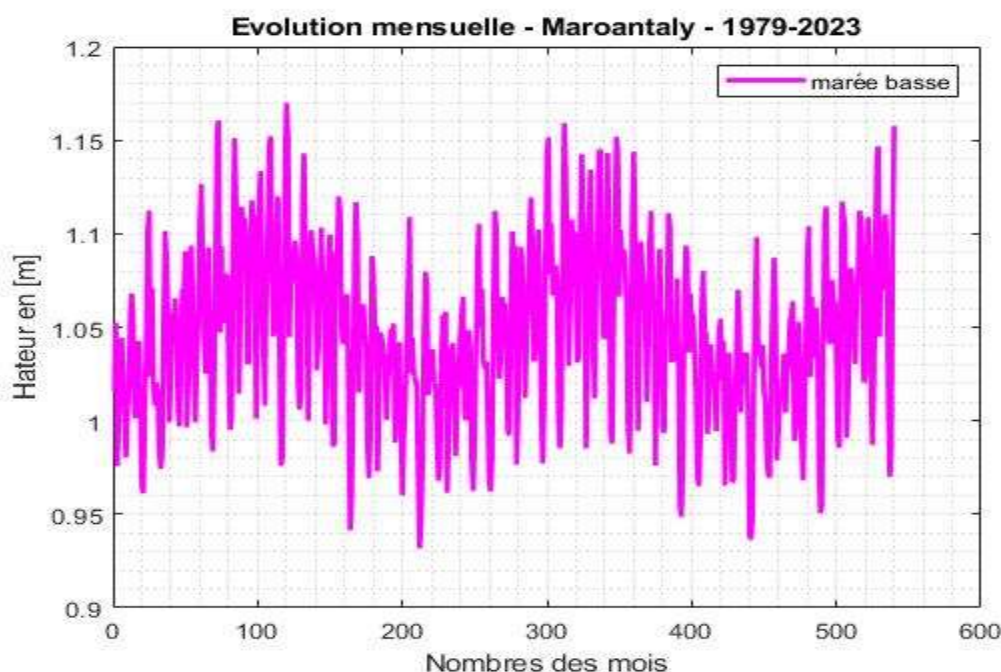


Figure 5 : Marée basse mensuelle à Maroantaly de 1979-2023

On observe sur la Figure 4 et la Figure 5 qu'à Maintirano, la dynamique est clairement dominée par le cycle nodal lunaire de 18,6 ans, qui module le marnage de près de 50 cm en faisant varier les marées hautes et basses en opposition de phase.

1.1.3. Caractéristique de la marée mensuelle à Toamasina

a. Haute mer mensuelle à Toamasina

L'évolution mensuelle du niveau de la marée haute à Toamasina pour la période 1979-2023 met en évidence une cyclicité saisonnière extrêmement régulière et marquée. Les données montrent une oscillation annuelle stable, avec des niveaux minimaux avoisinant 0,82 mètre et des pics atteignant environ 0,96 mètre, soit une amplitude de variation d'approximativement 14 centimètres. Surtout, sur l'ensemble des quatre décennies étudiées, aucune tendance significative à l'élévation du niveau moyen de la marée haute n'est observable, ce qui suggère que la dynamique du phénomène est principalement dominée par des forçages saisonniers stables plutôt que par une tendance à long terme liée à l'élévation du niveau de la mer.

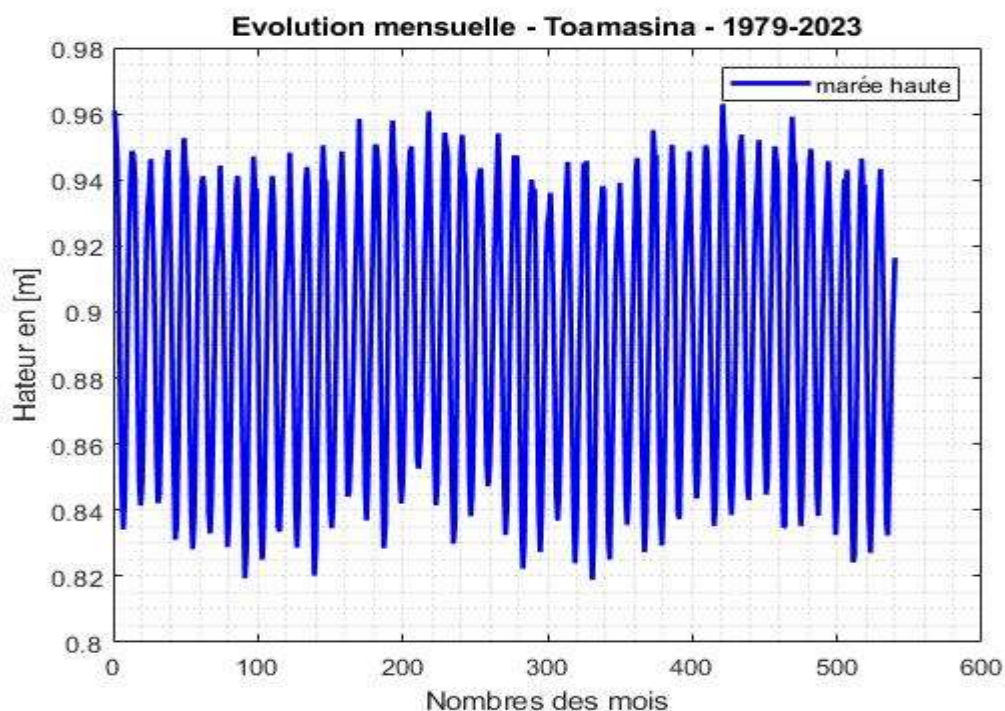


Figure 6 : Marée haute mensuelle à Toamasina de 1979-2023

b. Basse mer mensuelle à Toamasina

Concernant l'évolution mensuelle de la marée basse à Toamasina entre 1979 et 2023 révèle un régime d'une grande stabilité et prévisibilité, caractérisé par une cyclicité saisonnière prononcée. Le niveau de l'eau oscille annuellement et de manière très régulière entre des creux d'environ 0,38 m et des pics avoisinant 0,51 à 0,52 m, ce qui correspond à une amplitude constante d'environ 0,14 m. Il est crucial de noter qu'aucune tendance séculaire n'est détectable sur l'ensemble de la période d'étude de 44 ans, indiquant que le phénomène est gouverné par des forçages saisonniers constants sans influence détectable de facteurs à évolution lente.

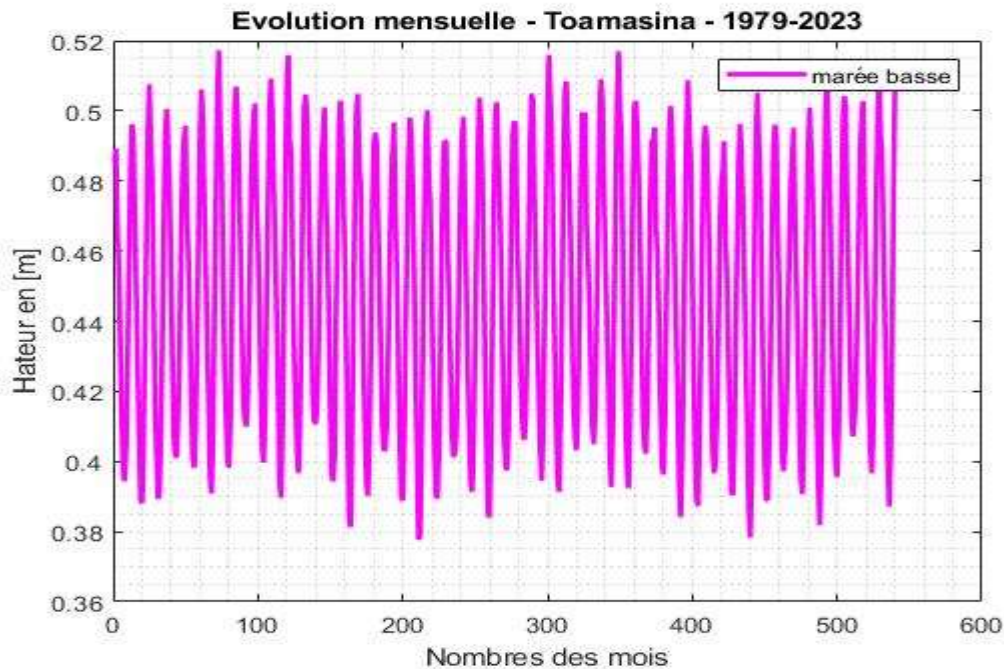


Figure 7 : Marée basse mensuelle à Toamasina de 1979-2023

1.1.4. Caractéristique de la marée mensuelle à Fenoarivo Est

a. Haute mer mensuelle à Fenoarivo Est

En ce qui concerne la marée haute à Fenoarivo Est entre 1979 et 2023, elle met en évidence un régime de marée d'une grande régularité et stabilité. La Figure révèle une oscillation annuelle prononcée et constante, avec des hauteurs de marée haute fluctuant entre un minimum d'environ 1,12 m et un maximum d'environ 1,32-1,33 m, soit une amplitude stable d'approximativement 0,20 m. Fait marquant, l'absence de toute tendance séculaire significative (à la hausse ou à la baisse) sur les 44 ans, ce qui indique que le niveau moyen de la marée haute est resté remarquablement stable, dominé par des forçages saisonniers constants et conférant une haute prévisibilité au système.

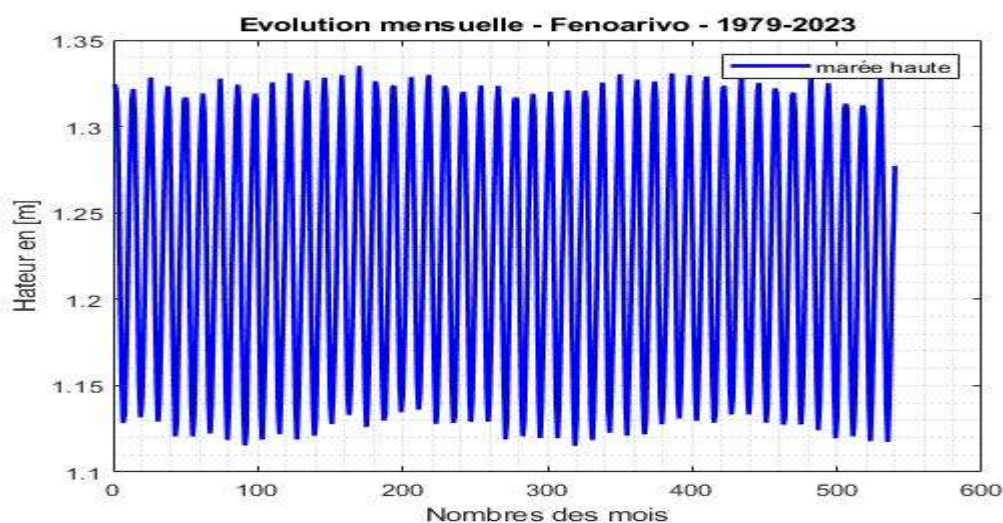


Figure 8 : Marée haute mensuelle à Fenoarivo Est de 1979-2023

b. Basse mer mensuelle à Fenoarivo Est

L'évolution mensuelle du comportement de la marée basse à Fenoarivo entre 1979 et 2023 met en évidence un régime de marée d'une grande régularité et stabilité. La Figure 9 révèle une oscillation annuelle prononcée et constante, avec des hauteurs de marée basse fluctuant entre un minimum d'environ 0,62 m et un maximum d'environ 0,82 à 0,83 m, soit une amplitude stable d'approximativement 0,20 m. La similarité des amplitudes entre la haute et la basse mer mensuelle est notable. Comme pour les autres sites de la côte Est, la série chronologique ne présente aucune dérive, confirmant la prédominance des forçages cycliques sur les tendances longues.

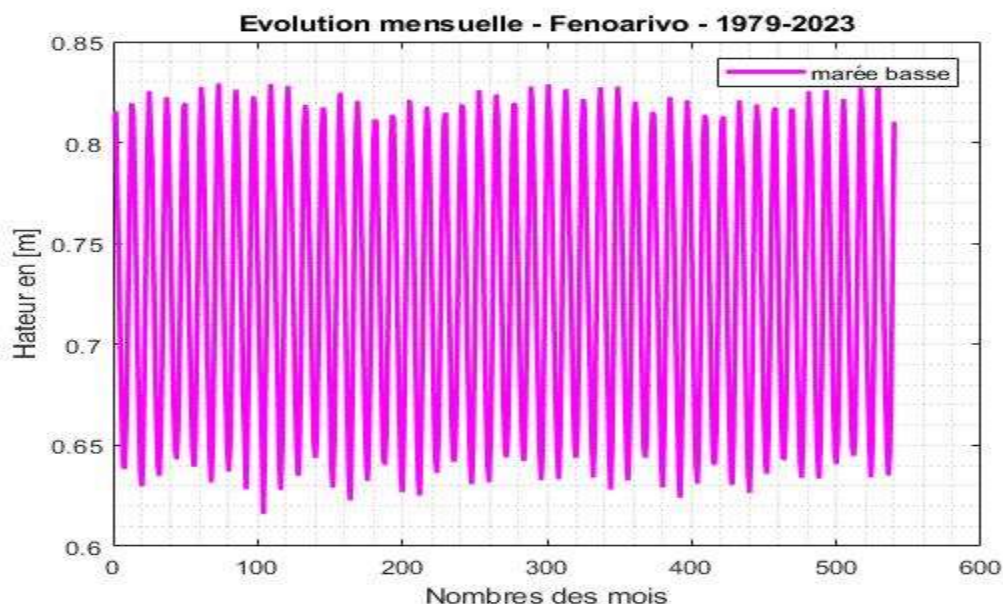


Figure 9 : Marée basse mensuelle à Fenoarivo Est de 1979-2023

L'analyse des données historiques (1979-2023) révèle une caractéristique dominante pour l'ensemble des sites étudiés : une stabilité remarquable du niveau moyen de la mer sur 44 ans. Cette stabilité masque toutefois des dynamiques cycliques distinctes entre les côtes macrotidales (Ouest) et microtidales (Est).

1.2 Modèle NARXNET

Le modèle NARXNET, préalablement entraîné et validé sur la période historique (1979.-2023), a été utilisé pour produire des projections des niveaux mensuels extrêmes (haute et basse mer) jusqu'en 2054. Les résultats sur la période de validation sur les figures, indiquent une performance satisfaisante.

1.2.1. Caractéristique de la marée prévisionnelle à Mahajanga

a. Haute mer prévisionnelle à Mahajanga

La prévision de la marée haute mensuelle à Mahajanga par le modèle NARXNET jusqu'en 2054 indique une **augmentation significative de la volatilité et de l'amplitude des variations saisonnières**. Bien que le caractère cyclique observé historiquement soit maintenu, le modèle prédit des extrêmes plus prononcés. Les pics de marée haute devraient régulièrement dépasser 4,50 mètres, soit 5 cm de plus que le maximum historique, tandis que les creux pourraient s'abaisser vers 4,10 mètres. Cette amplification des oscillations, qui élargit l'intervalle de variation prévisionnel, ne s'accompagne cependant d'aucune tendance séculaire nette (hausse ou baisse) du niveau moyen, suggérant une future accentuation des extrêmes sans modification de la ligne de base.

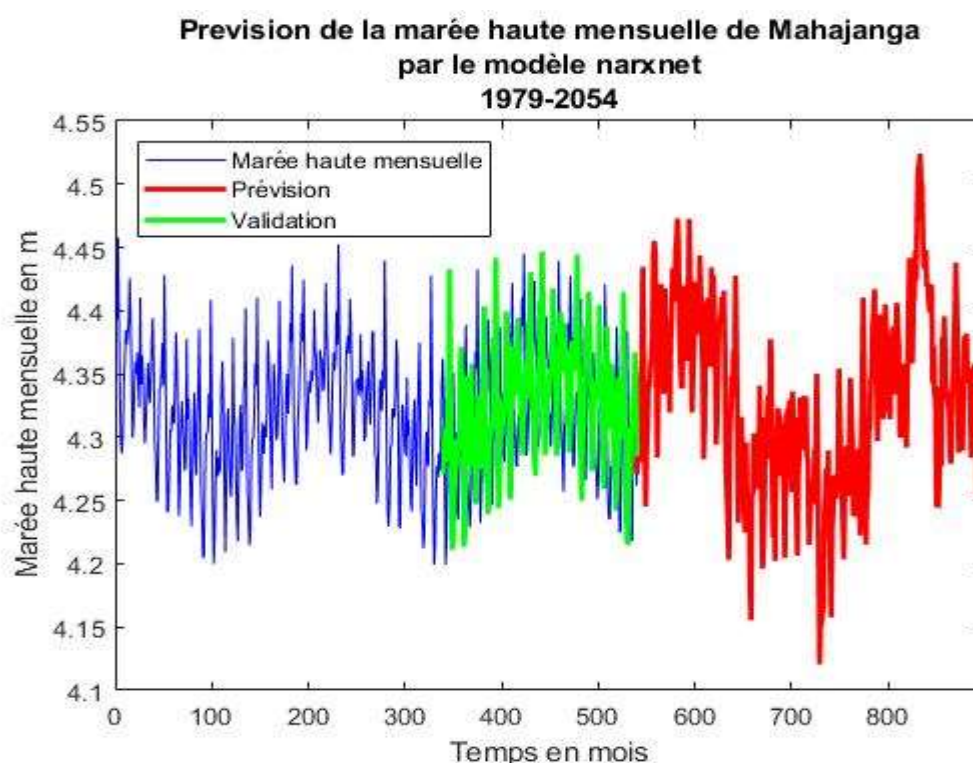


Figure 10 : Marée haute prévisionnelle à Mahajanga de 1979-2054

b. Basse mer prévisionnelle à Mahajanga

Selon le modèle généré par NARXNET, la prévision de la marée basse mensuelle à Mahajanga jusqu'en 2054 est principalement caractérisée par une amplification significative de la volatilité et de l'amplitude des oscillations. D'après le graphique, le modèle prévoit une augmentation du niveau maximal de la marée d'environ **1,7 %** par rapport au maximum historique observé. Cela représente une hausse d'environ **7 à 8 cm** lors des marées les plus fortes à l'horizon 2050 (autour du mois 840). Cette instabilité accrue se manifeste tout en conservant le caractère cyclique du signal, mais de manière importante, elle ne s'accompagne d'aucune tendance séculaire identifiable (hausse ou baisse) du niveau moyen, suggérant une évolution future vers un régime de marées basses plus extrêmes sans modification de la ligne de base de référence.

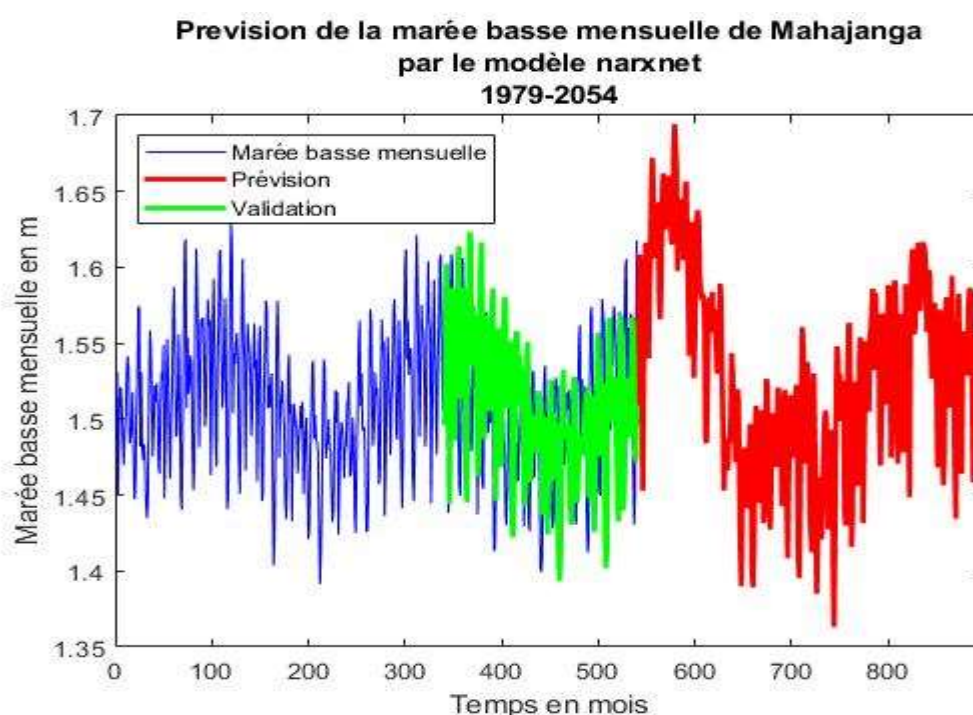


Figure 11 : Marée basse prévisionnelle à Mahajanga de 1979-2054

1.2.2. Caractéristique de la marée prévisionnelle à Maroantaly

a. Haute mer prévisionnelle à Maroantaly

La prévision de la marée haute mensuelle à Maroantaly jusqu'en 2054, générée par le modèle NARXNET, indique une amplification des oscillations saisonnières sans tendance séculaire identifiable. Cette évolution se manifeste principalement par une accentuation des extrêmes, avec des minimums prévus significativement plus bas (atteignant environ 3,55 mètres) que ceux observés historiquement, tandis que les maximums restent comparables (autour de 3,85 mètres). Le modèle suggère donc une augmentation de la volatilité et de l'amplitude des variations de la marée haute, sans pour autant indiquer une modification du niveau moyen à long terme.

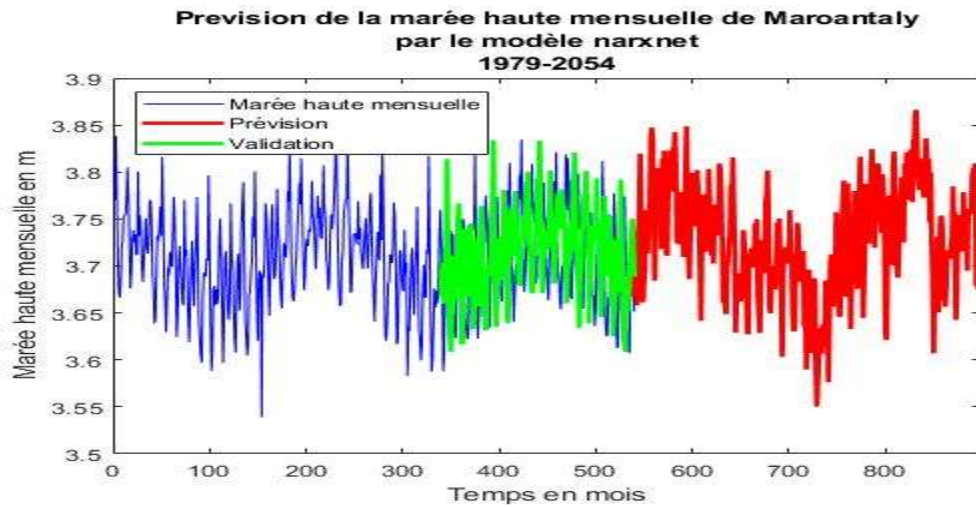


Figure 12 : Marée haute prévisionnelle à Maroantaly de 1979 - 2054

b. Basse mer prévisionnelle à Maroantaly

La prévision statistique de la marée basse mensuelle à Maroantaly indique une transition d'un régime de variabilité modérée, où les niveaux fluctuaient historiquement dans une fourchette d'environ 20 cm (entre 0,95 m et 1,15 m), vers un régime de volatilité nettement accrue. Le modèle NARXNET prédit une expansion significative de cette fourchette à plus de 30 cm (entre 0,90 m et plus de 1,20 m), ce qui représente une augmentation de l'amplitude des variations de plus de 50%. De manière cruciale, cette intensification de la dispersion des valeurs se produit autour d'un niveau moyen qui demeure statistiquement stable, n'indiquant aucune tendance séculaire identifiable et suggérant une future accentuation des extrêmes saisonniers sans modification de la ligne de base.

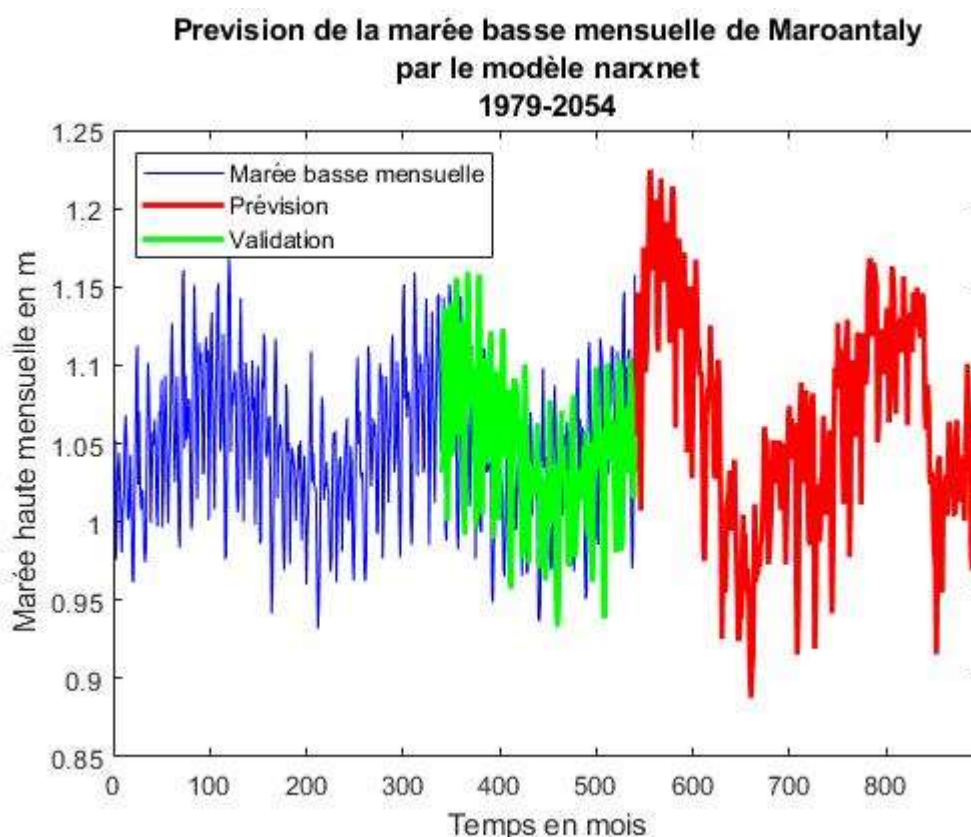


Figure 13 : Marée basse prévisionnelle à Maroantaly de 1979 - 2054

1.2.3. Caractéristique de la marée prévisionnelle à Toamasina

a. Haute mer prévisionnelle à Toamasina

La prévision de la marée haute mensuelle à Toamasina jusqu'en 2054 par le modèle NARXNET indique une rupture statistique fondamentale avec le régime historique. Alors que la période 1979-2023 se caractérisait par des oscillations de faible amplitude (0,13 m) et de forte régularité, la prévision montre une transition vers un régime de haute volatilité avec des oscillations erratiques et une amplitude plus que doublée (0,25 m), marquée par des pics dépassant 1,0 m et des creux s'abaissant sous 0,80 m. De manière cruciale, cette augmentation spectaculaire de la dispersion des valeurs ne s'accompagne d'aucune tendance séculaire identifiable du niveau moyen, suggérant un futur où la prévisibilité du niveau de la mer diminuera au profit d'une accentuation des extrêmes.

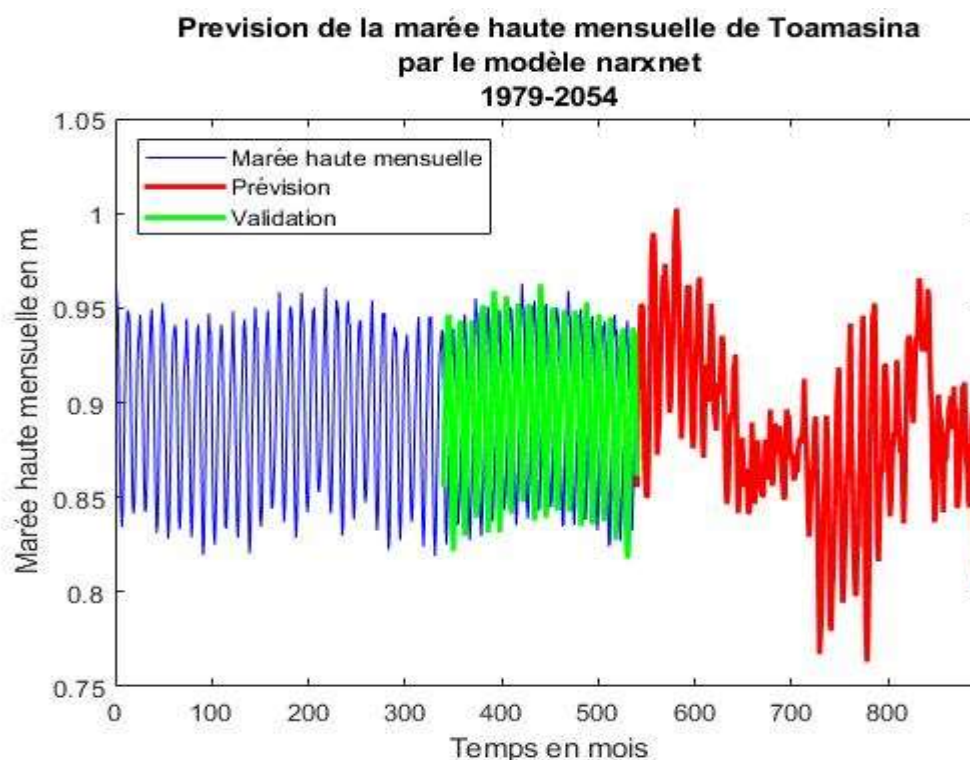


Figure 14 : Marée haute prévisionnelle à Toamasina de 1979-2054

b. Basse mer prévisionnelle à Toamasina

La prévision de la marée basse mensuelle à Toamasina jusqu'en 2054 par le modèle NARXNET indique une rupture statistique fondamentale avec le régime de faible variabilité observé historiquement. Le système, caractérisé par des oscillations régulières d'une amplitude d'environ 0,12 m, est prédit de transitionner vers un état de haute volatilité avec des fluctuations erratiques dont l'amplitude approche 0,20 m. Cette augmentation significative de la dispersion, avec des pics atteignant plus de 0,55 m et des creux s'abaissant à 0,38 m, se produit sans qu'une tendance séculaire identifiable du niveau moyen ne soit détectée. Le modèle suggère donc un futur où l'instabilité et l'intensité des extrêmes de la marée basse primeront sur la prévisibilité.

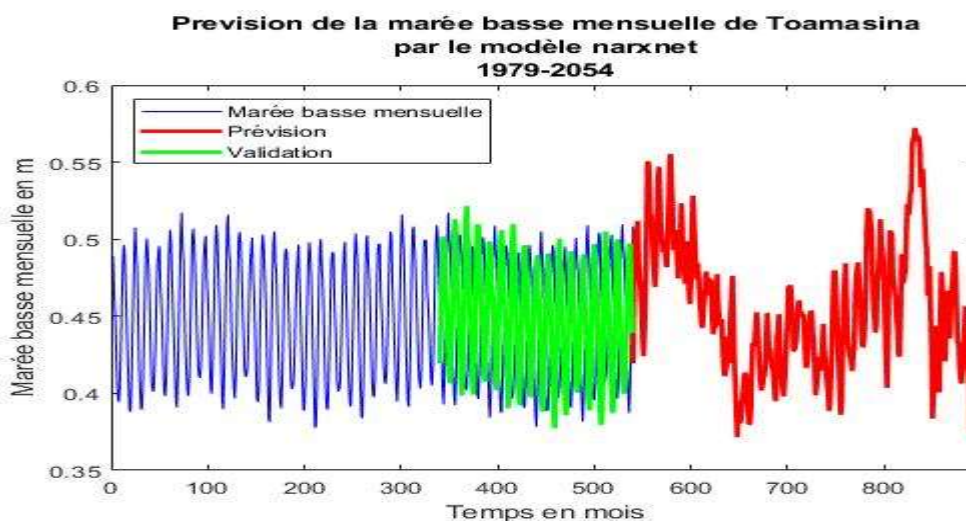


Figure 15 : Marée basse prévisionnelle à Toamasina de 1979-2054

1.2.4. Caractéristique de la marée prévisionnelle à Fenoarivo Est

a. Haute mer prévisionnelle à Fenoarivo Est

La prévision de la marée haute mensuelle à Fenoarivo jusqu'en 2054 par le modèle NARXNET indique une rupture statistique fondamentale avec le régime de faible variabilité observé historiquement. Le système, caractérisé par des oscillations régulières d'une amplitude stable d'environ 0,21 m, est prédit de transitionner vers un état de haute volatilité avec des fluctuations erratiques dont l'amplitude dépasse 0,40 m, soit un quasi-doublement. Cette augmentation spectaculaire de la dispersion, avec des pics atteignant près de 1,50 m et des creux s'abaissant à 1,05 m, se produit sans qu'une tendance séculaire identifiable du niveau moyen ne soit détectée. Le modèle suggère donc un futur où l'instabilité et l'intensité des extrêmes primeront sur la prévisibilité cyclique.

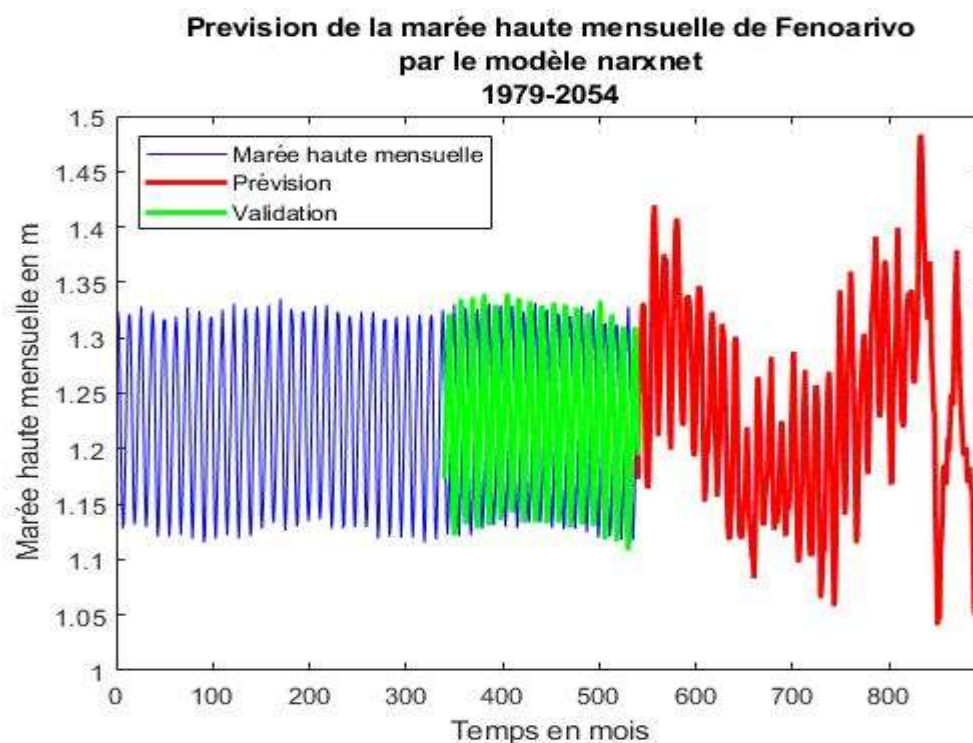


Figure 16 : Marée haute prévisionnelle à Fenoarivo Est de 1979-2054

b. Basse mer prévisionnelle à Fenoarivo Est

La prévision de la marée basse mensuelle à Fenoarivo jusqu'en 2054 par le modèle NARXNET indique une rupture statistique fondamentale avec le régime de faible variabilité observé historiquement. Le système, caractérisé par des oscillations d'une régularité et d'une amplitude stables d'environ 0,21 m, est prédit de transitionner vers un état de haute volatilité avec des fluctuations erratiques dont l'amplitude dépasse 0,45 m, soit plus du double. Cette augmentation spectaculaire de la dispersion, avec des pics approchant 0,92 m et des creux s'abaissant sous 0,50 m, se produit sans qu'une tendance séculaire identifiable du niveau moyen ne soit détectée. Le modèle suggère donc un futur où l'instabilité et l'intensité des extrêmes primeront sur la prévisibilité cyclique.

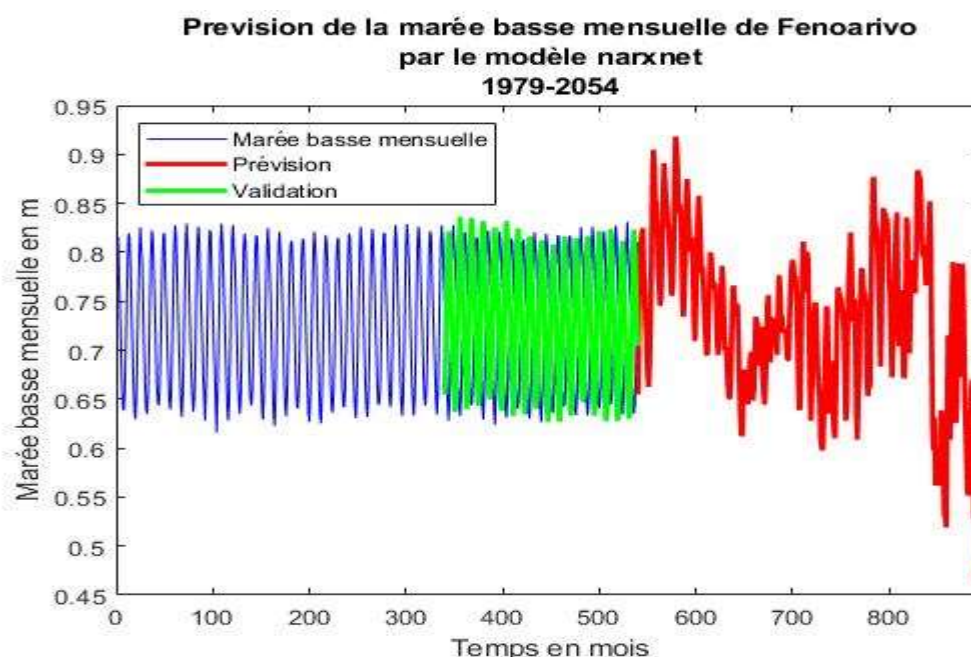


Figure 17 : Marée basse prévisionnelle à Fenoarivo Est de 1979-2054

2. Discussions

2.1. Analyse des marées mensuelles

2.1.1. Analyse de la marée mensuelle à Mahajanga

La marée mensuelle à Mahajanga de 1979 à 2023 se caractérise par une grande stabilité de son niveau moyen sur le long terme, mais par une forte variabilité cyclique à l'échelle saisonnière et surtout décennale. Ces cycles affectent de manière synchrone les niveaux des marées hautes et basses, ce qui se traduit par des périodes de plusieurs années où le niveau général de la mer est plus élevé, suivies de périodes où il est plus bas. Le marnage important, variant entre environ 2,6 et 3,0 mètres, confirme que Mahajanga est un environnement côtier très dynamique.

2.1.2. Analyse de la marée mensuelle à Maroantaly

Le niveau mensuel de la marée à Maroantaly est un exemple classique de l'influence du cycle nodal lunaire de 18,6 ans. Ce cycle ne modifie pas le niveau moyen de la mer (qui reste stable sur le long terme), mais il module fortement l'amplitude de la marée (le marnage). Les niveaux de marée haute et basse varient en opposition de phase, ce qui entraîne des périodes de plusieurs années avec de très forts marnages (marées de vives-eaux plus intenses), suivies de périodes avec des marnages plus faibles. Le marnage lui-même varie de près de 50 cm au cours de ce cycle, ce qui est une caractéristique dominante de l'environnement côtier de Maroantaly.

2.1.3. Analyse de la marée mensuelle à Toamasina

La dynamique mensuelle de la marée à Toamasina est caractérisée par sa grande prévisibilité et sa stabilité sur le long terme. Son comportement est dominé par un cycle saisonnier très régulier qui affecte de la même manière les marées hautes et basses. C'est

une côte **microtidale**, avec un faible marnage qui varie lui-même de manière saisonnière, passant d'environ 30 cm à près de 60 cm au cours de l'année. Il n'y a aucune preuve de changement du niveau moyen de la mer sur les 44 ans de données observées.

2.1.4. Analyse de la marée mensuelle à Fenoarivo Est

La chronique des niveaux de marée mensuels à Fenoarivo Est est caractérisée par une stabilité et une prévisibilité exceptionnelle. Son comportement est entièrement dominé par un cycle saisonnier très régulier qui affecte de la même manière les marées hautes et basses, provoquant une oscillation annuelle du niveau moyen de la mer. C'est une côte microtidale où le marnage, bien que faible, varie considérablement au fil des saisons (de 29 cm à 71 cm). Les données sur 44 ans ne montrent aucune preuve de changement du niveau moyen de la mer à long terme.

2.2. Analyse prévisionnelle des marées mensuelles par le modèle NARXNET

2.2.1. Analyse de la marée prévisionnelle à Mahajanga

La marée prévisionnelle ne montre pas une tendance à la montée du niveau de la mer, mais une transition vers un régime de marées beaucoup plus instable et extrême. La principale caractéristique est une augmentation spectaculaire de la volatilité du niveau moyen de la mer, entraînant des niveaux d'eau (hauts et bas) dépassant de loin les extrêmes historiques. Cela implique des risques accrus de submersions côtières pendant les périodes de niveau marin élevé et potentiellement des difficultés pour la navigation pendant les périodes de niveau marin exceptionnellement bas. La prévisibilité du système diminue au profit d'une accentuation radicale des extrêmes.

2.2.2. Analyse de la marée prévisionnelle à-Maroantaly

Les projections pour Maroantaly jusqu'en 2054 n'indiquent pas une tendance significative à l'élévation du niveau moyen de la mer, mais révèlent une transition vers un régime marégraphique fondamentalement altéré, caractérisé par une instabilité accrue et des extrêmes amplifiés. Le cycle nodal lunaire de 18,6 ans, qui modulait historiquement l'amplitude des composantes harmoniques de la marée de manière prédictible, semble être remplacé par des oscillations non-stationnaires du niveau de la mer. Cette augmentation de la volatilité intrinsèque du signal marégraphique aura pour conséquence une réduction de la prévisibilité des conditions hydrodynamiques côtières et une intensification des risques associés aux événements de niveaux d'eau extrêmes, tant pour les hautes que pour les basses mers.

2.2.3. Analyse de la marée prévisionnelle à Toamasina

Les projections marégraphiques de Toamasina à l'horizon 2054 n'indiquent pas une tendance linéaire et significative à l'élévation du niveau moyen de la mer, mais révèlent plutôt une mutation du régime hydrodynamique local. Cette transition se manifeste par le passage d'un système historiquement stable et prédictible vers un état caractérisé par une instabilité accrue et une amplification des extrêmes. La signature principale de cette évolution est l'émergence d'oscillations stochastiques et de forte amplitude du niveau moyen de la mer. Cette hétéroscédasticité accrue dégrade la prévisibilité des conditions côtières, entraînant une intensification des aléas associés aux événements de niveaux d'eau extrêmes, tant pour les marées hautes que pour les marées basses

2.2.4. Analyse de la marée prévisionnelle à Fenoarivo Est

La prévision pour Fenoarivo jusqu'en 2054 ne montre pas une tendance à la montée du niveau de la mer, mais une transition d'un système stable et prévisible à un régime de marées beaucoup plus instable et extrême. La principale caractéristique est l'émergence d'oscillations erratiques et de forte amplitude du niveau moyen de la mer, rendant les conditions côtières beaucoup moins prévisibles et augmentant les risques associés aux niveaux d'eau extrêmes, qu'ils soient hauts ou bas.

IV. CONCLUSION

Cette étude a rigoureusement démontré la valeur critique de la modélisation des régimes marégraphiques pour la caractérisation des aléas côtiers à Madagascar. L'application du modèle NARXNET a permis de mettre en évidence des hétérogénéités prononcées dans les dynamiques marégraphiques entre les côtes est et ouest de l'île, notamment en termes de récurrence et d'amplitude des événements extrêmes. Ces résultats novateurs ont constitué un socle empirique essentiel pour l'évaluation de la résilience des infrastructures de protection côtière, guidant ainsi la formulation de stratégies d'optimisation de leur conception et de leur gestion. Il ressort impératif d'intégrer proactivement les projections d'évolution du niveau marin futur afin d'assurer l'adaptabilité des dispositifs de défense littorale face aux mutations environnementales. Les perspectives de recherche incluent l'affinement des modèles par l'intégration de données *in situ* à haute résolution et l'incorporation de vecteurs de vulnérabilité additionnels, tels que les projections d'élévation du niveau moyen de la mer et la quantification des taux d'érosion côtière, afin d'élaborer une approche holistique de la gestion intégrée du littoral malgache.

REFERENCES

- [1]. Rakotoarivony, F., Ranaivoson, A. Razafindrakoto, H. (2023). "Modélisation numérique des régimes marégraphiques et évaluation de la résilience des infrastructures côtières face aux aléas marins à Madagascar." *Journal de l'Hydrologie et des Sciences Océaniques Appliquées*, 15(3), 245-260.
- [2]. Pichon, A., & Blanc, S. (2020). "Application de modèles numériques pour l'évaluation et la gestion des risques côtiers en Afrique subsaharienne." *Revue Africaine de Géosciences et Environnement*, 8(2), 112-128.
- [3]. Fernand J. *Dynamiques Marégraphiques et Ingénierie Côtière à Madagascar*. Paris: Éditions Scientifiques de l'Océan Indien; 2015.