

Étude Et Modélisation De L'érosion Et De La Sédimentation De La Plage D'Amborovy Majunga

Erosion And Sedimentation Modeling Of Amborovy Majunga Beach

RANDRIANAIVO Jean Elie¹, LALAOHARISOA Sahoby², RAJAONARISOA Harimino Andriamalala³, RAKOTOARISON Solohery Hajanirina⁴, RATIARISON Adolphe Andriamanga⁵

^{1,2,3,4,5}Laboratoire Dynamique de l'Atmosphère, du Climat et des Océans (DyACO), Université d'Antananarivo Madagascar, B.P 906.

¹randrianaivoeliejean@gmail.com, ²sahoby81@gmail.com, ³hariminondriamalala@gmail.com, ⁴solohery77@gmail.com, ⁵adolphe.ratiarison@univ-antananarivo.mg



Résumé – Ce travail a pour objectif d'analyser la dynamique des sédiments et l'évolution morpho-sédimentaire de la plage d'Amborovy sous l'influence des facteurs hydrodynamiques. Nous avons utilisé le modèle numérique MIKE 21 (modules SW, HD et ST). Les résultats ont montré que la houle de Nord-Ouest favorise le transport des sables vers les deux extrémités Nord et Sud de cette zone. L'analyse de l'évolution bathymétrique révèle une morphologie complexe, avec une zone centrale érodée et des zones latérales caractérisées par la présence de bancs de sable. Les résultats de modélisation affirment la pertinence de notre modèle, caractérisé par des coefficients de corrélation R élevés, des erreurs quadratiques moyennes (RMSE) faibles et une excellente adéquation entre les données observées et les valeurs prédites.

Mots clés – Bancs des sables, Érosion, Dépôt, Dynamique sédimentaire, Plage d'Amborovy

Abstract – The objective of this study is to analyze the sediment dynamics and morpho-sedimentary evolution of Amborovy beach under the influence of hydrodynamic factors. We used the numerical model MIKE 21 (modules SW, HD, and ST). The results showed that the Northwest swell favors the transport of sand towards both the Northern and Southern ends of the area. The analysis of the bathymetric evolution reveals a complex morphology, with an eroded central zone and lateral areas characterized by the presence of sandbanks. The modeling results confirm the relevance of our model, characterized by high correlation coefficients (R), low root mean square errors (RMSE), and excellent agreement between observed data and predicted values.

Keywords – Sandbanks, Erosion, deposition, Sediment dynamics, Amborovy beach.

I. INTRODUCTION

Les plages de sable estuariennes sont des systèmes côtiers complexes soumis à des forces hydrodynamiques variées (vagues, courants, marées) [1]. Ces forces induisent un transport sédimentaire actif, responsable de la formation de reliefs sous-marins tels que les bancs de sable [2], [3]. Cette étude porte sur la plage d'Amborovy Majunga, où nous avons cherché à comprendre les mécanismes à l'origine de l'évolution morphologique de la plage. A travers des simulations numériques réalisées avec le logiciel MIKE 21, nous avons quantifié l'impact des vagues et des courants sur le transport sédimentaire. Les résultats, visualisés sous forme de cartes, ont été analysés statistiquement (moyennes journalières et mensuelles). Une approche méthodologique, basée sur un système d'inférence neuro-flou adaptatif (ANFIS), a été explorée pour établir des relations entre les paramètres d'entrée et sortie.

II. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1 Présentation de la zone d'étude

Notre étude porte sur la partie de la côte ouest de Madagascar illustrée par la figure 1, plus précisément entre les longitudes 46,28°E-46,3386°E et les latitudes 15,708°S- 15,65°S

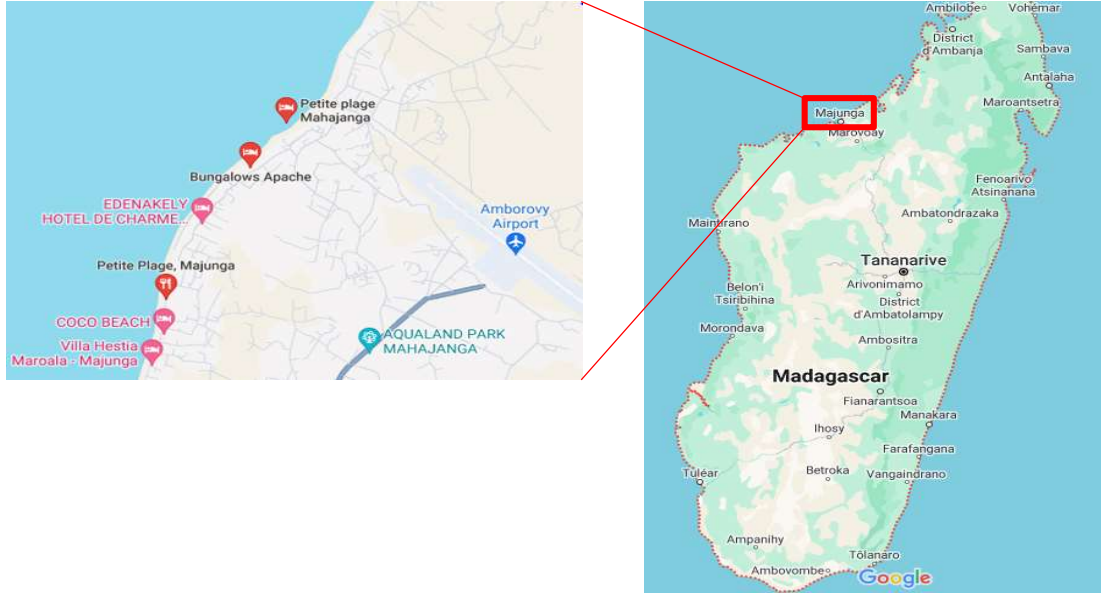


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude

2.2 Méthodologie

Le logiciel MIKE 21, intégrant des modules SW, HD et ST [4], est utilisé pour simuler la dynamique des sables dans notre zone. Le modèle SW, basé sur l'équation de conservation de l'action des vagues [5] [6] (équation (1)), permet de reproduire la propagation de la houle depuis le large vers la côte de cette zone.

L'équation de conservation de l'action des vagues [7] s'écrit :

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v} N) = \frac{S}{\sigma} \quad (1)$$

Où N est la densité de l'action de la vague $N(\vec{x}, \sigma, \theta, t)$ avec $\vec{x} = (x, y)$, la direction d'onde θ ; la fréquence angulaire relative σ et le temps t ; $\vec{v}$ est le vecteur de vitesse de propagation d'un groupe d'onde dans l'espace des phases à quatre dimensions ; S est la dissipation de l'énergie.

MIKE-21 HD utilise les équations de Saint-Venant pour simuler la dynamique des courants et des niveaux d'eau [8], en tenant compte des forçages extérieurs tels que les marées et les vagues. Ces équations expriment les lois de conservation de la masse et de la quantité de mouvement du fluide.

Équation de continuité :

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\partial d}{\partial t} \quad (2)$$

Équation de mouvement suivant l'axe x :

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{C^2 h^2} - \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega_q - f_v V V_x + \frac{h}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} (p_{atm}) = 0 \quad (3)$$

Équation de mouvement suivant l'axe y :

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gq\sqrt{p^2+q^2}}{C^2 h^2} - \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega_p - f_v V V_y + \frac{h}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} (p_{atm}) = 0 \quad (4)$$

Où p et q sont les densités de flux dans les directions x et y ; $\Omega_{p,q}$ le paramètre de Coriolis ; ζ l'élévation de la surface ; d la profondeur d'eau ; f_v le facteur de frottement de vent ; C le nombre de frottements de Chezy ; V la vitesse du vent V_x et V_y les vitesses du vent dans les directions x et y , τ_{xy} , τ_{yx} et τ_{xy} les composantes de contrainte de radiation ; h la profondeur d'eau $\zeta - d$; p_{atm} la pression atmosphérique et g l'accélération de pesanteur

Le module MIKE 21 ST modélise les modifications morphologiques du fond marin [9], notamment l'évolution bathymétrique par les sables, en résolvant numériquement l'équation de conservation de la masse des sédiments (équation d'Exner) [10] :

$$-(1-n) \frac{\partial z}{\partial t} = \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} - \Delta S \quad (5)$$

Où : n est la porosité du sédiment, z est le niveau du fond, q_x et q_y sont les transports totaux dans les directions x et y , respectivement et ΔS est le taux de sources-puits des sédiments.

III. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Étude bathymétrique

Dans cette étude, nous avons utilisé un maillage triangulaire (*Meshgrid*). Ce maillage, constitué de 909 nœuds et 1557 éléments, permet une meilleure représentation des détails morphologiques de la zone d'étude. La bathymétrie de notre zone d'étude a été établie à partir de données bathymétriques globales de haute résolution GEBCO (*General Bathymetric Chart of Oceans*), qui ont ensuite été traitées et interpolées à l'aide de l'outil "*Mesh Generator*" de MIKE 21 afin de générer un modèle numérique détaillé du fond marin. Le résultat de la bathymétrie de cette zone est présenté par la figure 2.

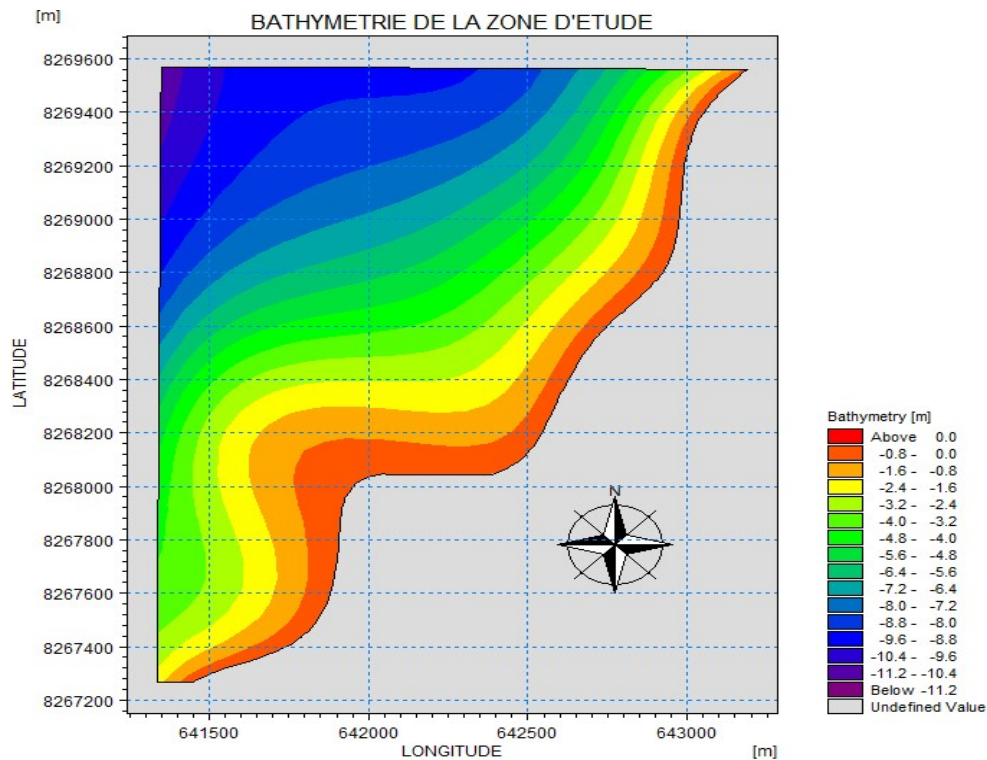


Figure 2: Bathymétrie de la zone d'étude.

3.2 Résultats de la dynamique des sédiments sous l'action des forçages hydrodynamiques

Les résultats présentés à la figure 3 mettent en évidence les dynamiques sédimentaires induites par l'action de la houle de direction Nord-Ouest sur plage de Majunga. L'incidence frontale de cette houle (figure 3a) engendre des courants littoraux divergents, orientés respectivement vers le Nord et le Sud de la zone d'étude (figure 3b), ce qui entraîne un transport sédimentaire asymétrique vers les extrémités Nord et Sud de la plage (figure 3c).

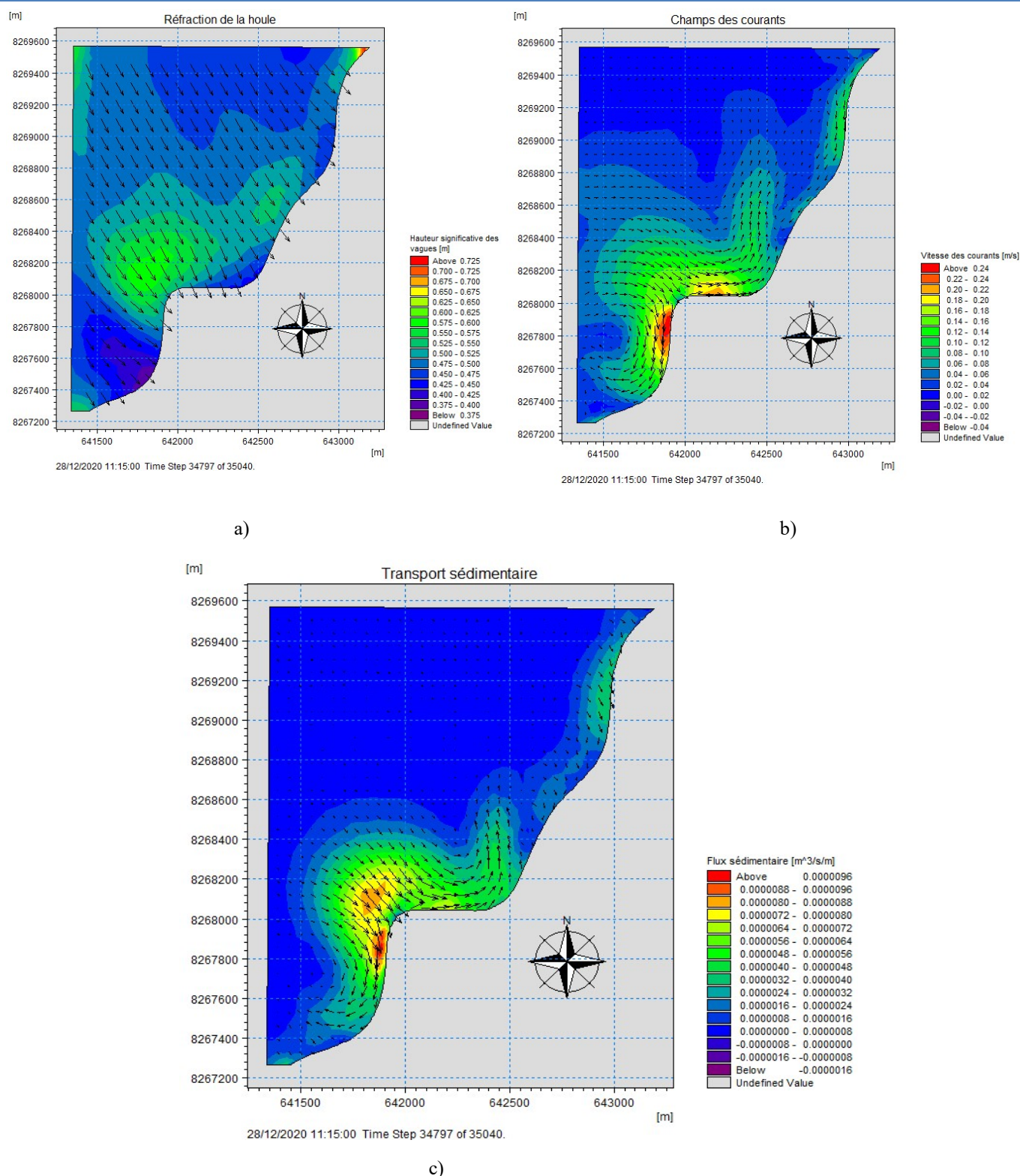


Figure 3 : Transport sédimentaire sous l'action de la houle de direction Nord-Ouest de la zone d'étude : a) réfraction de la houle au large, b) champs des courants, c) transport des sédiments

3.3 Évolution spatio-temporelle de la morpho-dynamique de la plage d'Amborovy.

Dans cette section, nous avons quantifié les variations des dépôts et des érosions sédimentaires induites par les processus hydrodynamiques et morphologiques sous-marins. Pour cela, nous avons analysé les moyennes climatologiques mensuelles des changements bathymétriques obtenues à partir du modèle numérique couplé MIKE 21/3 FM.

3.3.1 Zone de localisation des points d'extraction des données sur le site d'étude.

Afin d'évaluer l'évolution morpho-dynamique sédimentaire, nous avons collecté des données temporelles sur le transport sédimentaire en 24 points répartis en quatre lignes perpendiculaires à la côte (Lignes 1 à 4, figure 4). Chaque ligne comprend 6 points de mesure.

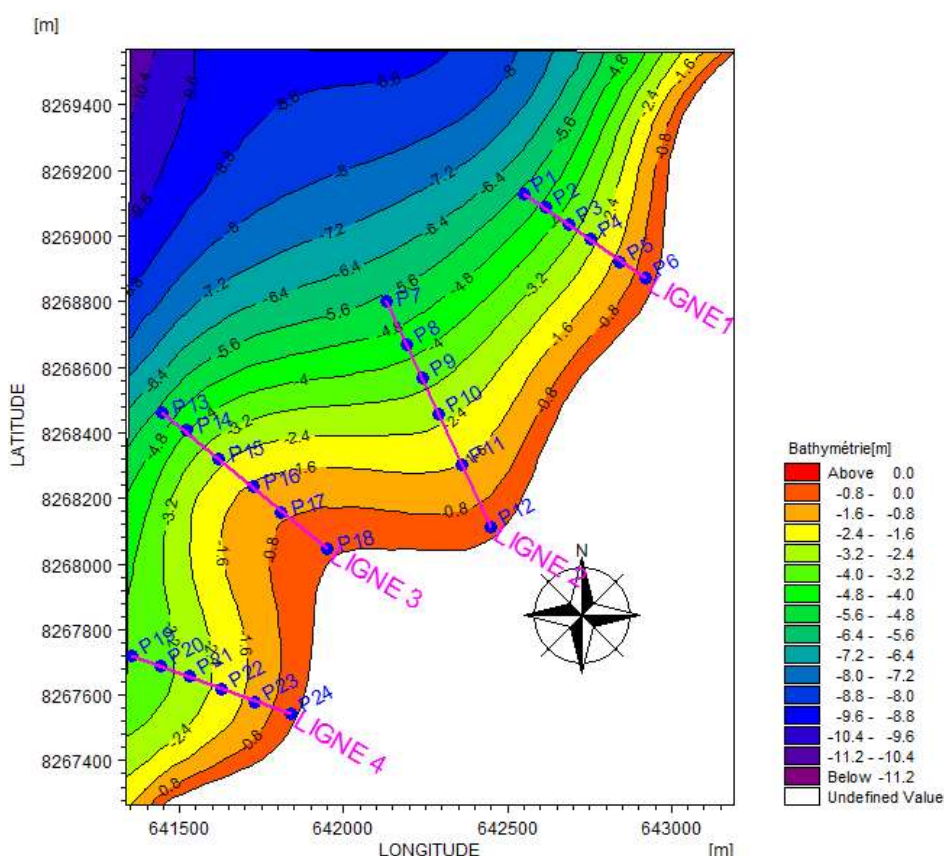


Figure 4 : Emplacement des mesures

3.3.2 Analyse d'évolution des sables sur chaque ligne

Nous présentons les résultats sur l'évolution bathymétrique des sables pour chaque ligne de notre zone d'étude (figure 5). Sur chaque figure, les valeurs négatives sur l'axe des ordonnées indiquent une érosion, tandis que les valeurs positives correspondent à un dépôt. Les axes des abscisses localisent les points de mesure pour chaque ligne de la zone d'extraction. Une accumulation significative des sables est observée dans les parties centrales des lignes 1,2 et 4, avec des épaisseurs maximales respectives d'environ 0,5 mètre, 0,35 mètre et 0,6 mètre. Une petite érosion s'est produite aux extrémités des lignes 1 et 2 pendant la période de notre étude. À l'inverse, la ligne 3 révèle une érosion sédimentaire généralisée sur toute sa longueur, avec une épaisseur maximale atteignant 0,4 mètre.

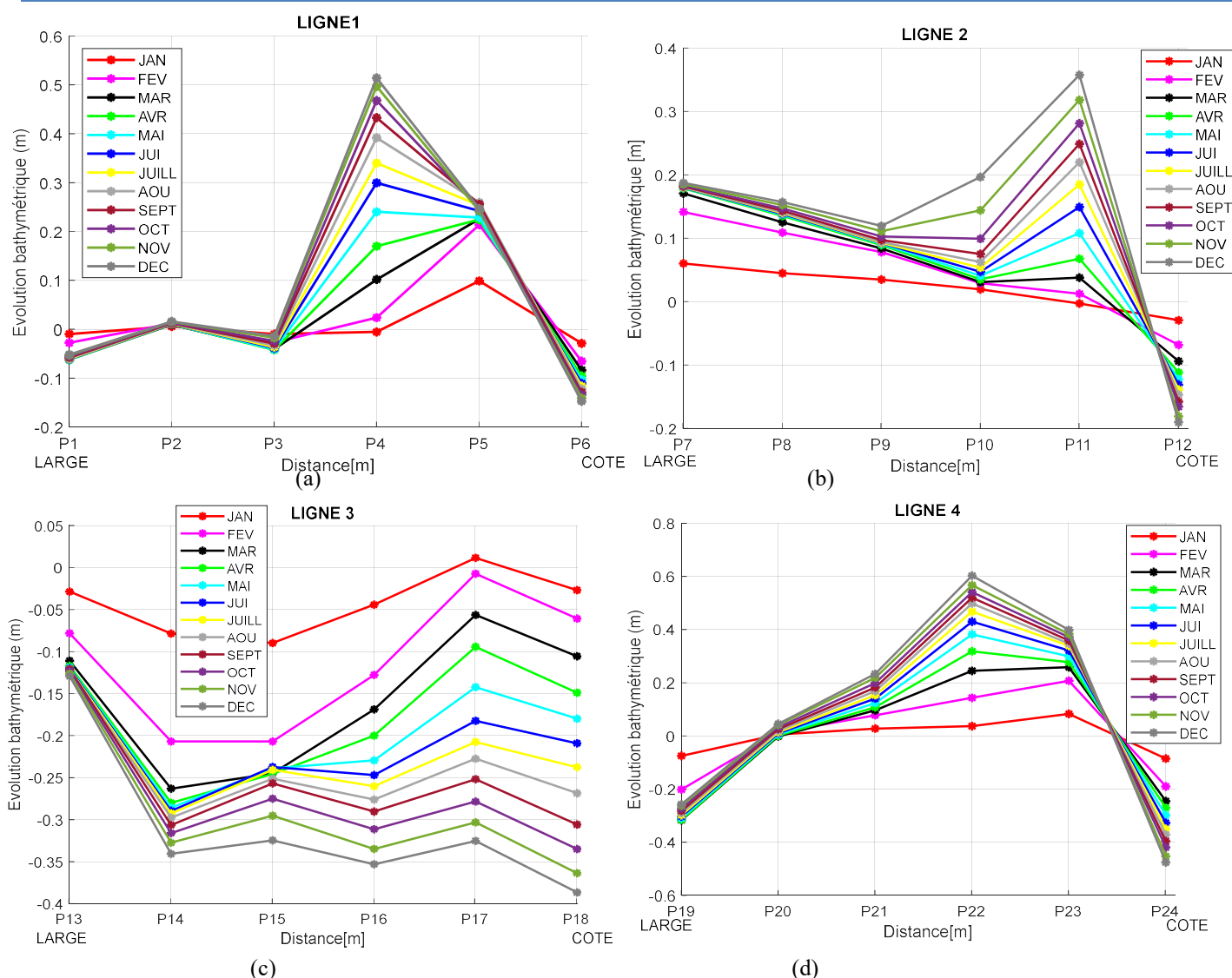


Figure 5 : Evolution bathymétrique des sables sur chaque ligne de la zone d'étude : a) Evolution bathymétrique du profil, b) Evolution bathymétrique du profil 2, c) Evolution bathymétrique du profil 3 et d) Evolution bathymétrique du profil 4

❖ Identification des zones d'érosion et de dépôt sédimentaire

En se basant sur les résultats obtenus, notre zone d'étude peut être divisée en deux catégories : les zones soumises à une érosion significative, principalement localisées sur la Ligne 3 (représentée en vert foncé sur la figure 6), et les zones de dépôt, situées au Nord (Lignes 1 et 2) et au Sud (Ligne 4), caractérisées par des couleurs plus claires (vert clair et jaune). Cette répartition est probablement liée à la combinaison de facteurs hydrodynamiques (courants, vagues) et morphologiques qui ont favorisé l'érosion dans certaines zones et le dépôt dans d'autres. Les accumulations sédimentaires particulièrement importantes aux points 4, 11 et 22 sont le résultat de ces processus de transport sédimentaire, expliquant les bancs de sable important dans la plage de Majunga.

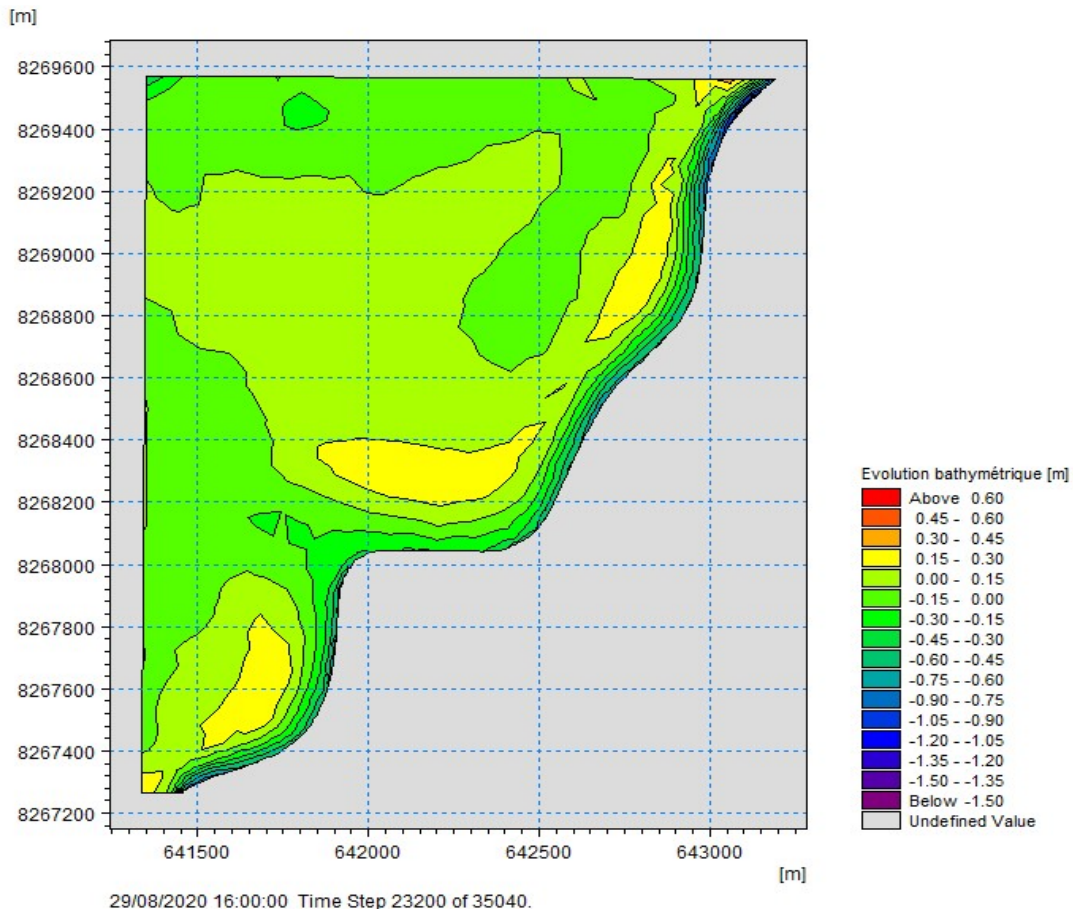


Figure 6 : Présentation de la zone d'érosion et dépôt en indiquant les bancs de sables dans la plage d'Amborovy Majunga.

3.4 Analyse de l'évolution des processus érosifs origine des bancs de sables dans cette zone

La figure 7 présente l'évolution temporelle en moyenne climatologique journalière des flux sédimentaires aux quatre points de mesure (15, 16, 17 et 18). L'axe des abscisses représente le temps en jours, tandis que l'axe des ordonnées indique le débit volumique des sédiments. Les résultats, exprimés en mètres cubes par an et par mètre linéaire, montrent des pics de transport sédimentaire en début d'année (janvier-mars), coïncidant avec une période de forte activité hydrodynamique (vagues, courants) souvent associée à des événements météorologiques intenses. Ces flux diminuent ensuite de manière significative au cours de la saison sèche.

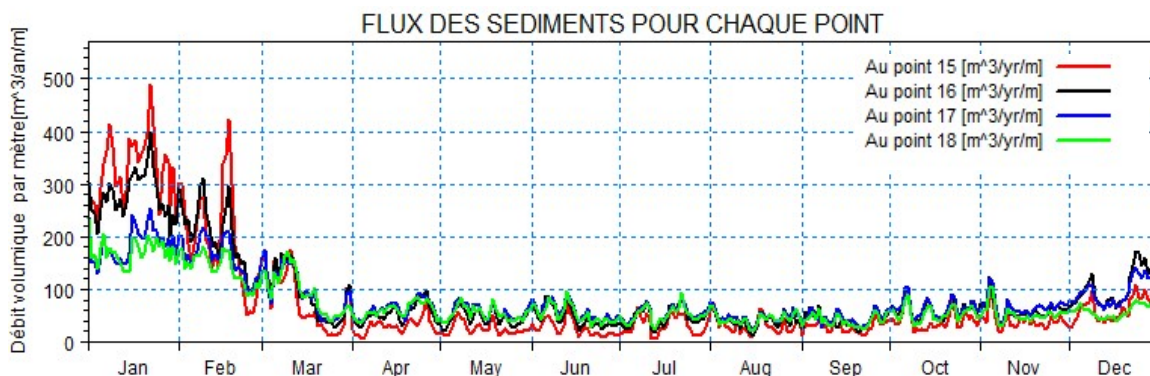


Figure 7 : Moyenne climatologique journalière de flux de sédiment pour chaque point.

3.5 Modélisation du processus d'érosion et le dépôt associé par l'intelligence artificielle

Dans cette étude, nous avons exploité les données en moyenne climatologique journalières issues du logiciel Mike 21 pour développer des modèles prédictifs du transport des sédiments. La méthode de modélisation neuro-floue ANFIS a été employée et sa performance a été évaluée au moyen de test de prédiction et les valeurs des erreurs statistiques MSE, RMSE et R [11], données par l'équation (5) et (6) :

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2 \quad (6)$$

Où S_i sont les données de simulation, O_i sont les données prédites (données de sortie par le modèle) et N est le nombre de donnée.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}{N}} \quad (7)$$

Le modèle ANFIS utilise la hauteur des vagues, la vitesse des courants marins et la vitesse des vents comme variables d'entrée pour étudier l'érosion. Pour la sédimentation, nous avons ajouté à ces variables les quantités de sable érodé, considérées comme la principale source de ces dépôts.

a) Modélisation du processus d'érosion

La figure 8 présente l'architecture du réseau ANFIS, composé de cinq couches implémentant les différentes étapes d'un système d'inférence flou de type Takagi-Sugeno. Ce réseau comporte trois entrées (Hauteur des vagues, Vitesse du courant et Vitesse du vent) une sortie (Débit volumique des sédiments).

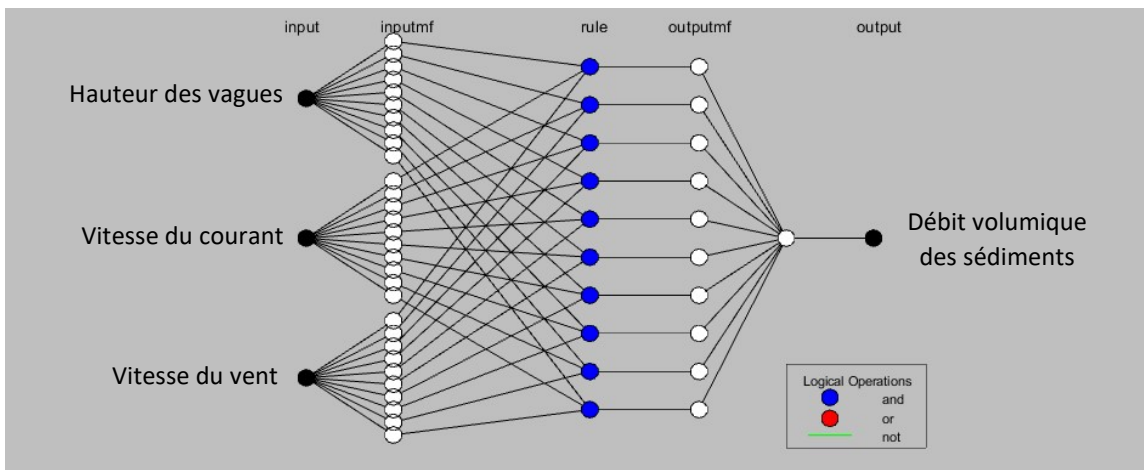


Figure 8 : Structure du modèle ANFIS à trois entrées et une sortie

Nous présentons les résultats observés lors des phases d'apprentissage (figure 9a), phases test (figure 9b) et sur l'ensemble des données (figure 9c). Dans ce cas, le modèle ANFIS est entraîné sur les 70% des données pour prédire le débit volumique sédimentaire au sein de notre zone d'étude, et les 30% restantes pour évaluer les performances du modèle dans les phases test. Sur chaque courbe, nous avons vu la superposition des deux courbes en noire (données réelles) et en rouge (modèle prédite par l'ANFIS). Cette visualisation permet d'apprécier l'ajustement du modèle aux données réelles, en mettant en lumière son processus de convergence et la fiabilité de ses prédictions.

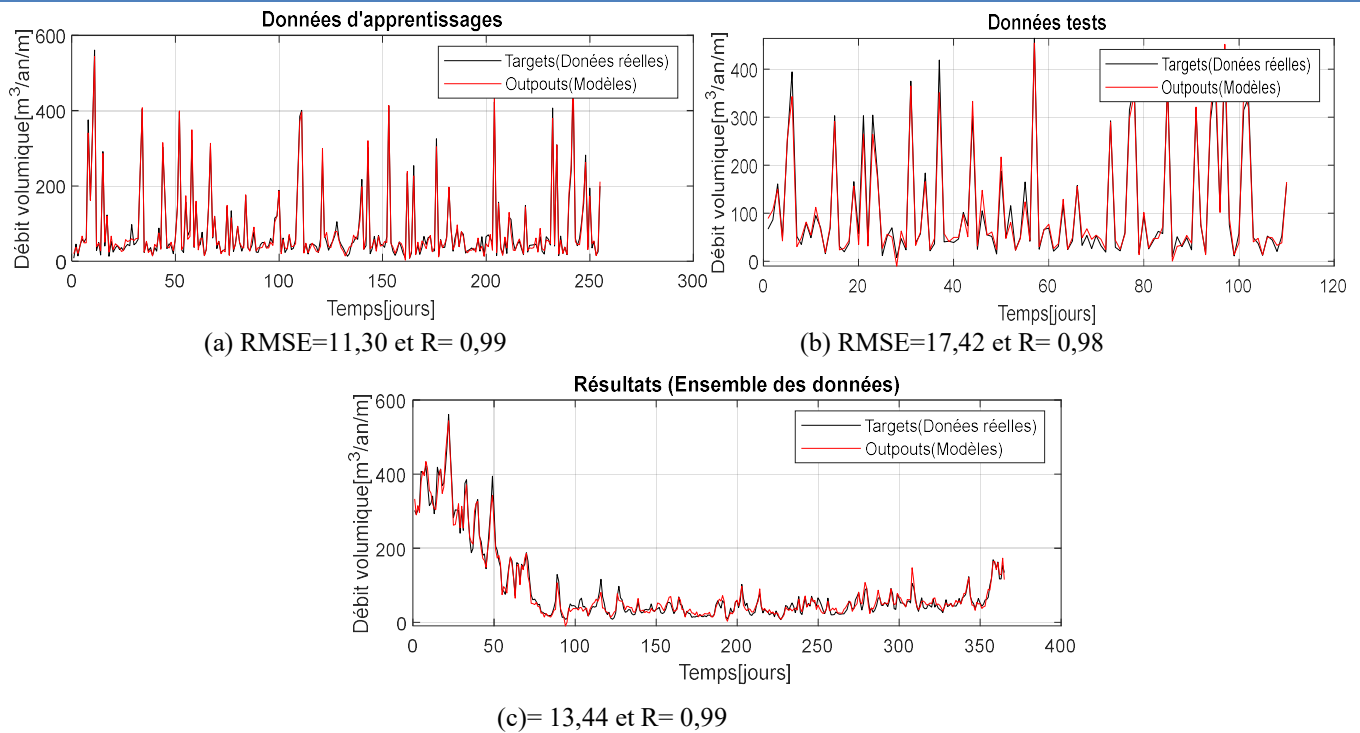


Figure 9 : Test et validation des données.

Le modèle ANFIS, permet de quantifier les taux des sédiments déplacés dans notre zone d'étude en fonction de paramètres hydrodynamiques. Pour des conditions spécifiques illustrées par la figure 10, le modèle estime un débit sédimentaire de 323 m³/an/m. Cela signifie qu'en moyenne, 323 mètres cubes de sédiments sont érodés chaque année et par mètre linéaire dans la zone étudiée.

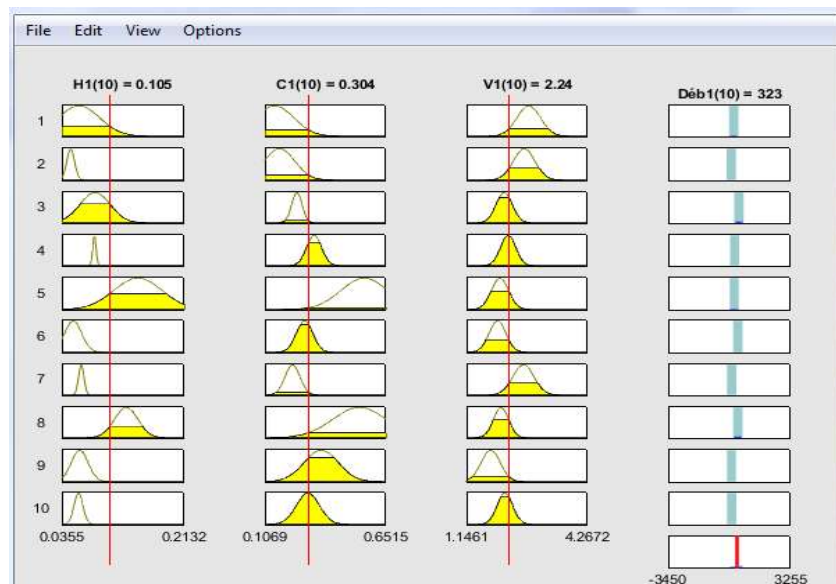


Figure 10 : Résultat de modélisation expliquant la formation des bancs des sables.

b) Modélisation du processus d'accumulation des sables

Dans cette étude, nous avons utilisé les débits sédimentaires érodés aux points 15, 16, 17 et 18 comme variables d'entrée pour prédire les taux de dépôt en sortie. Le réseau ANFIS, composé de cinq couches implémentant les différentes étapes d'un système d'inférence flou de type Takagi-Sugeno est illustré par la figure 11.

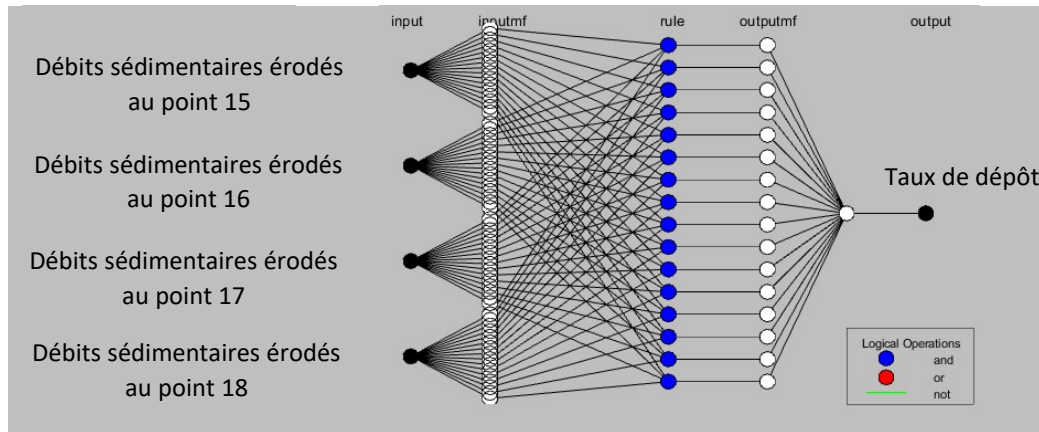


Figure 11: Structure du modèle ANFIS à trois entrées et une sortie

Les figures 12a, 12b et 12c présentent les résultats obtenus respectivement lors des phases d'apprentissage, de test et sur l'ensemble des données. Le modèle ANFIS a été entraîné sur 75% des données pour prédire le taux de sédimentation dans notre zone d'étude, et évalué sur les 25% restantes. La superposition des courbes représentant les données réelles (en noir) et les prédictions du modèle (en rouge) permet de visualiser l'ajustement du modèle aux données, mettant en évidence sa capacité à prédire avec précision le taux de sédimentation.

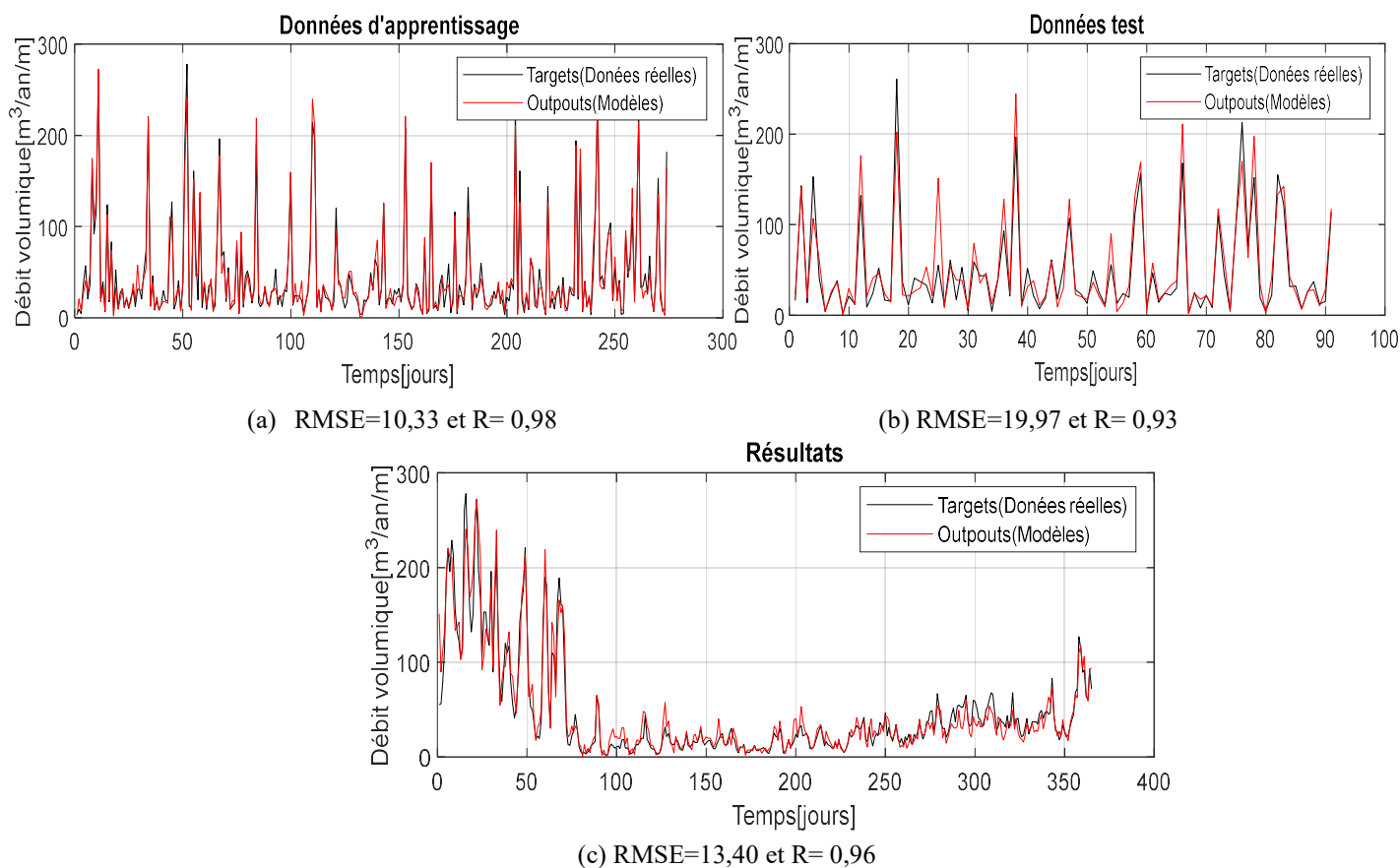


Figure 12 : Test et validation des données.

La figure 13 présente les résultats de la modélisation de la sédimentation dans notre zone d'étude. En considérant des débits sédimentaires aux points 15, 16, 17 et 18 respectivement égaux à $104 \text{ m}^3/\text{an/m}$, $104 \text{ m}^3/\text{an/m}$, $107 \text{ m}^3/\text{an/m}$ et $106 \text{ m}^3/\text{an/m}$, le modèle estime un taux de dépôt de sédiments moyen de $37,8 \text{ m}^3/\text{an/m}$. Cela signifie que, sous l'effet de ces apports sédimentaires, environ 37,8 mètres cubes de sédiments s'accumulent par mètre linéaire et par an dans la zone d'étude, contribuant ainsi à la formation de bancs de sable dans cette zone.

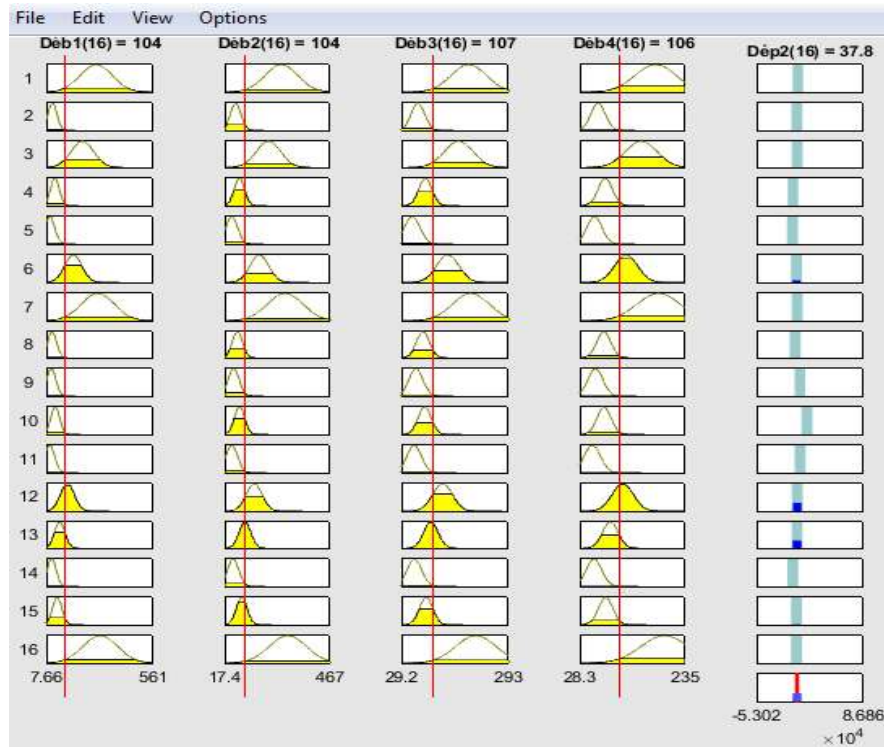


Figure 13: Résultat de la modélisation des du taux des sédimentation dans notre zone d'étude

La figure 14 et le tableau 1 démontrent les excellentes performances des modèles de régression. Avec un coefficient de détermination R proche de 1 et une erreur moyenne faible (0,33%), les prédictions du modèle sont très proches des valeurs réelles

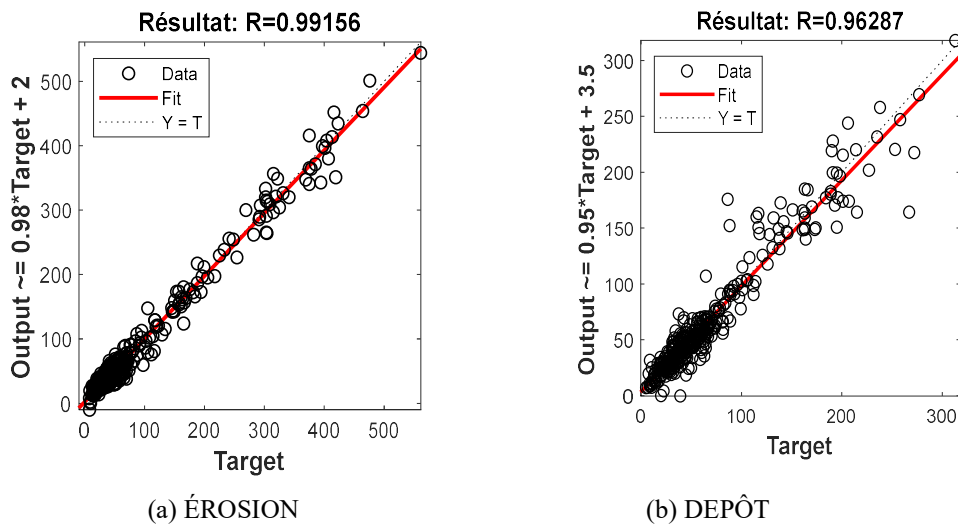


Figure 14 : Représentation de la corrélation entre la sortie du modèle et la sortie du résultat réel : (a) pour le processus d'érosion et (b) pour la sédimentation

Tableau 1 : Analyse statistique pour chaque phase

	Apprentissage			Test			Ensembles		
METHODES	R	MSE	RMSE	R	MSE	RMSE	R	MSE	RMSE
EROSION	0,99	129,81	11,30	0,98	303,48	17,42	0,99	180,75	13,44
DEPOT	0,98	106,81	10,33	0,93	398,93	19,97	0,96	179,64	13,40

IV. CONCLUSION

Ce travail a pour but d'étudier la dynamique des sédiments et l'évolution morpho-sédimentaire de notre zone d'étude afin d'identifier les zones d'érosion et de dépôt. Pour ce faire, nous avons suivi l'évolution des sables le long de quatre profils sédimentaires et analysé l'influence des processus hydrodynamiques, en particulier les courants induits par la houle. Les résultats montrent que la houle de Nord-Ouest favorise le transport des sables vers les deux extrémités Nord et Sud de la plage d'Amborovy. L'analyse de l'évolution bathymétrique de la plage d'Amborovy révèle une morphologie complexe, caractérisée par une zone centrale en érosion et deux zones latérales, au nord et au sud, où les sédiments s'accumulent. Les résultats de modélisation affirment la pertinence de notre modèle, caractérisé par des coefficients de corrélation R élevés, des erreurs quadratiques moyennes (RMSE) faibles et une excellente adéquation entre les données observées et les valeurs prédites. Ces résultats confirment l'existence de fortes corrélations entre les variables d'entrée et de sortie, permettant ainsi de quantifier les volumes de sédiments érodés et d'expliquer l'accumulation de sables (formation de bancs de sable) dans notre zone d'étude.

RÉFÉRENCES

- [1] M. Dolle, Quantification à haute résolution temporelle de la variabilité morphologique d'une plage et de l'érosion côtière sur la côte nord en bordure d'un prototype de protection côtière, Estuaire maritime du Saint-Laurent (Québec), mémoire de master, université de QUÉBEC À RIMOUSKI, 2012.
- [2] A. Guilcher, Morphologie littorale du calcaire en Méditerranée occidentale (Catalogne et environs d'Alger). Bulletin de l'Association de Géographes Français, 31(241), 50-58., 1954.
- [3] E. Bird, coastline changes. A global review, Wiley-Interscience publication., 219p, 1985.
- [4] D. MIKE 21/3 Coupled model FM, *Scientific Documentation*, 2014.
- [5] G. J. Komen, L. Cavaleri, M. Donelan, K. Hasselmann, S. P. A. E. Hasselmann et P. A. E. M. Janssen, Dynamics and modelling of ocean waves, 1996.
- [6] I. R. Young, Wind generated ocean waves, Elsevier ocean engineering book series vol 2, 1999.
- [7] R. R. Kulkarni, «Numerical Modelling of Coastal Erosion using MIKE21», master thesis, 2013.
- [8] H. Dahmani, «Etude hydro-sédimentaire en domaine bidimensionnel d'un milieu cotier par un progiciel de calcul (MIKE 21 et LITPACK)», mémoire de magister en hydraulique, Ecole Nationale polytechnique (ENP) Algerie, 2012.
- [9] Yasmina, Etude hydrosédimentaire du rivage de khemisti : Application de la modélisation numérique en domaine bidimensionnel par un progiciel de calcul MIKE 21, memoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'ingenieur en sciences de la mer, 2016.

- [10] V. A. N. VAN, «THAN, Modélisation d'érosion côtière: application à la partie ouest du tombolo de Giens» , thèse doctorat, université d'AIX-MARSEILLE, 2015.
- [11] R. H. D. Donné, Caractérisation des granulats dans les écoulements granulaires immergés: une approche pour analyser les phénomènes complexes, thèse doctorat, université d'Antananarivo, 2024.