

# *Simulation Et Modélisation Par Neuro-Flou De L'érosion De La Côte Sud-Est De Madagascar*

## *[Simulation And Neuro-Fuzzy Modeling Of Coastal Erosion In Southeast Madagascar]*

MAHAFONJA Natolodraza Ferlot<sup>1</sup>, RANDRIANARISON Hervais Dieu Donné<sup>2</sup>, RATSIMAVO Jacques Chrysologue<sup>3</sup>, RAZAFINDRALAMBO Hasina Tahiananirina<sup>4</sup>, RATIARISON Adolphe Andriamanga<sup>5</sup>.

<sup>1,2,3,4,5</sup>Laboratoire Dynamique de l'Atmosphère, du Climat et des Océans (DyACO), Physique et Applications, Sciences et technologies

<sup>1,3</sup>Université de Toliara Madagascar

<sup>2,4,5</sup>Université d'Antananarivo Madagascar.

<sup>1</sup>ferlotmahafonja@gmail.com, <sup>2</sup>hervarandria@yahoo.com, <sup>3</sup>rat.chryso@gmail.com, <sup>4</sup>hasinatahiananirina@gmail.com,

<sup>5</sup>adolphe.ratiarison@univ-antananarivo.mg,



**Résumé :** L'objectif de ce travail est de simuler numériquement l'évolution du fond marin, causée par l'érosion côtière au Sud de la ville d'Amboasary-Sud, Madagascar. Nous avons utilisé le logiciel Mike 21 pour faire la simulation de transport de sédiment en tenant compte de la bathymétrie de la zone d'étude. Les simulations et l'étude bathymétrique ont permis d'obtenir de nombreux résultats analysant l'évolution du fond marin dans le but de collecter des données sur le fond marin. En utilisant les données obtenues par simulations, nous avons modélisé le dépôt sédimentaire par le système intelligence artificielle neuro-flou. Ce système neuro-flou a permis d'obtenir des résultats avec de l'évolution du fond marin. Les valeurs des coefficients de corrélations (R) et des erreurs quadratiques (RMSE) sont fiables pour cette modélisation.

**Mots clés :** Fond marin, érosion côtière, modélisation, transport de sédiment

**Abstract :** The objective of this work is to numerically simulate the evolution of the seabed, caused by coastal erosion south of the city of Amboasary-Sud, Madagascar. We used the Mike 21 software to simulate sediment transport, taking into account the bathymetry of the study area. Simulations results, the bathymetric study, which analyzes the evolution of the sea bed, was conducted with the aim of collecting data on the sea bed. Using the data obtained by simulations, we are modeling the sedimentary deposit using a neuro-fuzzy artificial intelligence system. Modeling with neuro-fuzzy artificial intelligence allowed for the obtaining of results by calculating correlation coefficients (R) and quadratic errors (RMSE), which showed very low error values.

**Keywords :** sea bed, coastal erosion, modeling, sediment transport.

## I. Introduction

La zone côtière est un système dynamique complexe entre l'environnement marin et le terrain au-dessus de l'eau. Cette zone est en constante évolution, érodée dans certains endroits et créant des accumulations dans d'autres [1] [2]. Le but de ce travail est de développer avec le logiciel Mike 21 la simulation de l'érosion pluviale au Sud de la ville d'Amboasary-Sud. Les résultats obtenus à partir de la simulation numérique, correspondant aux données du fond marin, sont présentés sous forme de moyenne journalière, mensuelle et annuelle. Après les analyses statistiques, le système d'intelligence artificielle « neuro-flou » est utilisé pour comprendre, prédire et éventuellement apporter des connaissances sur le phénomène d'érosion côtière le long de la côte Sud-Est de Madagascar.

## II. Matériels et méthodes

### II.1. Représentation de la zone d'étude

La zone d'étude encadrée en rouge est celle au Sud d'Amboasary-Sud située au Sud de Madagascar. Cette zone se trouve entre  $25^{\circ}09'58'' \leq \text{latitude Sud} \leq 25^{\circ}10'57''$  et  $46^{\circ}24'38'' \leq \text{longitudo} \leq 46^{\circ}27'43''$  (Figure.1). Elle couvre à peu près 6 km de côte.



Figure 1 : Amboasary –Sud de Madagascar par Google Earth

### II.2 Méthodologie

Le MIKE 21 est un progiciel destiné aux professionnels du génie côtier, il comporte plusieurs codes de calculs et de modélisation numérique en 2D. Trois modèles numériques sont employés pour analyser les origines de l'hydrodynamique et la dispersion des sédiments le long de la côte d'Amboasary-Sud :

Les équations régissant les mouvements du fluide et du sédiment sont :

L'équation de conservation de masse :

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

Les équations de conservation de la quantité de mouvement :

Direction de l'axe des x :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{\rho h} \left( \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{gu\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 h} + A_H \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

Direction de l'axe des y:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{1}{\rho h} \left( \frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{gv\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 h} + A_H \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

L'axe des x est celui orienté vers le large ;

L'axe des y est vertical, perpendiculaire à l'axe des x et dirigée vers la profondeur.

$\eta$ : élévation de la surface (m) ;

$h$  : Profondeur totale (m) ;

$u, v$ : vitesse du courant, respectivement dans les directions des axes x et y (m/s) ;

$g$  : Accélération gravitationnelle (9,8 m/s<sup>2</sup>) ;

$\rho$  : Densité de l'eau de mer (kg/m<sup>3</sup>) ;

$S_{xx}, S_{yx}, S_{xy}, S_{yy}$  : Composantes de rayonnement de contrainte due à la présence d'ondes ; ( $S_{yx}$ ) désigne la composante de rayonnement de contrainte qui travaille perpendiculairement au plan (x, y) (kg/m s<sup>2</sup>) ;

$C$ : Coefficient de Chezy (m<sup>1/2</sup>/s) ;

$A_H$  : viscosité de Foucault (m<sup>2</sup>/s).

La dynamique des vagues dans cette recherche est basée sur l'équation de la densité d'action des vagues, qui établit des relations entre la densité d'action des vagues  $N(\sigma, \theta)$  et l'énergie des vagues  $E(\sigma, \theta)$  comme suit [4] [6] :

$$N = \frac{E}{\sigma} \quad (4)$$

$\sigma$ : Vitesse angulaire relative.

Le transport de sédiments a été simulé en utilisant une application complémentaire du module de transport de sable de MIKE 21 Flow Model.

La formule du transport des sédiments en suspension est mathématiquement exprimée par l'équation suivante [5] [6] :

$$q_s = 11.6 U_f c_b a \left( I_1 \ln \left( \frac{30h}{k_N} \right) + I_2 \right) \quad (5)$$

Où les termes  $I_1$  et  $I_2$  sont obtenus à partir des relations [7]:

$$I_1 = \left[ 0.216 \frac{A^{Z-1}}{(1-A)^Z} \right] \int_A^1 \left( \frac{1-y}{y} \right) dy \quad \text{et} \quad I_2 = \left[ 0.216 \frac{A^{Z-1}}{(1-A)^Z} \right] \int_A^1 \left( \frac{1-y}{y} \right) \ln y dy \quad (6)$$

Où A est un paramètre égale au rapport  $(a/h)$  ; et Z est l'exposant de Rouse.

$c_b$  représente la concentration de sédiments en suspension au niveau du lit ;

$a$  est l'épaisseur du fond ;

$h$  est la profondeur de l'eau ;

$k_N$  est la rugosité du lit.

Le calcul de l'évolution du niveau du lit, est mathématiquement exprimé par l'équation ci-dessous :

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{1-n_s} \left( \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) = 0 \quad (7)$$

Avec  $z_b$  désignant le niveau du lit ;

$q_x$  et  $q_y$  représente respectivement la quantité totale de transport de sédiments dans l'axe des x et l'axe des y ;

$n_s$  représente la porosité c'est-à-dire l'espace vide entre les grains de sédiment.

### III. RÉSULTATS ET DISCUSSION

#### III.1 Étude bathymétrique dans la zone

La figure 2 représente la bathymétrie réalisée dans la zone d'étude qui a été importée de Gebco (<https://download.gebco.net/>). Elle donne la vue de haut de la zone étudiée : les différentes couleurs affichent la partie de la mer. La couleur rouge indique la surface supérieure de la mer tandis que les autres couleurs indiquent des niveaux inférieurs à la surface de la mer.

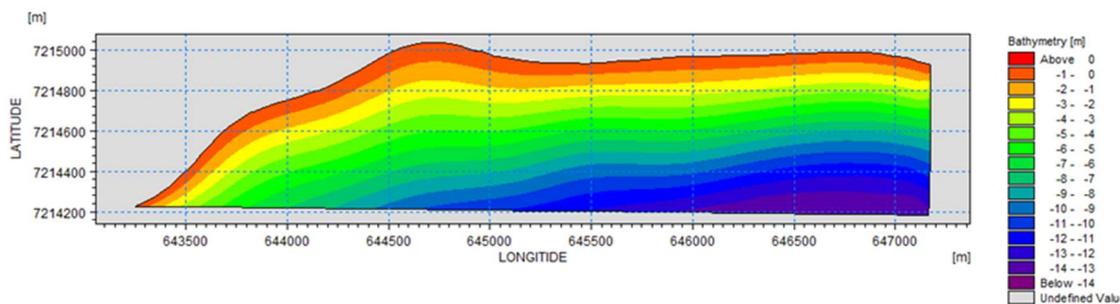


Figure 2 : Représentation de la bathymétrie dans la zone Amboasary-Sud

#### III.2. Les résultats de simulation dans la zone Amboasary-Sud

Les figures 3 représentent les différentes positions et concentrations simulées des sédiments dans la zone tous les mois de Janvier et de Décembre de l'année 2015 à 2020. Nous constatons que les positions et les concentrations des sédiments ne sont pas pareilles chaque année. La raison est que la quantité de pluie qui apporte les sédiments du continent vers la mer n'est pas pareille chaque année.

L'objectif de la simulation est de comprendre les données relatives du fond marin. Ces figures 3 nous donnent la diffusion de sédiments vers le fond de la mer en fonction du temps et en fonction des années de simulation. Notons que nous n'avons pas les

moyens de mesurer la quantité de sédiment in situ mais nous avons fait des simulations de dépôt de sédiment. Ce qui est l'objet du paragraphe suivant.

Le débit de la simulation en mois de Janvier  $t=2s$

Fin de la simulation en mois de Décembre  $t=17450s$

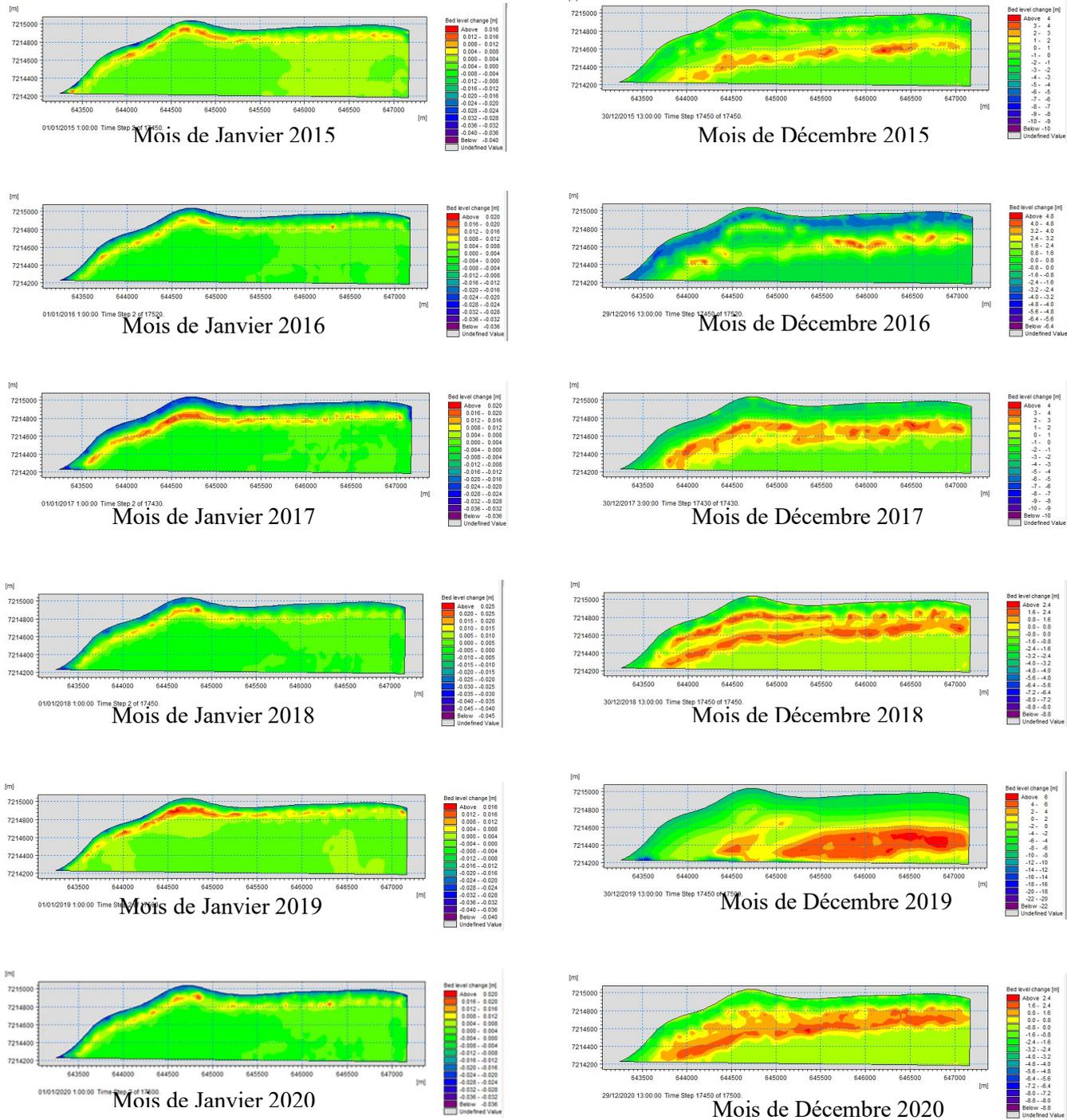


Figure 3 : Représentation de la simulation du fond marin dans la zone d'étude

### III.3. Représentation des points et ligne du fond marin dans la zone Amboasary-Sud

La figure 4 illustre le transport sédimentaire en quatre points s'étendant de la côte jusqu'à 760 m au large. Ces points sont sélectionnés pour observer l'évolution de l'érosion dans cette région. La ligne visible dans la figure 5 correspond à une zone étudiée et analysée à l'aide de la bathymétrie.

A la longitude 6447000 m, nous plaçons 4 points A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub>, et A<sub>4</sub> sur la ligne bathymétrique à différentes latitudes selon la figure 4. Les lignes contenues sur cette figure désignent les points de même profondeur.

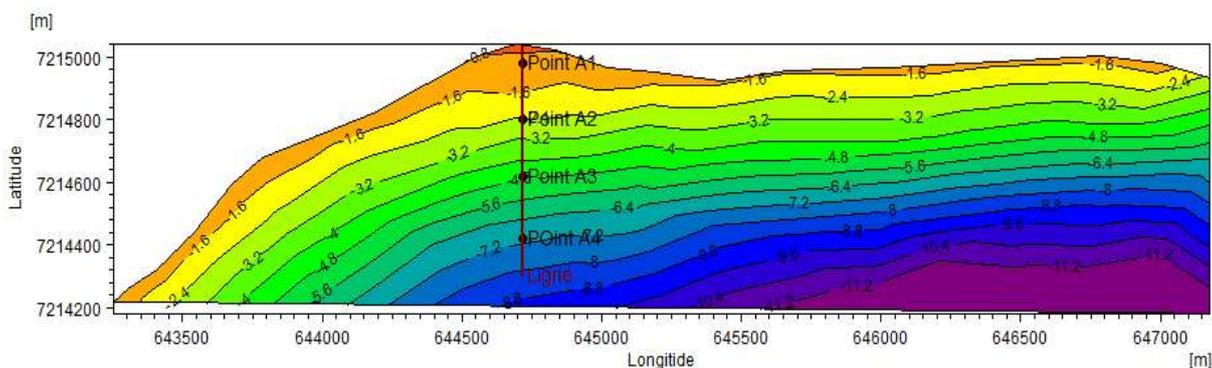


Figure 4 : Bathymétrie qui présente des 4 points de l'intérêt

La figure 5 suivante représente la coupe transversale suivant la longitude 644700 m. Les points A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub>, et A<sub>4</sub> se trouvent donc sur la ligne de bathymétrie.

La représentation graphique de la hauteur de sédiment en fonction de l'altitude tirée de la figure 4 se fait sur la figure 5. Les points A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub> et A<sub>4</sub> se trouvent donc sur la ligne bathymétrique.

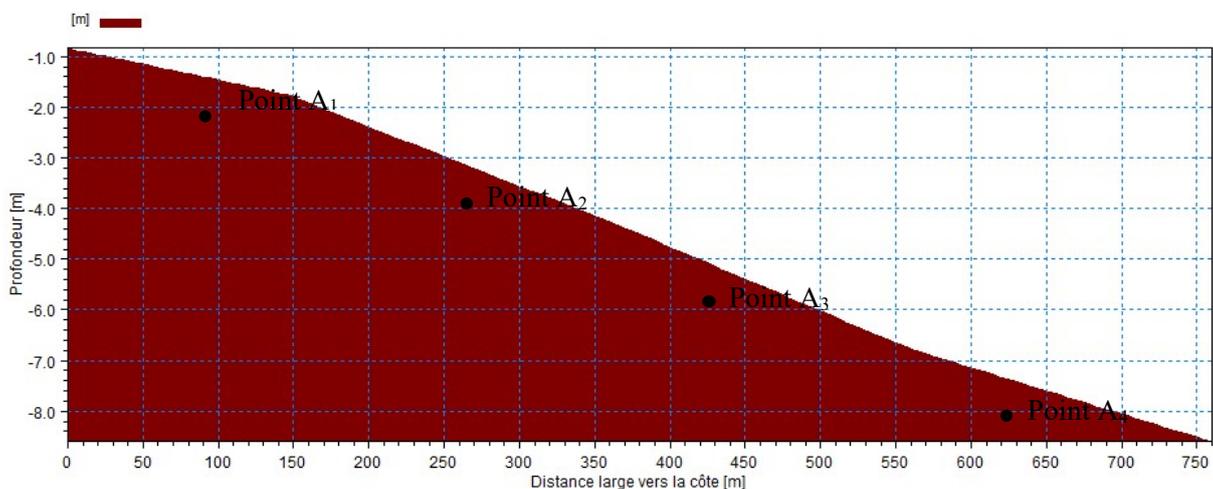


Figure 5 : Représentation de la ligne de bathymétrie de l'Amboasary-Sud

#### III.3.1. Moyenne climatologique journalière du fond marin pendant six ans dans la zone Amboasary-Sud

La figure 6 représente les moyennes climatologiques journalières du fond marin pour les quatre points situés à des distances différentes de la côte vers le large.

Les concentrations du sédiment au point A<sub>1</sub> formée par la courbe noire diminuent de façon hyperbolique. Elle diminue de -0,2 m au premier Janvier jusqu'à -2,7 m au 31 Décembre. Inversement, les concentrations du sédiment au point A<sub>2</sub> augmentent de 0 m au premier Janvier à 1,5 m à fin Février car les sédiments au point A<sub>1</sub> se déplacent vers le point A<sub>2</sub>.

Ces sédiments diminuent de 1,5 m à fin Février jusqu'à 0,5 m à 31 Décembre car il y a déplacement de sédiments du point A<sub>2</sub> vers le point A<sub>3</sub>. Jusqu'à fin Février, la concentration de sédiments au point A<sub>3</sub> reste nulle, puis elle augmente indéfiniment jusqu'au 31 Décembre.

La courbe en rouge représentant la concentration de sédiments au point A<sub>4</sub> augmente indéfiniment de 0 m au premier Janvier jusqu'au 31 Décembre de façon linéaire. Comme la concentration de sédiments se déplace de A<sub>1</sub> vers les A<sub>i</sub> supérieurs (A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub> et A<sub>4</sub>) il est logique que la concentration de A<sub>1</sub> descende brusquement et la concentration de A<sub>2</sub> augmente brusquement du premier Janvier à fin Février. De fin Février à fin Avril, la concentration de sédiments de A<sub>1</sub> continue de descendre et les concentrations de sédiments du point A<sub>2</sub> reste à peu près constante et la concentration de A<sub>3</sub> augmente. Notons que la somme des concentrations des points A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> et A<sub>3</sub> s'annule.

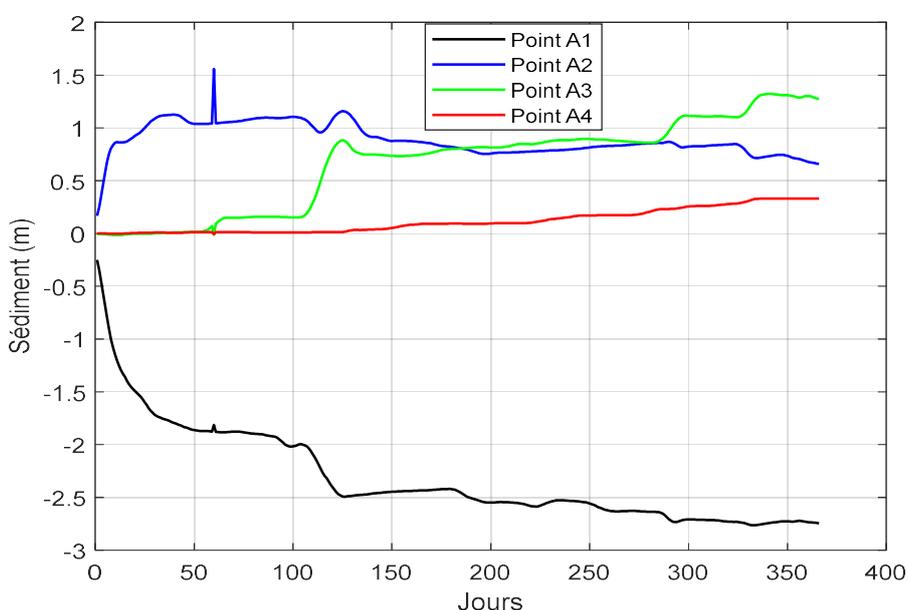


Figure 6 : Moyenne climatologique journalière du fond marin de chaque point pendant six ans

### III.3.2. Moyenne climatologiques mensuelle de fond marin pendant six ans dans la zone Amboasary-Sud

La figure 7 montre la moyenne climatologique mensuelle du fond marin pendant six ans pour les quatre points A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub> et A<sub>4</sub>. La concentration de sédiments au point A<sub>1</sub> diminue.

Les concentrations de sédiments aux points A<sub>2</sub> et A<sub>3</sub> augmentent car celle de A<sub>1</sub> arrive à ces deux points

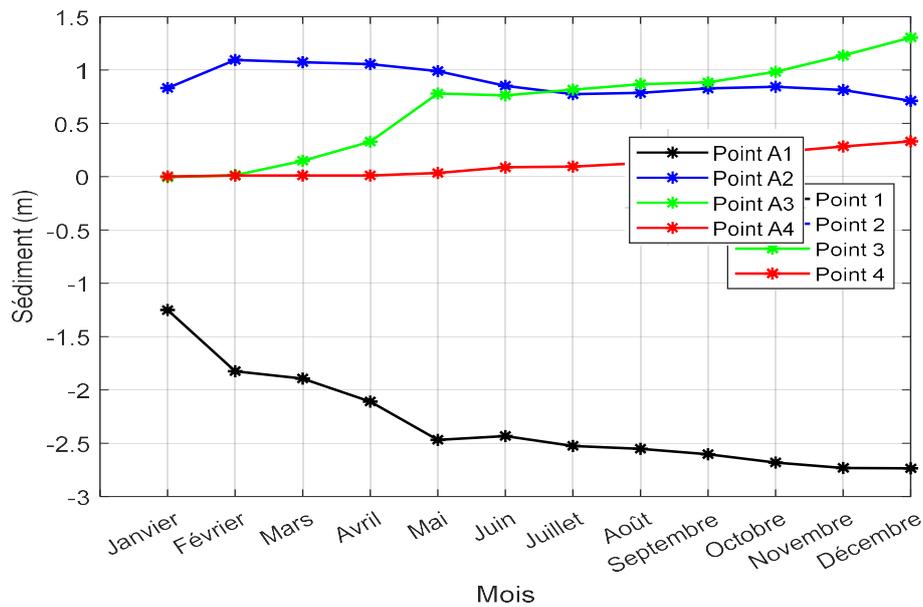


Figure 7: Moyenne climatologique mensuelle du fond marin de chaque point pendant six ans

La concentration de sédiments au point A<sub>2</sub> augmente de Janvier à Février, puis elle reste constante jusqu'au mois de Mai. Elle descend jusqu'au mois de Juillet et reste constante jusqu'au mois de Décembre. La concentration de sédiments aux points A<sub>3</sub> augmente indéfiniment du mois de Janvier jusqu'au mois de Décembre. La concentration de sédiments au point A<sub>4</sub> augmente indéfiniment aussi de Janvier à Décembre.

### III.3.3. Moyenne annuelle du fond marin des toutes l'année dans la zone Amboasary-Sud

La figure 8 montre les variations des concentrations moyennes annuelles du fond marin pendant six ans pour quatre points situés à différentes distances de la côte vers le large. La vitesse du vent, la hauteur des vagues, l'effet des marées et la pluviométrie ne se manifestent pas de la même façon chaque année, les courbes représentatives des concentrations de sédiments aux divers points A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub> et A<sub>4</sub> sont tracées de façon aléatoire. La hauteur de sédiment au point A<sub>1</sub> représente un minimum à l'année 2018 et un maximum à l'année 2019 ; celle au point A<sub>2</sub> montre 3 minima aux années 2015, 2017 et 2019 et 2 maxima aux années 2016 et 2018 ; celle au point A<sub>3</sub> descend de 1.7 m en 2015 à 0 m en 2016 puis augmente de 0 m en 2016 jusqu'à 1m en 2018 et reste constante à 0 m jusqu'à 2020 ; celle de A<sub>4</sub> reste nulle de 2015 à 2020 sauf en 2019. En résumé les sédiments se déplacent au large au cours des années.

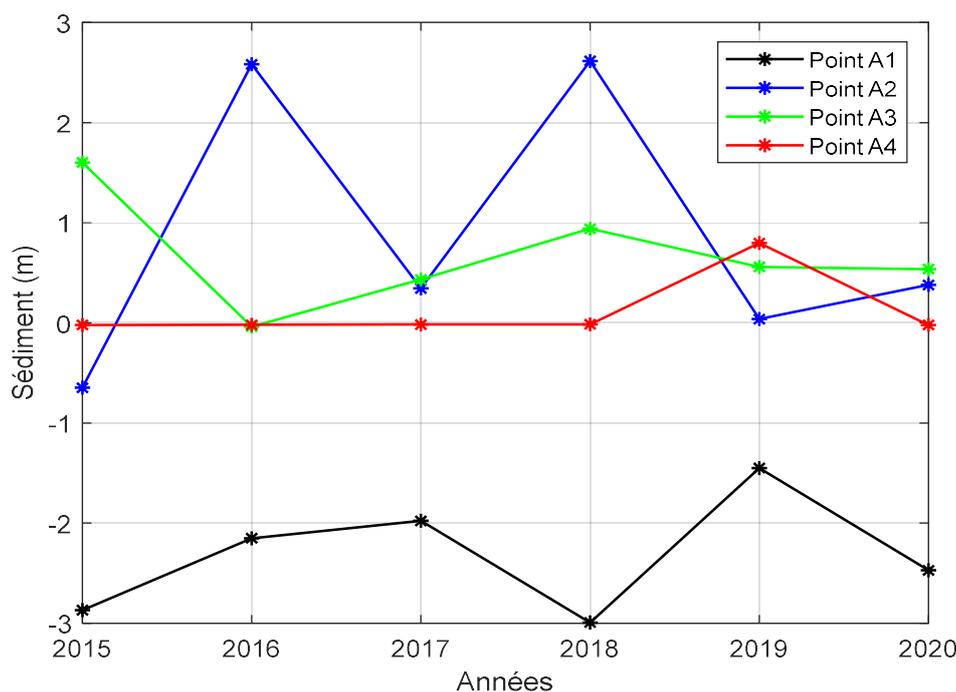


Figure 8 : Moyenne annuelle du fond marin de chaque point à chaque année

### III.4. Résultat du modèle du fond marin par le système neuro-flou ANFIS

#### III.4.1 Présentation du système neuro-flou ANFIS

L'algorithme d'apprentissage hybride du système neuro-flou proposé par Jang combine astucieusement deux approches distinctes : la méthode de descente de gradient et la méthode d'estimation des moindres carrés. L'apprentissage des neurones implique la modification des relations entre les synapses d'entrée et la sortie en agissant sur le poids des entrées. En général, cette adaptation convient à la méthode de descente de gradient [8].

#### III.4.2 Indices de la validation du modèle

Pour l'évaluation de la fiabilité d'un modèle, nous avons utilisés trois indicateurs couramment utilisés à cette fin, qui sont le Mean Squared Error (MSE), la Root Mean Squared Error (RMSE), et le coefficient de corrélation (R).

Le MSE mesure la moyenne des carrés des écarts entre les valeurs prédites par le modèle et les valeurs réelles, offrant ainsi une indication de la précision globale du modèle. La RMSE, racine carrée du MSE, fournit une mesure dans les mêmes unités que la variable de sortie, facilitant ainsi l'interprétation des erreurs. Plus précisément, la RMSE donne la mesure de l'erreur dans les mêmes unités que la variable de sortie : généralement une différence entre la sortie du modèle et la sortie calculée. Par conséquent, plus la valeur de RMSE est petite par rapport à la sortie du modèle, plus on obtient du bon modèle [9].

Le coefficient de corrélation R évalue la force et la direction de la relation linéaire entre les prédictions du modèle et les observations réelles. Cet indicateur combiné permet d'obtenir une évaluation complète de la performance et de la fiabilité d'un modèle. Cette valeur doit être inférieure et proche de 1.

### III.4.3 Architecture du système neuro-flou

Dans cette étude, le modèle de base est construit par 3 entrées et une sortie. Nous avons réorganisé la série des données de manière à obtenir une matrice comportant quatre colonnes pour accueillir 3 entrées et une sortie.

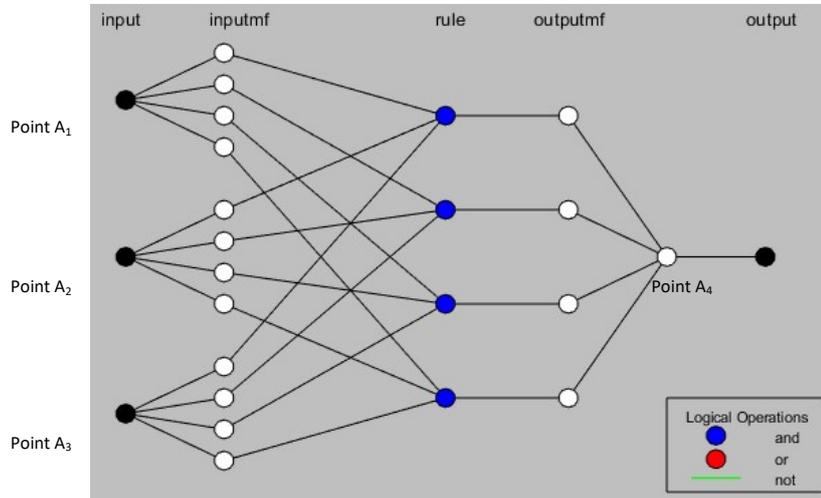


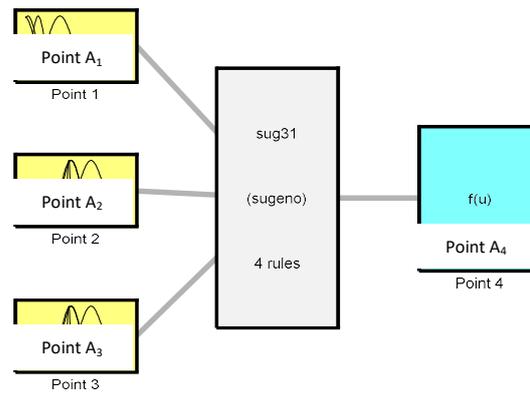
Figure 9 : Schéma explicatif de la structure du système neuro-flou à trois entrées

Nous avons opté pour un système d'inférence floue de type Sugeno qui utilise trois entrées : point A<sub>1</sub>, point A<sub>2</sub>, point A<sub>3</sub>. Les 3 entrées représentent les moyennes climatologiques journalières des fonds marins sur une période de 366 jours. À la sortie, une seule variable est générée, indiquée par le point A<sub>4</sub>.

Tableau 1: Description des différentes couches du modèle ANFIS

Numéro de couche	Type de couche	Nombre de neurones
Couche 0	Entrées	3
Couche 1	Les valeurs	3*4=12
Couche 2	Les règles	4
Couche 3	La normalisation	4
Couche 4	Linéarisation des fonctions	1
Couche 5	Somme	1

Ce système d'inférence floue fonctionne en utilisant les méthodes énumérées dans le tableau 1, et illustré sur l'interface graphique de la figure 10.



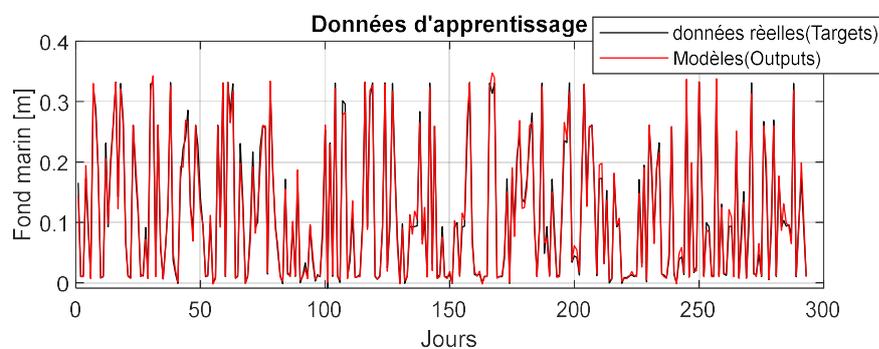
System sug31: 3 inputs, 1 outputs, 4 rules

Figure 10 : Structure de la logique floue dans ANFIS (Matlab 2018a)

### III.4.4 Représentation des résultats des trois phases du système neuro-flou

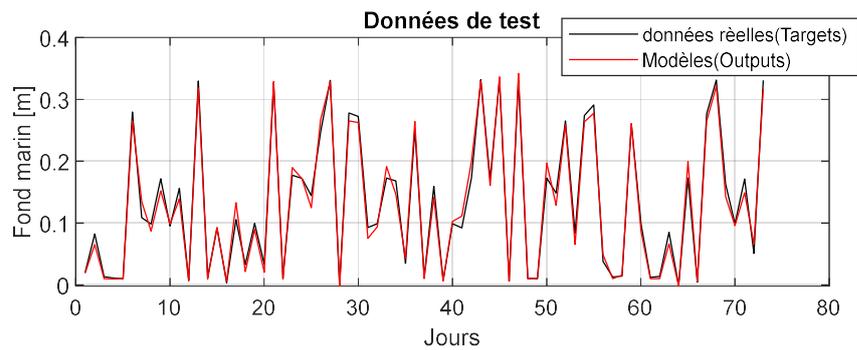
Les courbes suivantes représentent la phase d'apprentissage, la phase test et la phase d'ensemble afin d'évaluer la qualité du modèle.

Pour l'apprentissage (a), nous utilisons 80 % des valeurs quotidiennes des fonds marins, soit sur une période de 293 jours. La courbe en noire montre la valeur des données réelles. La couleur rouge donne les estimations ou modèles obtenus par le système ANFIS. La comparaison donne une idée de la qualité des prédictions sur l'ensemble d'entraînement : l'entraînement est assuré.



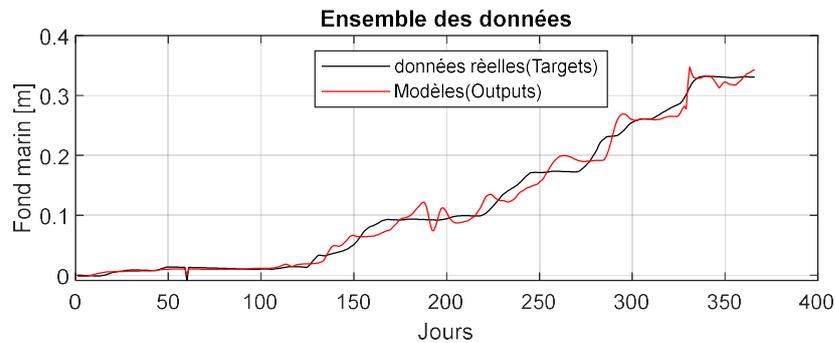
a) Apprentissage

La figure (b) suivante, représentant le test, 20 % des valeurs quotidiennes des fonds marins sont utilisées, soit sur une période de 73 jours. Cette figure affiche alors les résultats du modèle sur l'ensemble de test. Ce test permet d'évaluer la capacité du modèle à généraliser sur des données qu'il n'a pas vues pendant l'entraînement. La comparaison entre les prédictions et les valeurs réelles dans cette figure montre de la performance du modèle en dehors de l'ensemble d'entraînement parce que nous avons trouvé des superpositions.



b) Test

Dans la figure « c) Ensemble » suivante, nous évaluons la performance du modèle en superposant les deux courbes de la valeur quotidienne de fond marin : les données de prédictions représentées par la courbe rouge et les valeurs réelles représentées par la courbe noire sur toutes les données (apprentissage et test). On constate des divergences minimales entre elles : faibles différences entre ces deux courbes. On peut dire que nous avons établi un bon modèle.



c) Ensemble

Figure 11 : Représentations des deux phases (Apprentissage et test)

### III.4.5 Validation du modèle

Les résultats des coefficients de corrélations R sont illustrés dans la figure 12. Il convient de noter que la base de données est subdivisée en trois parties : l'une est réservée à l'Apprentissage, la deuxième au Test, et la dernière sur l'ensemble.

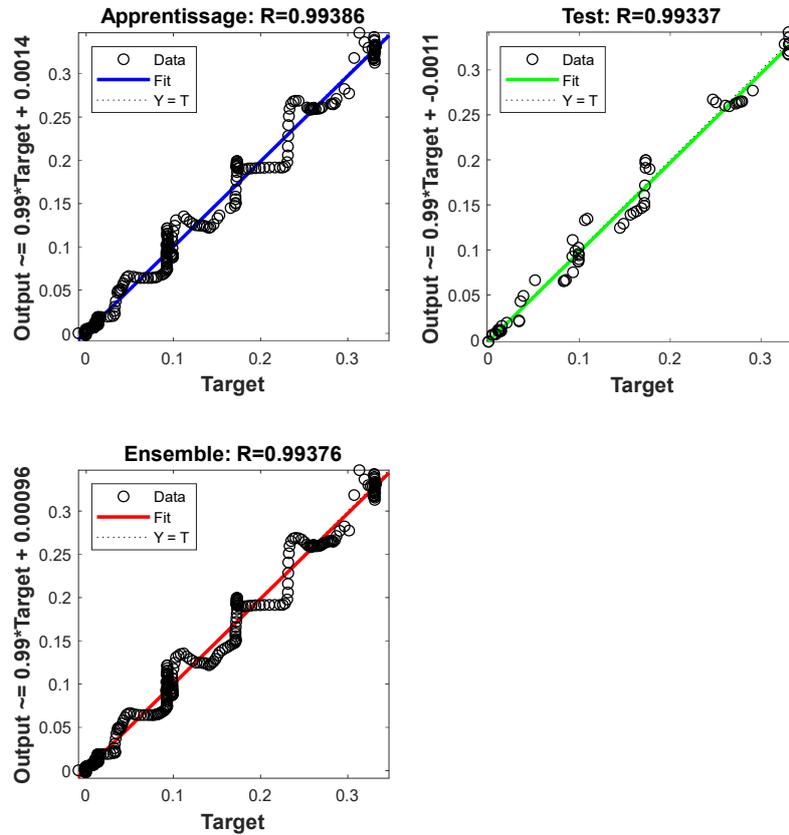


Figure 12: Coefficient de corrélation entre la sortie du modèle et la sortie des données

Le tableau suivant montre les valeurs de R, MSE et RMSE pour chaque étape de la modélisation. Les valeurs déterminent la fiabilité du modèle.

Tableau 2: Validation de modèle Neuro-Flou

	Modèle	R	MSE	RMSE
Neuro-Flou	Apprentissage	0.99386	0.00014854	0.012188
	Test	0.99337	0.00016638	0.012899
	Ensemble	0.99376	0.0001521	0.012333

Le modèle obtenu par le système Neuro-flou est performant avec la valeur de corrélation égale à 0.99386 sur la phase d'apprentissage et 0.99337 sur la phase test. D'après le tableau 2, lorsque l'on compare la valeur RMSE à la valeur réelle, on observe une différence minimale par rapport aux autres cas. Cela indique que les résultats de la modélisation sont satisfaisants, les erreurs sont très faibles.

#### IV. Conclusion

Nous avons réalisé des simulations détaillées de l'érosion de la côte Sud-Est de Madagascar en nous concentrant particulièrement sur l'étude bathymétrique de cette zone. Nos objectifs sont de comprendre les mécanismes fondamentaux régissant les mouvements des fonds marins. Nos résultats ont révélé plusieurs conclusions importantes, surtout sur les quatre points relevés : A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub>, A<sub>4</sub>. Nous avons observé la variation du fonds marins en utilisant les moyennes annuelle, mensuelle, et journalière des données traitées avec le logiciel Mike Zero.

L'utilisation du système neuro-flou ANFIS pour la modélisation de l'érosion de la côte Sud-Est de Madagascar nous permet d'obtenir du modèle fiable et exploitable selon la bathymétrie.

#### RÉFÉRENCE :

- [1] Benedicte T Borgersen, June 2016 : « Numerical Modelling of Arctic Coastal Hydrodynamics and Sediment Transport ».
- [2] Sorensen, R. M., 1997. Basic coastal engineering. Springer science + Business media B.V.
- [3] DHI Water and Environment, 2012a, MIKE 21& MIKE 3 FLOW MODEL FM: Hydrodynamic and Transport Module Scientific Documentation, DHI, Agem Alle 5, DK-2970 Hersholm, Denmark.
- [4] DHI Water and Environment, 2012b, MIKE 21: Spectral Wave Module Scientific Documentation, DHI, Agem Alle 5, DK-2970 Hersholm, Denmark.
- [5] DHI Water and Environment, 2012c, MIKE 21: Sand Transport Module Scientific Documentation, DHI, Agem Alle 5, DK-2970 Hersholm, Denmark.
- [6] Susanna Nurdjaman Vol. 24 No. 3 Desember 2017: "Numerical Simulation of Bed Level Changes Around Structure Due to Waves and Current".
- [7] Zacharie Sirabahenda, (2012): « Modélisation numérique du transport des sédiments en suspension dans une rivière en aménagement: Cas de la Rivière-aux-Sables au Québec »
- [7] ZENGUI Abed Elkamel KASMI Abd Elalim (Juin 2022) : « Application des systèmes neuro-flous pour l'étude des isolateurs de haute tension ».
- [8] Salim Heddami, Abdelmalek Bernad and Nouredine Dechimi, Novembre 2012, « Modélisation de la dose de coagulant par les systèmes à base d'inférence floue (ANFIS) application à la station de traitement des eaux de Boudouaou (Algérie) ».