

# *Modélisation Du Transport De Sédiment Entre Côte Namakia Et Nosy Makamby (Région Boeny, Partie Nord-Ouest De Madagascar)*

## *[Modeling Of Sediment Transport Between The Namakia Coast And Nosy Makamby (Boeny Region, Northwestern Madagascar)]*

MAHAFONJA Natolodraza Ferlot<sup>1</sup>, RANDRIANARISON Hervais Dieu Donné<sup>2</sup>, RATSIMAVO Jacques Chrysologue<sup>3</sup>, RANDRIANANTENAINA Jean Eugène<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>1,3,4</sup>Université de Toliara Madagascar

<sup>2,5</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>rjeandria02@yahoo.fr,

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



**Résumé :** L'objectif de ce travail consiste à analyser le transport du sédiment dans la zone partie Nord-Ouest de Madagascar de côte Namakia vers Nosy Makamby région Boeny. Nous avons utilisé modèle couplé de MIKE 21/3 FM, qui intègre trois modules : l'hydrodynamique, le modèle spectral des vagues et le transport des sédiments, pour cette analyse avec les paramètres : vitesse de vent, vitesse de courant marin et hauteur des vagues. Les données de simulations obtenues avec ces paramètres sont introduites dans le système d'intelligence artificielle neuro-flou ANFIS pour modéliser la quantité de sédiment transportée et son évolution. Le résultat de la modélisation nous permet d'obtenir du modèle fiable et exploitable selon l'intensité du vent, le courant marin et la hauteur des vagues.

**Mot clé :** Sédiment, vent, courant marin, hauteur des vagues, modélisation

**Abstract :** The objective of this study is to analyze sediment transport in the northwestern coastal area of Madagascar, from the Namakia coast to Nosy Makamby, in the Boeny region. For this analysis, we used the coupled MIKE 21/3 FM model, which integrates three modules: hydrodynamics, spectral wave modeling, and sediment transport. The model was applied using three key parameters: wind speed, ocean current speed, and wave height. The simulation data obtained with these parameters were then fed into the ANFIS neuro-fuzzy artificial intelligence system to model the quantity of transported sediment and its evolution over time. The results of the modeling process enabled the development of a reliable and operational model, adaptable to variations in wind intensity, marine currents, and wave height.

**Keywords:** Sediment, wind, marine currents, wave height, modeling

## I. Introduction

L'hydrodynamique côtière correspond au comportement physique des mouvements dans les zones côtières, ce qui inclut les vagues, les courants, les marées et le vent, ainsi que leur comportement dans un environnement côtier [1]. L'objectif de ce travail consiste à analyser le transport de sédiment dans la partie Nord-Ouest de Madagascar : côte de Namakia vers Nosy Makamby. Nous avons utilisé le Logiciel MIKE couplé pour simuler les paramètres afin de comprendre les résultats obtenus, c'est-à-dire la quantité de sédiments transporté. Après les analyses statistiques, les données de simulations obtenues avec ces paramètres sont introduites dans le système d'intelligence artificielle neuro-flou ANFIS pour modéliser la quantité de sédiment transportée et son évolution. Le but de cette modélisation est d'obtenir un bon modèle éprouvé avec les paramètres de l'intensité du vent, du courant marin et de la hauteur des vagues.

## II. Matériels et Méthodes

### II.1 Présentation de zone d'étude

Notre zone d'étude s'étend sur la côte Nord-Ouest de Madagascar, précisément dans la commune de Namakia Majunga. Elle est délimitée par les coordonnées géographiques suivantes : latitude Sud 15°44'25'' à 15°46'32'' et longitude Est 45°52'11'' à 45°54'51''. (Figure 1).



Figure 1 : Zone d'étude dans la côte Namakia vers Nosy Makamby de région Boeny

### II.2 Méthodologie

Le module hydrodynamique et le module des vagues spectrales sont les composants de calcul de base du modèle couplé MIKE 21/3 FM. En utilisant le modèle couplé MIKE 21/3 FM, il est possible de simuler l'interaction mutuelle entre les vagues et les courants grâce à un couplage dynamique entre le module hydrodynamique et le module des vagues spectrales [3] [6].

Le modèle hydrodynamique basé sur les équations bidimensionnelles des eaux peu profondes sont obtenues en supposant une répartition de la pression hydrostatique et en intégrant les équations de Navier-Stokes sur la profondeur de l'eau.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y} = fhv - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_A}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} - \frac{\tau_{fx}}{\rho_0} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - F_{vx} + \frac{\partial hT_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial hT_{xy}}{\partial y}$$

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hvu}{\partial x} + \frac{\partial hv^2}{\partial y} = fhu - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_A}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} - \frac{\tau_{fy}}{\rho_0} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - F_{vy} + \frac{\partial hT_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial hT_{yy}}{\partial y}$$

$t$  représenter le temps (s),  $x$  et  $y$  sont les coordonnées cartésiennes (m) ;

$h = \eta + d$  : Profondeur totale de l'eau (m) ;

$\eta$ : élévation de la surface (m) et  $d$  est profondeur de l'eau au repos (m);

$u, v$ : sont les composantes de la vitesse moyennée en profondeur dans les directions des axes  $x$  et  $y$  (m/s) ;

$f = 2\Omega \sin\Phi$  : est le paramètre de Coriolis ( $\Omega$  est la vitesse angulaire de rotation ( $s^{-1}$ ) et  $\phi$  la latitude géographique) ;

$g$  : Accélération gravitationnelle ( $9,8 \text{ m/s}^2$ ) ;

$p_A$  : est la pression atmosphérique à la surface libre ( $\text{kg/m/s}^2$ );

$\rho$  : Densité de l'eau de mer ( $\text{kg/m}^3$ ) ;  $\rho_0$  est la densité de référence de l'eau ;

$(\tau_{fx}, \tau_{fy})$  sont les composantes suivant  $x$  et  $y$  des contraintes dues au frottement de fond, au frottement de surface et à la résistance à l'écoulement ;

$(\tau_{sx}, \tau_{sy})$  sont les composantes en  $x$  et  $y$  des contraintes dues surface dues au vent;

$F_r = (F_{rx}, F_{ry})$  est la force de traînée due à la végétation ;

Les contraintes latérales  $T_{xx}, T_{xy}$  et  $S_{yy}$  incluent le frottement visqueux, le frottement turbulent et l'advection différentielle. Elles sont estimées en utilisant une formulation de viscosité turbulente basée sur les vitesses moyennées en profondeur.

$$T_{xx} = 2\nu \frac{\partial u}{\partial x} \quad T_{xy} = \nu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad T_{yy} = 2\nu \frac{\partial v}{\partial y}$$

Dans le modèle des vagues spectrale, les vagues de vent sont représentées par le spectrale de densité de d'action des vagues  $N(\sigma, \theta)$ , 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 [3][4] :

$$N = \frac{E}{\sigma} \quad (2)$$

$N$ : Densité d'action des vagues ;

$E$ : Énergie des vagues ;

$\sigma$ : Fréquence angulaire relative.

Le dernier modèle concerne le transport de sédiment et changement de forme du lit. L'élévation locale du fond  $Z_b$  peut être calculée en résolvant l'équation de conservation de la masse de sédiments [8]. En deux dimensions, cela peut s'écrire comme suit :

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ (1 - n)z_b + \int_{z_b}^{\eta} cdz \right] + \left( \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) = 0$$

où  $z_b$  est l'élévation du niveau du lit, définis comme positifs à partir d'une donnée fixe ;

$x$  et  $y$  sont les coordonnées spatiales horizontales,  $t$  est le temps et  $n$  est la porosité du lit ;

$\eta$  est l'élévation de la surface libre ;

$c$  est la concentration de sédiments en suspension dans la colonne d'eau par unité de surface et  $q_x$  et  $q_y$  sont les taux de transport volumétriques totaux des sédiments (unité :  $m^3/sec$ ) dans les directions  $x$  et  $y$ .

### III. Résultats et discussion

#### III.1. Représentation de la Bathymétrie et le Maillage dans le Nosy Makamby Mahajanga

La figure 2 représente la bathymétrie et le maillage de la zone étudiée, située près de Nosy Makamby, en mettant en évidence les différentes profondeurs marines. Ce maillage, constitué de 819 nœuds et de 1325 éléments, permet une meilleure représentation des détails morphologiques de la zone d'étude. Les couleurs utilisées permettent de distinguer les niveaux de profondeur : la couleur orange indique une profondeur inférieure à 0,6 mètre, la couleur jaune correspond à des profondeurs comprises entre 0,8 mètre et 1,2 mètre, tandis que la couleur violette marque la profondeur maximale de la zone, atteignant 5,6 mètres. Par ailleurs, d'autres couleurs visibles sur la figure reflètent le niveau de la mer.

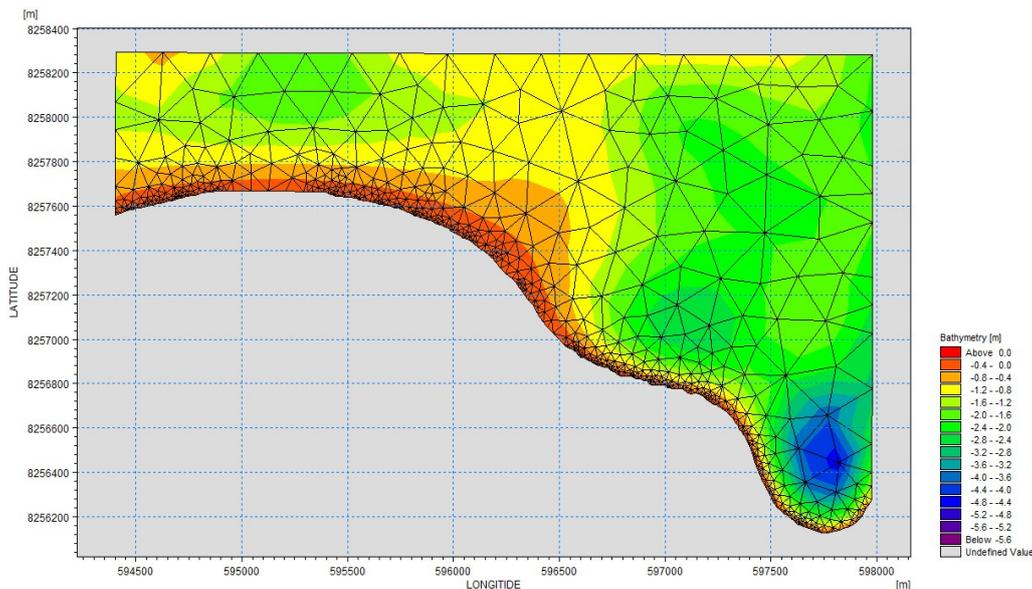


Figure 2. Représentation de la bathymétrie et le maillage de la zone étudiée

#### III.2. Représentation des résultats de simulation

##### III.2.1. Représentation de la vitesse de vent dans la partie Nord-Ouest de Madagascar de région Boeny

La figure 3 représente de vitesse du vent à la partie Nord-Ouest de Madagascar. La vitesse du vent varie considérablement tout au long de l'année, alternant entre des périodes de forte intensité, notamment au milieu de l'année, et d'autres plus calmes. À partir du mois de Septembre, une nette diminution de la vitesse du vent est observée. En Octobre et Novembre, les variations

deviennent moins marquées, avec des valeurs souvent inférieures à 2 m/s. En Décembre, les vitesses diminuent encore, atteignant des valeurs proches de 1 m/s, indiquant une période plus calme.



Figure 3: Représentation de la vitesse de vent dans la Région Boeny

### III.2.3. Vitesse de courant dans la côte Namakia vers Nosy Makamby Mahajanga

La vitesse de courant sur la côte de la zone d'étude atteint des valeurs maximales de 0.082 m/s avec une valeur moyenne proche de 0.050 m/s. la figure ci-dessous représente le profil de cette vitesse en utilisant la moyenne journalière pendant 11 ans.

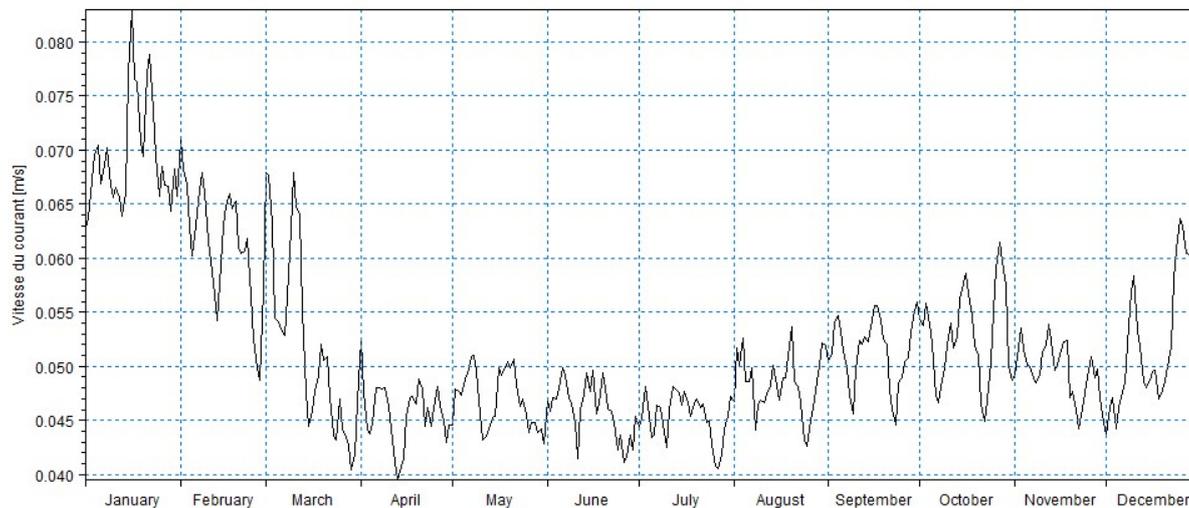


Figure 4 : Variation de vitesse du courant dans la côte Namakia vers Nosy Makamby

### II.2.4. Hauteur du vague dans la côte Namakia vers Nosy Makamby

La figure suivante montre la moyenne de la hauteur des vagues dans la région Nord-Ouest de Madagascar (Boeny). La courbe représente le niveau de la moyenne climatologique journalière des vagues pendant 11 ans (2010-2020). Presque le mois de Janvier jusqu'au mois de Février, la hauteur des vagues sont très hautes ( $H_{m0}=0.42$  m en mois de Janvier et  $H_{m0}=0.35$  m au début du mois de Février). Ensuite, au début du mois de Mai jusqu'au mois de Décembre, la hauteur des vagues est stable : entre 0.1 et 0.3 m.



Figure 5 : Hauteur de vague dans la la côte Namakia vers Nosy Makamby Mahajanga

### III.3. Variation de la quantité de sédiment transportée

La bathymétrie a été simulée par MIKE 21/3 FM, à partir de laquelle les données d'étude ont été extraites. La simulation a été réalisée sur une période de 11 ans, avec des données collectées à chaque mois. Le point D a été choisi pour la suite de l'analyse car il permet d'observer les variations de la quantité de sédiment transportée dans cette zone.

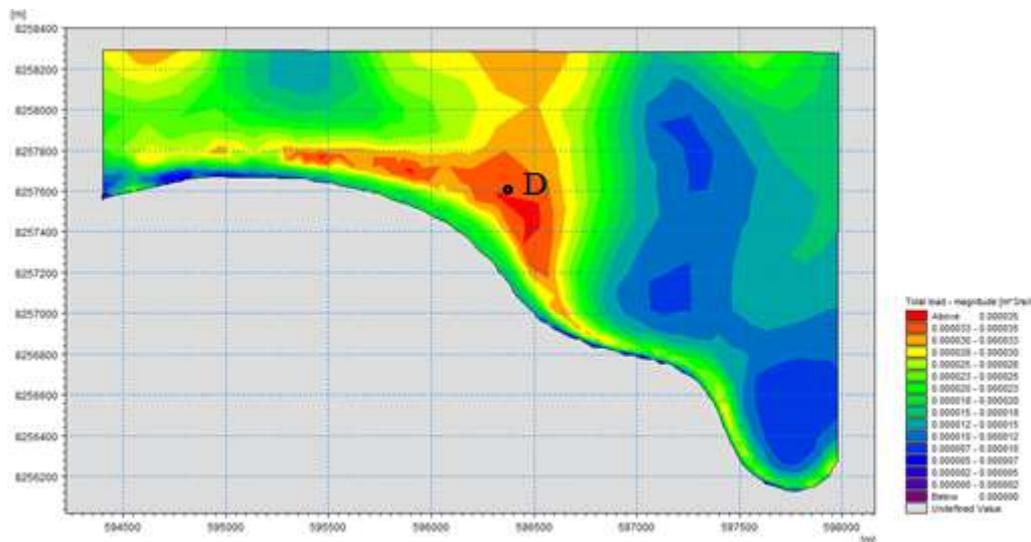


Figure 6. Représentation de la quantité de sédiment transporté

Après les simulations, nous avons recueilli des données concernant la quantité de sédiment transportée observée lors de l'évolution du sable sous l'eau. Ainsi, les données collectées sont des données temporelles qui sont ajustées et transformées en

moyenne journalière, mensuelle et annuelle. Cette transformation est calculée comme une moyenne climatologique. Les données sur une période de 11 ans, de 2010 à 2020, ont été analysées.

### III.3.1. Moyenne journalière de quantité de sédiment transporté pendant onze ans dans le point d'étude

La courbe ci-dessous représente la moyenne climatologique journalière sur une période de 11 ans. Un pic très marqué est observé autour du 50<sup>ème</sup> jour, où la quantité atteint près de  $4,5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , après avoir fortement oscillé entre  $1 \times 10^{-5}$  et  $2,5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ . Après ce pic, une diminution rapide ramène la quantité à environ de  $0,5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , suivie d'une relative stabilité avec de légères augmentations progressives jusqu'à la fin de l'année, où une légère remontée est visible autour du 350<sup>e</sup> jour.

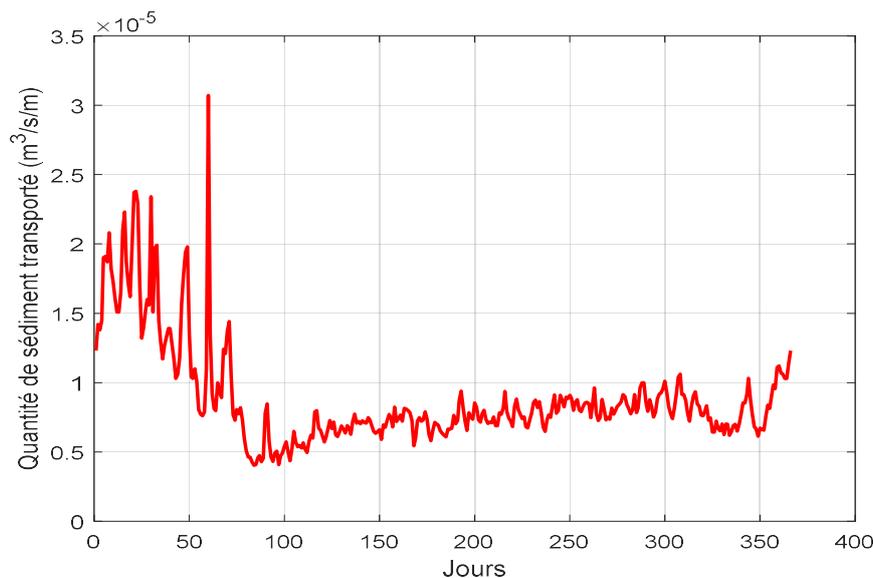


Figure 7. Moyenne journalière de quantité de sédiment transportée pendant onze ans

### III.3.2. Moyenne mensuelle de quantité de sédiment pendant onze ans sur le point d'étude

La représentation graphique donne la moyenne mensuelle de la quantité de sédiment transportée sur une période de 11 ans, mettant en évidence une forte sédimentation le mois de Janvier, atteignant  $1,8 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ . Ensuite, elle diminue jusqu'au mois d'Avril, atteignant  $0,5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ . Entre le mois d'Avril et Octobre, la quantité de sédiments reste relativement stable, variant entre  $0,5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  et  $0,84 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ . À partir du mois de Novembre, une augmentation progressive est observée jusqu'au début du mois de Février.

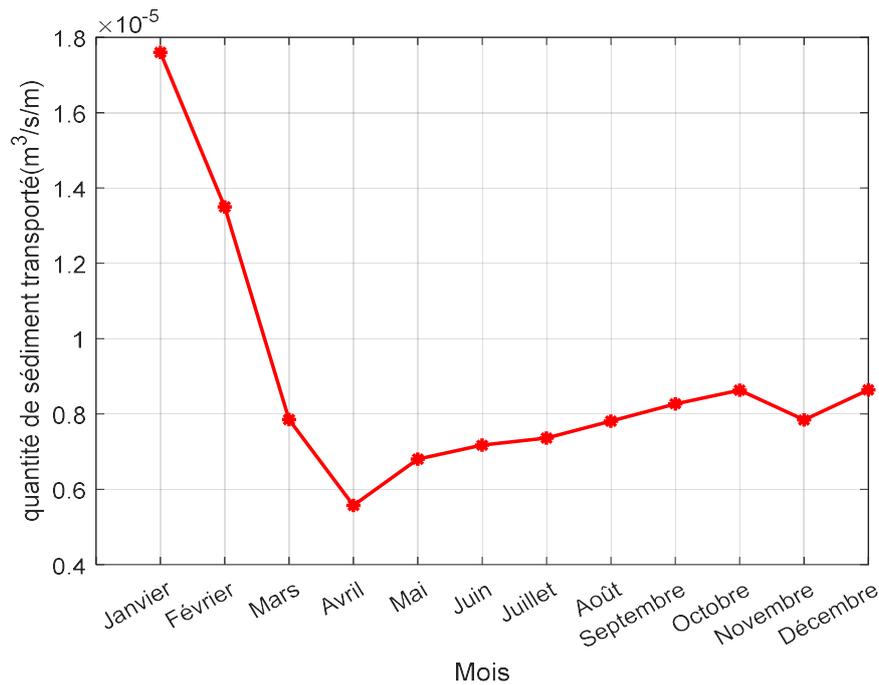


Figure 8. Moyenne mensuelle de la quantité de sédiment transportée pendant onze ans

### III.3.3. Moyenne annuelle de quantité de sédiment pendant onze ans sur le point d'étude

La courbe ci-dessous représente la moyenne annuelle de la quantité de sédiment transportée sur une période de 11 ans. La quantité de sédiment est relativement stable autour de  $8 \cdot 10^{-6} m^3/s/m$  en 2010 et 2011, puis elle connaît une forte augmentation en 2012, atteignant un pic à environ  $10,7 \cdot 10^{-6} m^3/s/m$ , avant de diminuer significativement en 2013 pour descendre au-dessous de  $8,4 \cdot 10^{-6} m^3/s/m$ . Une nouvelle montée est observée entre 2013 et 2015, suivie d'une chute marquée en 2016, puis d'une légère augmentation de 2017 à 2020, bien que les valeurs restent inférieures aux pics atteints en 2012 et 2015.

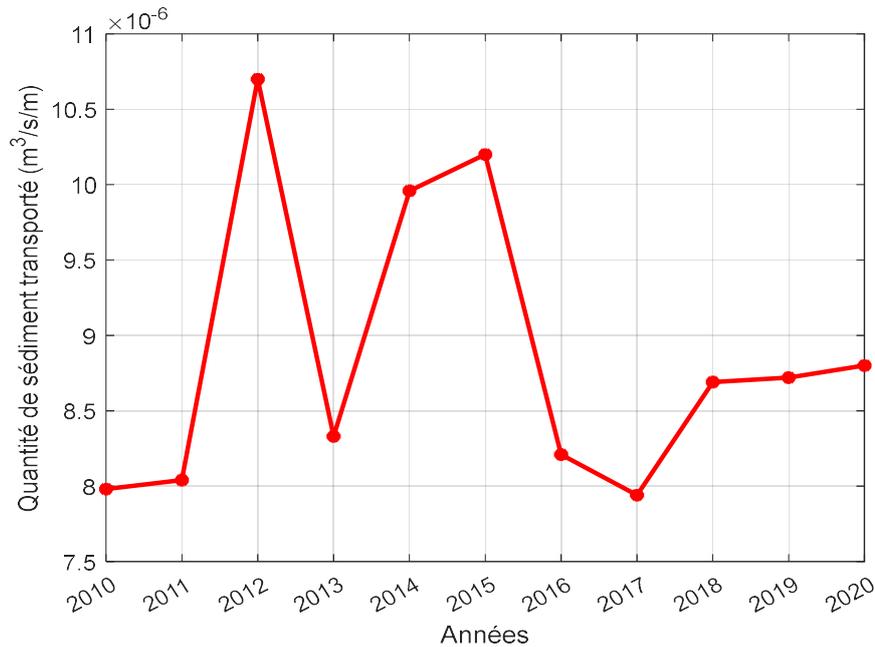


Figure 9. Moyenne annuelle de la quantité de sédiment transportée pendant onze ans

Généralement, de Décembre à Mars, pendant la saison des pluies (été) dans le Nord-Ouest de Madagascar, la mer monte. Cette élévation est due à l'apport d'eau de pluie, qui entraîne également l'érosion et le transport de sable de la terre vers la mer, augmentant ainsi la quantité de sable sous-marine.

#### III.4. Modélisation de résultats de simulation par Neuro-flou

Nous avons utilisé le système neuro-flou ANFIS avec le logiciel Matlab pour modéliser la quantité de sédiment transportée au niveau du point d'étude noté D. Nous avons introduit les données de simulation avec le logiciel MIKE pour établir ce modèle. Ces données concernent la vitesse du vent, la vitesse du courant marin, la hauteur des vagues et la quantité de sédiment transporté, connus pendant 11 ans : 2010 à 2020.

Nous avons opté pour un système d'inférence floue de type Sugeno qui utilise trois entrées : Vitesse du vent, vitesse du courant et hauteur des vagues. Les 3 entrées représentent les moyennes climatologiques journalières sur une période de 366 jours. À la sortie, une seule variable est générée, indiquée par la quantité de sédiment transporté selon la figure ci-dessous :

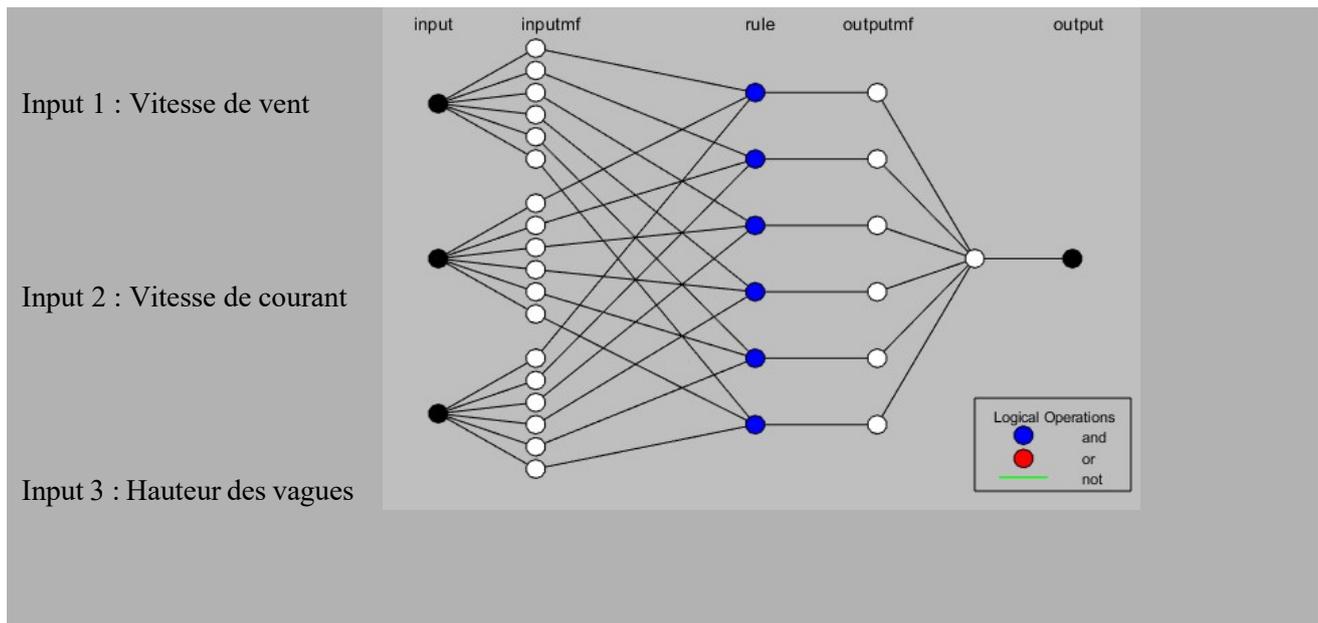


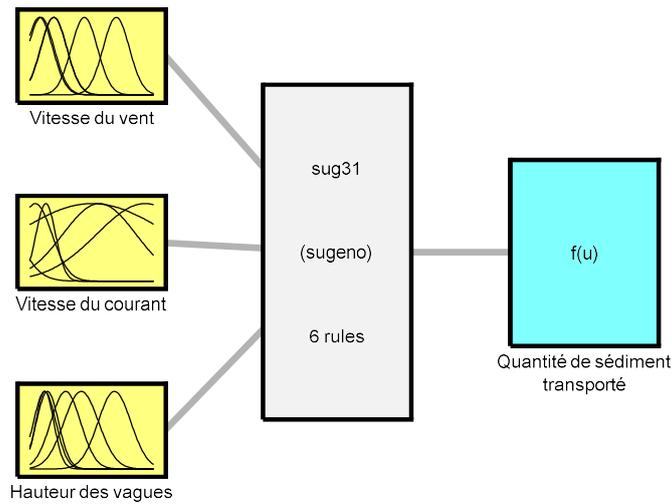
Figure 10 : Structure du système neuro-flou à trois entrées (Matlab)

Le tableau suivant décrit les couches cachées à chaque phase lors de l'analyse par le système ANFIS

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	$3 \times 6 = 18$
Couche 2	Les règles	6
Couche 3	La normalisation	6
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 11.



System sug31: 3 inputs, 1 outputs, 6 rules

Figure 11 : Structure de la logique floue dans ANFIS (Matlab)

#### III.4.1. 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 dans la figure 13, nous utilisons 80 % des valeurs journalière de la quantité de sédiment transporté, 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. Les données ont été permutées pour améliorer la qualité d'entraînement. Cette figure permet de voir l'entraînement du modèle. On trouve une correspondance étroite entre l'estimation et les valeurs réelles : la courbe en rouge c'est superposé avec la courbe en noir. Cette superposition montre l'apprentissage de bonne performance.

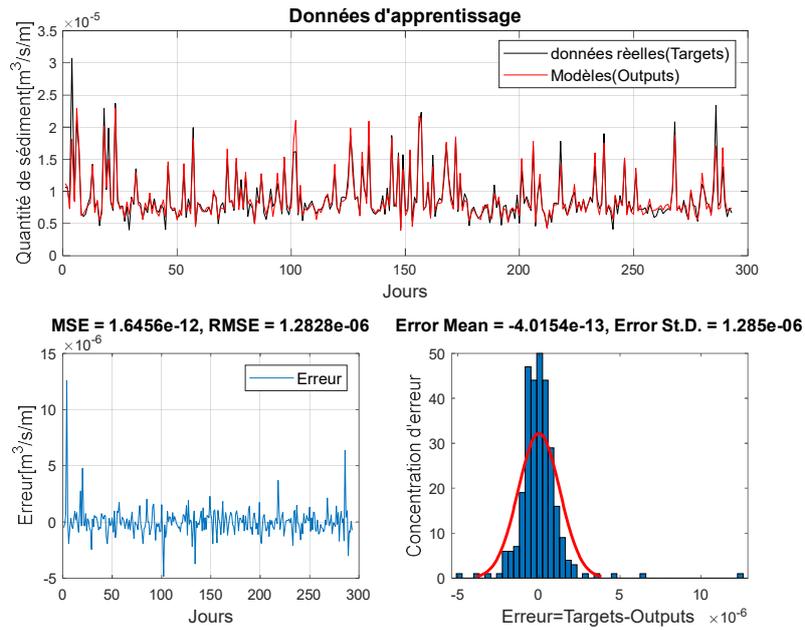


Figure 12 : Représentation de l'apprentissage du modèle

La figure suivante représente les résultats du modèle par le système ANFIS sur les données de test c'est-à-dire le 20% restant des données. Les données sont encore perméées. On trouve la superposition sur les données réelles (courbe en noir) et les données prédiction.

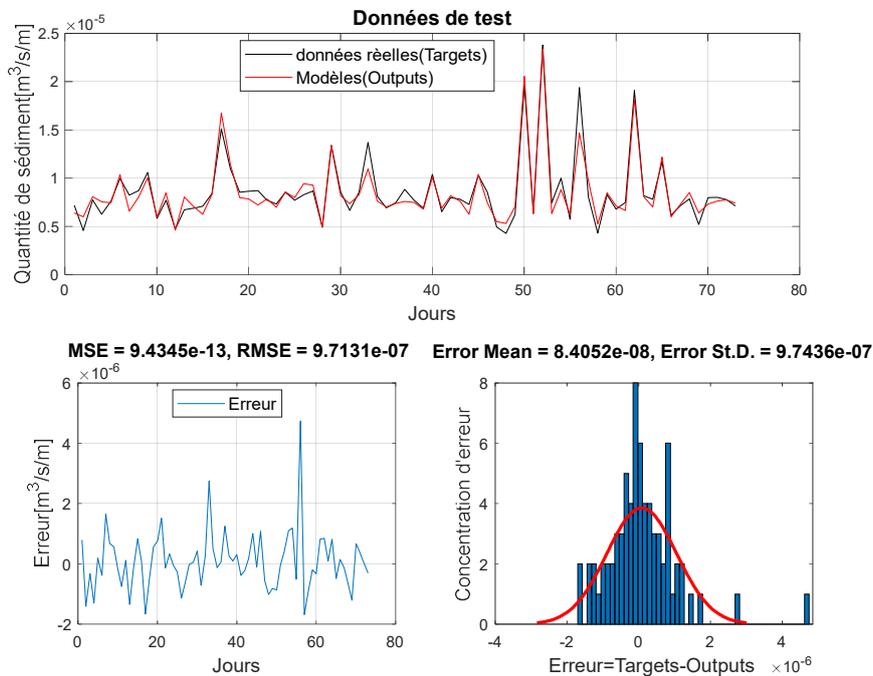


Figure 13 : Représentation de la phase de test

La figure 14 suivante regroupe l'ensemble des données, incluant les données d'entraînement et de test, afin d'évaluer globalement la performance du modèle sur l'ensemble des données. Ces données ne sont plus perméées. Les résultats obtenus ont montré des superpositions entre les deux courbes, ce qui indique que le modèle est acceptable et capable de généraliser correctement des données inconnues.

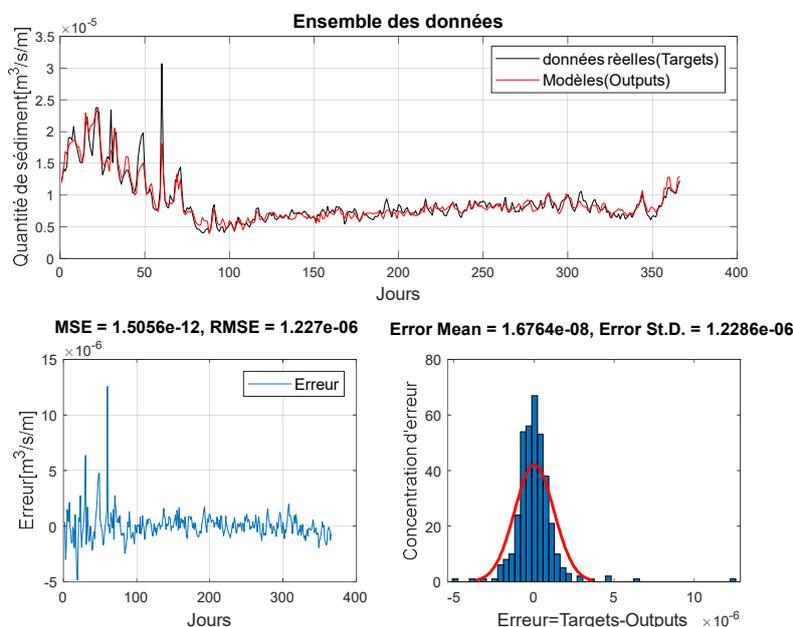


Figure 14 : Représentation d'ensemble des données

### III.4.5 Validation du modèle

Les résultats des coefficients de corrélations (R) sont illustrés dans la figure 15. 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.

L'écart entre les points et ligne de régression dans cette figure de corrélation offre une indication de la précision du modèle, tant sur l'ensemble d'entraînement que sur l'ensemble de test. Ces graphiques de régression fournissent une représentation visuelle de la quantité des prédictions du modèle. Une concentration des points autour de la ligne de régression idéale, associée à un coefficient de détermination R élevé, témoigne de la performance robuste du modèle. Nous pouvons conclure que le modèle démontre une performance fiable.

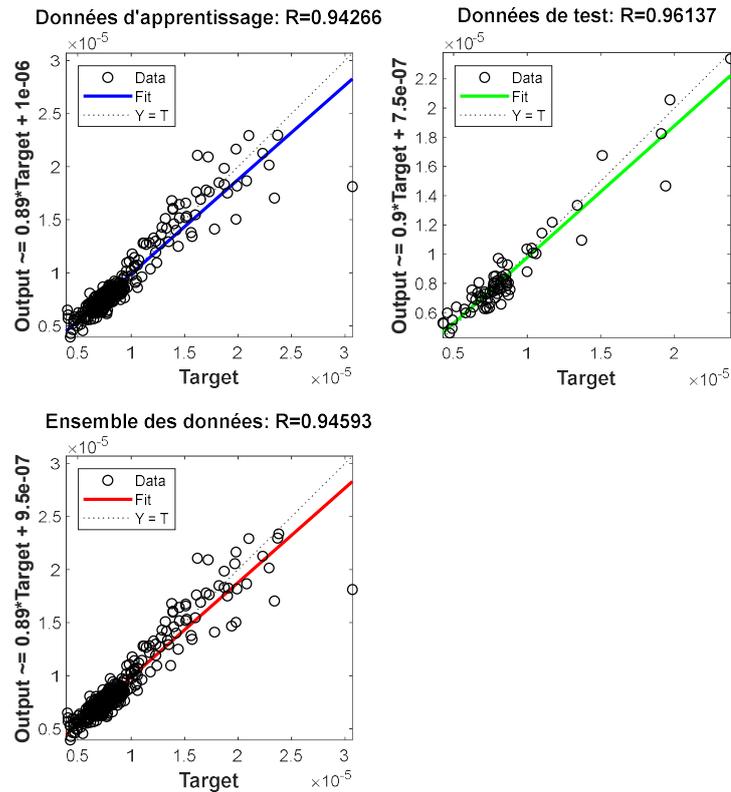


Figure 15 : Corrélation entre la quantité de sédiment transporté calculé et la sortie du modèle (Matlab)

Le tableau suivant présente les valeurs des erreurs, MSE (Erreur quadratique moyenne) et RMSE (Racine de l'erreur quadratique moyenne) pour chaque étape de la modélisation et le coefficient de corrélation R pour observer la fiabilité de la modélisation.

Tableau III. 3: Validation du modèle obtenu

	Phase	R	MSE	RMSE
Neuro-Flou	<b>Apprentissage</b>	0.94266	1.6456e-13	1.2828e-07
	<b>Test</b>	0.96137	9.4345e-13	9.7131e-07
	<b>Ensemble</b>	0.94593	1.5056e-12	1.227e-07

Le modèle obtenu par le système neuro-flou est performant avec la valeur de corrélation égale à 0.94266 sur la phase d'apprentissage et 0.96137 sur la phase test. D'après le tableau III-3, 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 recherche sont satisfaisants, car l'erreur est extrêmement faible.

## Conclusion

Le travail consiste à analyser le transport de sédiment dans la partie Nord-Ouest de Madagascar : cote de Namakia vers Nosy Makamby. Nous avons utilisé le Logiciel MIKE pour cette analyse avec les paramètres : vitesse de vent, vitesse de courant marin, Hauteur des vagues. Les données de simulations obtenues avec ces paramètres sont introduites dans le système d'intelligence artificielle neuro-flou ANFIS pour modéliser la quantité de sédiment transportée et son évolution. Le résultat de la modélisation nous permet d'obtenir du modèle fiable et exploitable selon l'intensité du vent, le courant marin et la hauteur des vagues.

## Référence :

- [1] Benedicte T Borgersen, June 2016 « Numerical Modelling of Arctic Coastal Hydrodynamics and Sediment Transport ».
- [2]Cornelis Boudewijn Vreugdenhill, Octobre 1994. Numerical\_Methods\_for\_Shallow\_Water\_Flow
- [3] DHI Water and Environment, 2017, MIKE 21/3Coupled Model FM:coupling of the Flow, Wave and process Modules, 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] DHI Water decision MIKE 21 Flow Model FM Hydrodynamic and transport module scientific Documentation, Agem Alle 5, DK-2970 Hersholm, Denmark
- [7] Susanna Nurdjaman Vol. 24 No. 3 Desember 2017: “Numerical Simulation of Bed Level Changes Around Structure Due to Waves and Current”.
- [8] Yun-Chih Chiang<sup>1</sup> and Sung-Shang Hsiao<sup>2</sup> <sup>1</sup>Tzu Chi University, <sup>2</sup>National Taiwan Ocean University Taiwan. « Coastal Morphological Modeling ».]