ResearchGate

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: https://www.researchgate.net/publication/362889333

Bathymétrie, évaluation de la sédimentation et du recul des berges dus à l'érosion sur l'Île de Mateba au Kongo central en République Démocratique du Congo

Article · August 2022

CITATIONS
0

READS
25

3 authors, including:



Raymond Lumbuenamo
World Bank
15 PUBLICATIONS **161** CITATIONS
SEE PROFILE



Elie Nsimba Ngembo
Privée
6 PUBLICATIONS **1** CITATION
SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:

Anthropogenic disturbance and their impact on protected areas Landscape, PNKB case study View project

All content following this page was uploaded by Elie Nsimba Ngembo on 24 August 2022.

The user has requested enhancement of the downloaded file.

Revue Africaine d'Environnement et d'Agriculture
2021; 4(4), 2-15
http://www.rafea-congo.com
ISSN (Print) : 2708-7743 **eISSN** : 2708-5422 **Dépôt légal** : JL 3.01807-57259

Bathymétrie, évaluation de la sédimentation et du recul des berges dus à l'érosion sur l'Île de Mateba au Kongo central en République Démocratique du Congo

Raymond Lumbuenamo Sinsi[1]*, Eric Lutete Landu[1], Grace Nkambu Matoko[2], Elie Nsimba Ngembo[1]

[(1)]Université de Kinshasa. Faculté des Sciences Agronomiques. Département de Gestion des Ressources Naturelles. BP 117 Kinshasa XI (RDC). E-mail : raysinsilumbuenamo@gmail.com
[(2)]Observatoire des Forêts d'Afrique Centrale (OFAC/RDC). Kinshasa (RDC)

Reçu le 28 septembre 2021, **accepté** le 27 octobre 2021, **publié en ligne** le 30 octobre 2021

RESUME

Description du sujet. Les espaces côtiers en République Démocratique du Congo (RDC) sont en train de perdre leur fonctionnalité écologique et économique. A cet effet, dans la province du Kongo central, l'Île de Mateba, située dans le bief maritime du Fleuve Congo est menacée par les érosions et la perturbation des habitats de la biodiversité. Les menaces que subit cette île impactent négativement sur l'organisation et le fonctionnement de son écosystème. C'est dans ce contexte que cette étude a été initiée.
Objectif. L'objectif de l'étude est de contribuer à la gestion durable de l'Île de Mateba et de la zone divagante du bief maritime du fleuve, en cherchant à : (i) cartographier les différents facteurs de la dégradation de l'Île de Mateba à l'aide l'outil SIG, (ii) localiser les zones de cette Île susceptibles de produire les sédiments (iii) établir la carte de sensibilité potentielle à l'érosion, (iv) proposer des pistes des solutions pour protéger le site.
Méthodes. L'indice de la végétation par différence normalisée de l'Île a été évalué pour caractériser l'occupation du sol. La bathymétrie (mesure de la profondeur des fonds marins) a été étudiée pour les années 1990 et 2013. La granulométrie a été analysée en vue d'étudier l'ensablement de la zone. Une projection de la perte de superficie de l'Île a été également effectuée.
Résultats. Il a été révélé dans cette étude que 8,02 km^2 des sols de l'Île de Mateba ont été perdus entre 1988 et 2013 alors que 40 007 923,47 m^3 de sédiments ont été accumulés. Les facteurs retenus comme responsables de l'ensablement et du recul des berges sont les facteurs hydrodynamiques, le batillage, la texture des berges, les alluvions charriés par le fleuve et les activités anthropiques.
Conclusion. Cette étude a révélé que la pression démographique et hydrodynamique est croissante. Les éboulements de bourges augmentent la sédimentation de zone divagante de l'Île. L'analyse des caractéristiques géologiques de l'Île de Mateba combinée aux résultats de cette étude est souhaitable en vue de mettre en place des cartes de risque à l'érosion, indispensables pour assurer le suivi et la surveillance de la dynamique des berges et du changement du couvert végétal.

Mots-clés: Télédétection, érosion côtière, bathymétrie, facteurs hydrodynamiques, Île de Mateba/RDC

ABSTRACT

Bathymetry, evaluation of sedimentation and bank recession due to erosion on Mateba Island in Kongo-central in the Democratic Republic of Congo
Description of the subject. Coastal areas in the Democratic Republic of Congo (DRC) are losing their ecological and economic functionality. To this end, in the province of Kongo-central, Mateba Island, located in the maritime reach of the Congo River is threatened by erosion and disturbance of biodiversity habitats. The threats to this island have a negative impact on the organization and functioning of its ecosystem. In this context that this study was initiated.
Objective. The objective of the study is to contribute to the sustainable management of the Island of Mateba and the wandering zone of the maritime reach of the river, by seeking to: (i) map the various factors of the degradation of the Island of Mateba by the GIS tool; (ii) locate the areas of this Island likely to produce sediments; (iii) establish the map of potential sensitivity to erosion; (iv) suggest possible solutions to protect the site.

Methods. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) of the island was assessed to characterize land use. Bathymetry (measurement of the depth of the seabed) was studied for the years 1990 and 2013. The granulometry in the area was analyzed in order to study the silting up of the area. A projection of the loss of area of the Island was also made.
Results. It was revealed in this study that 8,02 km^2 of the soils of Mateba Island were lost between 1988 and 2013 whÎle that 40,007,923.47 m^3 of sediment was accumulated. The factors considered to be responsible for the silting up and the retreat of the banks are hydrodynamic factors, the wake, the texture of the banks, the alluvium carried by the river and human activities.
Conclusion. This study revealed that demographic and hydrodynamic pressure is increasing in the study area. The landslides increase the sedimentation of the wandering area of the island. The analysis of the geological characteristics of Mateba Island combined with the results of this study is desirable with a view to setting up definitive erosion risk maps, essential to ensure the monitoring and surveillance of the dynamics of the banks and change in plant cover.

Keywords : Remote sensing, coastal erosion, bathymetry, hydrodynamic factors, wake, Mateba Island/DRC

1. INTRODUCTION

Les Îles reparties à travers le monde ont l'image d'un paradis et pourtant, leur lagon bleu azur, leurs récifs coraux et leurs luxuriantes forêts ne sont pas à l'abri des menaces dues aux changements globaux et aux processus érosifs accentués par l'explosion démographique (Barbade, 1994 ; Khuabi, 2014 ; Maleval *et al.*, 2016; Jourdan *et al.*, 2019; Konzi, 2019; Leclerc *et al.*,2020).

En RDC, la détérioration des milieux insulaires s'intensifie à cause du manque d'un cadre réglementaire et les écosystèmes fragiles des milieux insulaires sont sacrifiés au profit de la survie humaine (Barbade, 1994 ; Maleval *et al.*, 2016; Congoénergie, 2017; PNUD, 2020). Les menaces résultant des activités aussi bien anthropiques qu'hydrodynamiques s'attaquent aux berges de la grande Île de Mateba dans la zone divagante du bief maritime du fleuve Congo (Diane, 2000 ; Zohra 2017; Peters *et al.*, 2018).

Dans la Province du Kongo central en RDC, il a été observé sur la grande Île de Mateba une plaine alluvionnaire traversée par le chenal Shiloango et le chenal Mateba. La présence de cette surface plane améliore la vitesse d'écoulement de l'eau et favorise la bonne navigabilité des bateaux dans cette partie du bief maritime du fleuve Congo (Congoénergie, 2017 ; Kasongo *et al.*, 2021). Cependant, cette zone alluvionnaire connaît d'importants mouvements de bancs de sable dus aux faibles courants, à la ramification des chenaux, à la faible profondeur des eaux (Tusse *et al.*, 2021) et aux érosions aussi bien latérales que verticales des berges et des terres environnantes de l'Île de Mateba entrainant ainsi le recul des berges et les éboulements des terres, évalués à des centaines de m^3/an par la Congolaise des Voies Maritimes (CVM en sigle) (MECNT, 2007 ; PNUD, 2020). Cette situation provoque d'une part, le rétrécissement de sa superficie utile pour le pâturage et l'agriculture des communautés locales, et d'autre part, la sédimentation qui aboutit à la formation de larges bancs de sable et des dunes sur la voie navigable ; ce qui ajoute un travail supplémentaire à la CVM qui pourtant, ne dispose pas assez de matériels adéquats à cet effet (CVM, 2012 ; Kasonga *et al*., 2021 ; Tusse *et al*., 2021).

Les érosions répétées des berges occasionneraient le rétrécissement de la surface de sols entourée d'eau en entraînant d'une part, la perte de la biodiversité, la réduction des superficies agricoles et des pâturages, la perte des infrastructures voire des vies humaines, et d'autre part, elles rendraient plus difficile la navigabilité du fleuve (Kasonga *et al*., 2021) et élèverait énormément le coût de son dragage (Tusse et *al*., 2021).

L'objectif de l'étude est de contribuer à la gestion durable de l'Île de Mateba et de la zone divagante du bief maritime du fleuve, en cherchant à : (i) cartographier les différents facteurs de la dégradation de l'Île de Mateba à l'aide l'outil SIG, (ii) localiser les zones de cette Île susceptibles de produire les sédiments (iii) établir la carte de sensibilité potentielle à l'érosion, (iv) proposer des pistes des solutions pour protéger le site.

Cette étude permet d'estimer la dégradation des berges de l'Île de Mateba au Kongo-central en vue d'orienter les actions correctives et de mettre à la disposition des décideurs politiques des partenaires techniques et financiers, des outils utiles pour la gestion durable de cet écosystème.

2. MATERIEL ET METHODES

2.1. Zone d'étude

Située dans la province du Kongo central sur la côte atlantique congolaise entre 12°44'57''à 13° de longitude Est et 5°53' à 5°59' de latitude Sud, l'Île de Mateba présente deux différentes étendues : une partie insulaire (partant de Ntuankulu jusqu'à Puasi) et l'autre, la portion navigable de la zone divagante du bief maritime du fleuve Congo. La

partie insulaire est une portion de terre formée sur la plaine alluvionnaire du bief maritime où l'eau coule dans un large bassin de faible pente. Les fragments de rochers que le fleuve entraîne tombent au fond du lit et y servent de points d'ancrage aux particules terrestres qui, en s'accumulant, finissent par l'exhausser. La figure 1 ci-dessous présente la carte de la zone d'étude.

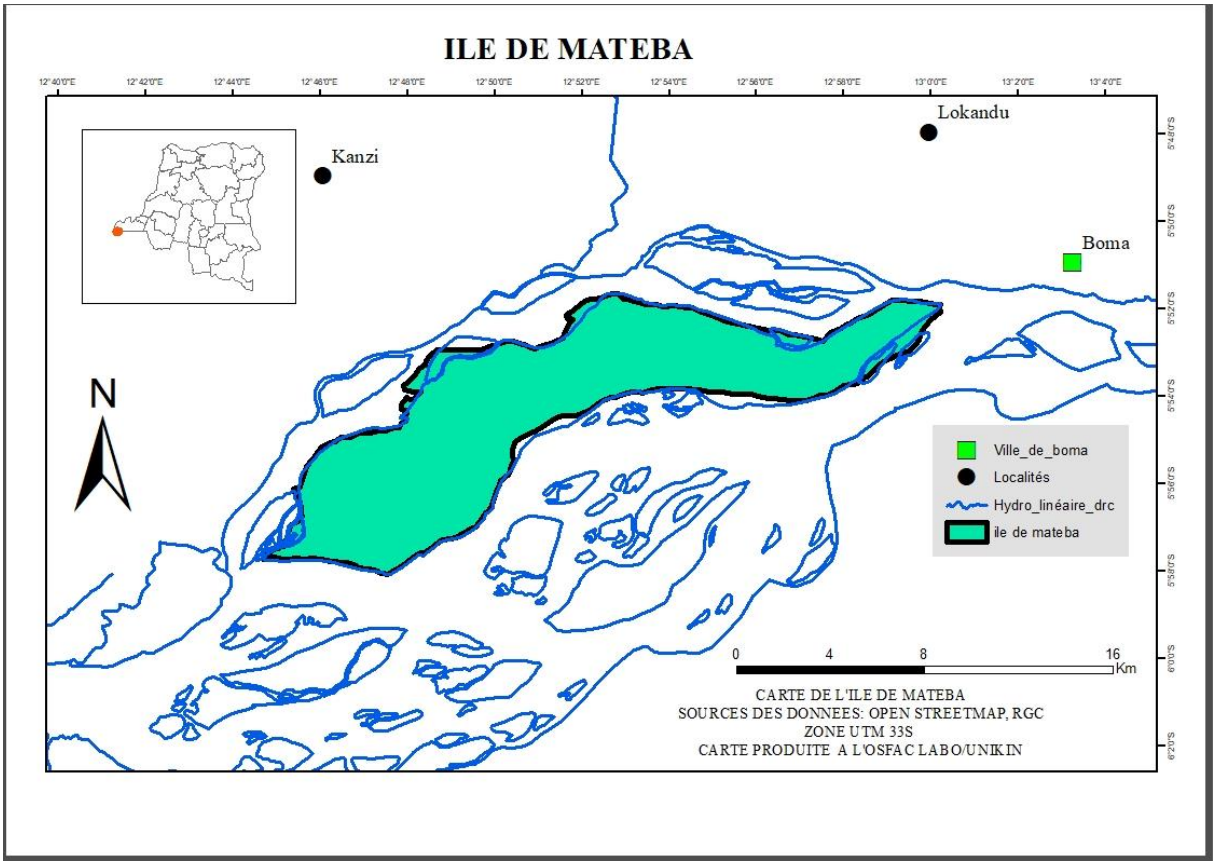


Figure 1. Carte de l'Île de Mateba

Le climat de l'Île de Mateba est caractérisé par une température moyenne annuelle variant entre 22 et 24 ºC, avec de faibles amplitudes thermiques ne dépassant pas 6 °C. L'humidité relative mensuelle y est de l'ordre de 77 à 81 %, alors que les précipitations qui s'étalent d'Octobre à Mai avoisinent en moyenne 772 mm (MECNT, 2007). Les berges de l'Île à 99,9 % naturelles sont instables et ont une hauteur moyenne d'environ 1 m, excepté la partie du flanc Nord-Est où les empierrements posés servent de bouclier, l'ensemble est dépourvu d'aménagements et donc sujet aux érosions par éboulement due à l'affouillement entrainant un rétrécissement de l'Île (Roose, 1994).

La végétation dominante est une savane herbeuse tapissée de *Brachyaria* sp, auquel s'ajoutent *Cynodon Dactylon, Chromolaena Odorata, Hypparrhenia diplandra, Sida acuta, Mimosa* sp, *Tridax procumbens, Boeravia diffusa,* etc. Cette végétation fourragère offre un cadre idéal à l'élevage de bœufs. La strate arborescente est constituée de *Mangifera indica, Andosania digitata* et une abondance d'espèce de *Borassus* sp, *Elaeis guinéensis* et *Cocox nucifera* (MECNT, 2007 ; CVM, 2012; MECNT, 2016).

La riche et importante faune aquatique est représentée par les macro-invertébrés (Mollusques, Arthropodes) et d'une façon saillante par les poissons et les amphibiens (grenouilles), en plus des hippopotames et crocodiles (MECNT, 2007; 2016; Congo énergie, 2017). Cette zone offre d'énormes potentialités halieutiques.

L'Île de Mateba est couverte d'un sol sablonneux de type arénoferral. Ce dernier est peu favorable à l'agriculture, mais se prête mieux à l'élevage, qui s'y pratique depuis 1889 et qui est aujourd'hui poursuivi par l'Entreprise Gros Elevages (GEL). Il y a plusieurs milliers de têtes de bovin (avec la race Mateba résultant du croisement de Hereford, Devon, Africander, Holstein, Shorthorn), de centaines de buffles, de chevaux et quelques têtes d'Okapi (MECNT, 2007).

Le bief maritime du fleuve Congo (CVM, 2012 ; Kasonga *et al*., 2021) est une voie navigable reliant le port international de Matadi à l'océan atlantique ;

elle se subdivise en deux au niveau de Mateba : l'axe Congolais au nord et l'axe Angolais au sud. En effet, ce bief maritime (150 km), allant de Matadi à l'embouchure, comprend le tronçon Matadi-Boma (60 km), une zone divagante qui s'étend de Boma à Malela (60 km) et le tronçon Malela-embouchure (30 km) dans la région de mangrove (CVM, 2012).

La zone divagante, qui intéresse cette étude, est sujette à des phénomènes hydrodynamiques marins tels que les vagues, les marées, les crues, les courants, etc. (Congoénergie, 2017) avec des incidences socio-économiques (Kasonga et *al.*, 2021). Les vagues générées sur ce tronçon sont souvent causées par le passage des navires et les marées, elles même influencées par les fluctuations des eaux en provenance de l'océan atlantique, constituent les deux facteurs les plus importants. Les marées se produisent quatre fois au cours d'une journée, soit deux marées diurnes et deux nocturnes. Pendant les basses eaux, la vitesse d'écoulement varie de 3 à plus ou moins 5 km/h. Par contre, pendant les hautes eaux, elles peuvent atteindre 6 à 8 km/h, les marrées quant à elles sont plutôt semi-diurnes et faibles avec une amplitude moyenne de 0,80 m (MECNT, 2007).

La province du Kongo-central étant la seule porte du pays sur l'océan atlantique, les importations et exportations des biens passent par le bief maritime qui assure la communication entre l'océan et les ports de Boma et de Matadi, via la zone divagante (Kasonga et *al.*, 2021), ce qui fait de cette zone un secteur d'activité de plusieurs entreprises. L'Île de Mateba est occupée par les villages Vula (Bulu), Mateba et Tshongo II de Mateba. Le Cul de Boma comprend également les villages Tshongo I et Tende ainsi que des infrastructures du GEL.

2.2. Méthodes

L'approche méthodologique adoptée a consisté en la collecte des données sur le terrain, l'analyse des données au laboratoire et un entretien-semi structuré. Toutes ces techniques, a permis de comprendre certains paramètres sur l'état de l'Île de Mateba, la bathymétrie, l'occupation du sol et la perte en terres.

Collecte des données

Des échelles limnimétriques et les limnigraphes ont été utilisées pour la détermination du niveau d'eau. Des unités flottantes (canons et bateaux à écho-sondeur) ont permis le déplacement et la collecte des données bathymétriques. Le profil transversal et longitudinal a été fait en utilisant ces données bathymétriques. Les cartes bathymétriques scannées de 1990, 2010 et 2013 de la CVM ont été aussi utilisées. Un GPS de marque Garmin Map 60 a été utilisé pour la collecte des données de référence.

Analyses des données au laboratoire

Cette section présente les différentes analyses effectuées aux laboratoires sur la perte et l'accumulation des sédiments, l'estimation des zones à risques et le calcul de NDVI (Indice de Végétation par Différence Normalisée).

Calcul de la perte et accumulation des sédiments dans le fleuve

A l'issue de la collecte des données sur le terrain, une extraction des nuages des points de profondeurs de 1990 et 2013 par numérisation a été réalisée à partir des cartes bathymétriques anciennes en servant du logiciel arcGis 10.3. Les vides entre ces points ont été comblés par interpolation (Florinsky, 2016 ; Datok ; 2021) qui a permis la production des Modèles Numériques de Terrain (MNT) de deux périodes (Riazanoff, 1989 ; Jacolin *et al.*, 2006 ; Arnaud *et al.*, 2000) en se servant de l'image SRTM 2000. Sur base de ces deux MNT, l'estimation de l'accumulation (sédimentation) et des pertes (érosions verticale) des matériaux dans le fleuve a été ensuite obtenue en calculant la différence de volume de terres entre 1990 et 2013. Enfin, une projection de la surface de l'île a été faite sur base de l'évolution constatée. La formule utilisée pour calculer le volume à un centre des cellules est la suivante :
Volume = (secteur de cellules) * Z, Avec Z = Z avant –Z après avec Z = altitude

Estimation des zones à risque d'érosion sur l'Île

La combinaison de la couche d'occupation des sols obtenue par classification d'image sous le logiciel ENVI ainsi que celle de la pente issue de l'image SRTM (Landsat 7 de 30 m de résolution pour l'année 1988 et 2013), a permis de donner des indications sur le degré de vulnérabilité de la zone et informer sur les sites potentiellement exposés au risque d'érosion.

La comparaison des résultats de Mateba avec la situation en amont dans le barrage d'Inga a permis d'avoir une idée du degré d'ensablement de l'amont, et par conséquent évaluer la contribution en sédiments de l'Île de Mateba dans la zone divagante du bief Maritime du fleuve Congo.

Calcul de l'Indice de Végétation par Différence Normalisée (NDVI)

Le NDVI est le rapport de la différence entre le PIR – R et la somme PIR + R, où le PIR correspond à la valeur de la bande Proche Infrarouge et le R à celle de la bande Rouge (Soudani, 2005; Filippa *et al.*, 2018; Shit *et al.*, 2021).

3. RESULTATS

Les résultats de cette étude concernent la perte et le gain en sédiments observés dans l'île de Mateba, le profil transversal et longitudinal, l'occupation du sol et l'estimation de la sensibilité potentielle à l'érosion, l'évolution de l'île de Mateba, la bathymétrie de la partie en amont, la granulométrie dans la région divagante et la comparaison limnimétrique entre le niveau d'eau dans la région divagante et au barrage d'Inga.

3.1. Perte et gain en sédiments dans l'Île de Mateba

Sur base des résultats d'interpolation par des points GPS collectés, le gain et la perte en sédiments intervenus dans la zone divagante du fleuve Congo ont été estimés. Le résultat décrit à la figure 2 met en exergue les zones ayant connu un gain ou une forte accumulation de sédiments, c'est-à-dire, les parties ensablées (en rouge) et les zones de perte ou parties de la zone divagante draguées ou auto draguées (en bleu), présentant par conséquent des profondeurs favorables à la navigation.

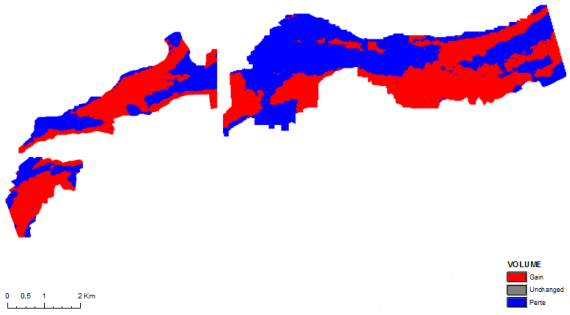


Figure 2. Perte et gain en sédiments entre 1990-2013

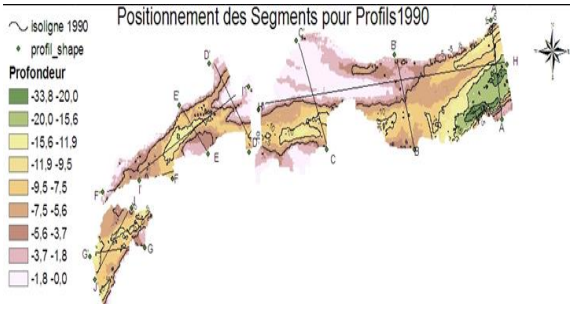
Le tableau 1 suivant présente le gain et la perte en sediment dans l'Île des Mateba. Il resort de ce tableau que la perte en sediment représente 2 894 501,58 m^3, ce qui represente une perte en surface de 8 121 360,95 m^2. En ce qui concerne le gain, il est de 400 007 923,47 m^3 équivalent à 2 357 792,3 m^2. Il en ressort un gap de 11 062 121,89 m^3. Ce résultat démontre que l'Île de Mateba a fait l'objet d'un dépôt de sédiment.

Tableau 1. Gain et perte en sédiments dans l'Île de Mateba

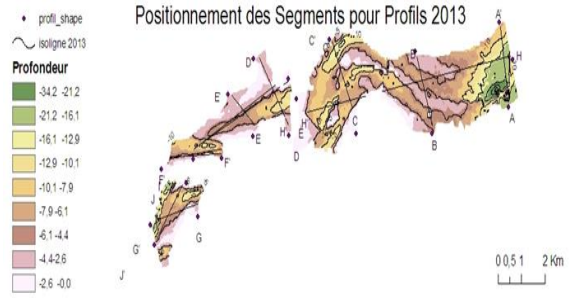
Perte en sédiments		Gains en sédiments	
Volume 1 (m^3)	Surface1 (m^2)	Volume 2 (m^3)	Surface2 (m^2)
-28945801,58	8121360,95	40007923,47	2357792,3

3.2. Profil transversal et longitudinal

En fonction des données de la bathymétrie des années 1990 et 2013, différents profils ont été dressés pour démontrer la variation du relief dans le sens transversal et longitudinal, tel que présenté sur la figure 3 ci-dessous.



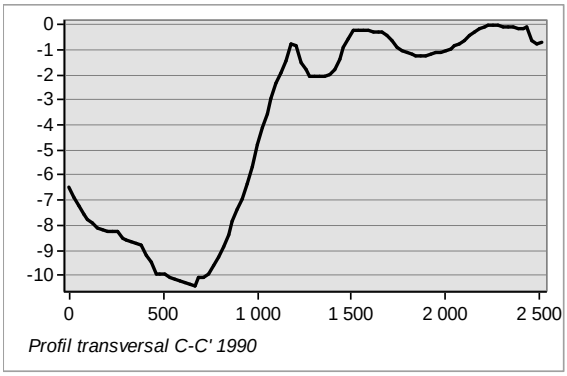
(a)



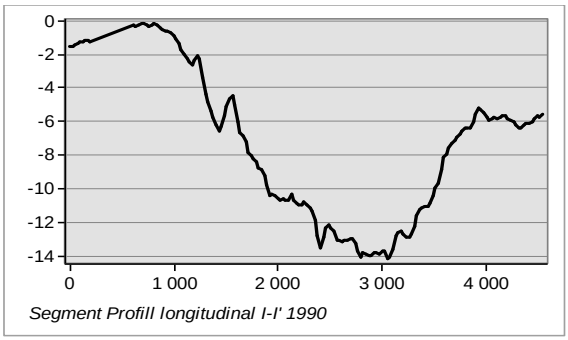
(b)

Figure 3. Positionnement des segments pour les profils 1990 (a) et 2013 (b)

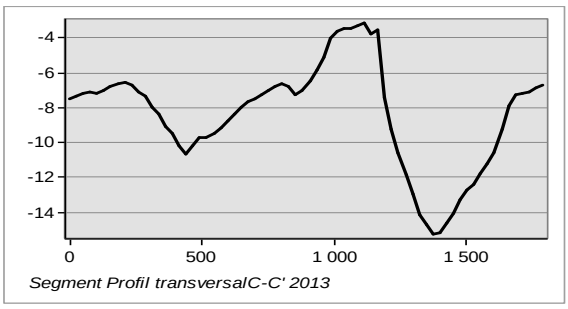
Il ressort de cette figure 3 qu'en 1990, la profondeur variait entre -33,8 et -1,8 m alors qu'en 2013, elle variait entre -34,2 et -2,6. La figure 4 ci-dessous présente l'allure des courbes des différents profils et segments.



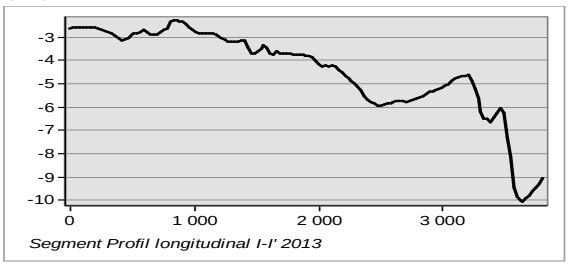
(a)



(b)



(b*)



(c)

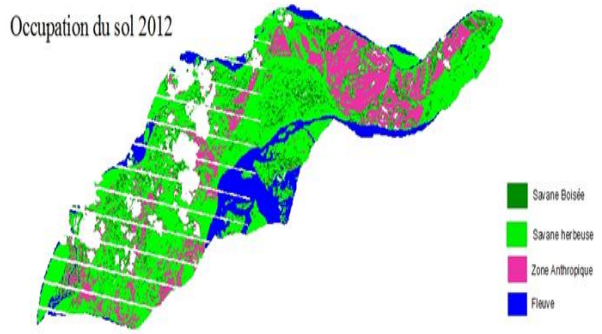
Figure 4. Profil Transversal 1990 (a), Segment longidutinal 1990 (b) Segment transversal (2013) et segment profil longitudinal (c) et profil longitudinal (2013)

Cette figure présente les altitudes de la zone suivant les différents profils. En 1990, en profil transversal, l'altitude de la zone variait entre -7,3 et -0,9 m d'altitude. Le profil longitudinal pour la même année donne des valeurs entre -2,3 et -6 m. En 2013, le profil transversal donne des valeurs comprises entre -4 et -14,3 m et le profil longitudinal donne des valeurs comprises entre 3,3 et -9 m d'altitude.

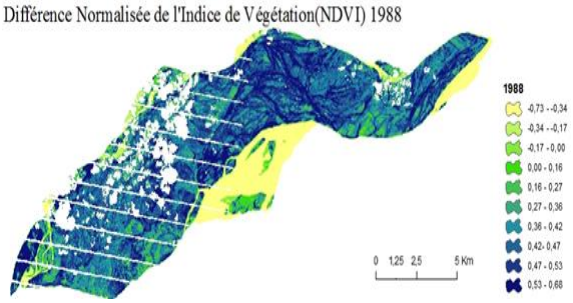
3.3. Occupation du sol et estimation de la sensibilité potentielle à l'érosion

Occupation du sol de l'Île de Mateba

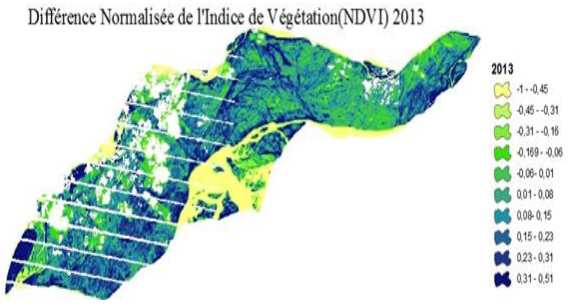
L'analyse de l'occupation du sol de l'Île en 2012 (Figure 5) a permis de renseigner sur la couverture végétale de l'Île et de ressortir les zones de fortes pressions anthropiques. Ces zones peuvent présenter un danger de plus en plus croissant surtout si elles se situent sur de fortes pentes. Les différentes classes d'occupation du sol identifiées en 2013 sont les savanes boisées, les savanes herbeuses, les zones anthropisées et le fleuve.



(a)



(b)



(c)

Figure 5. Occupation du sol de l'Île (a) et analyse de NDVI en 1988 (b) et 2013 (c)

En 1988, les valeurs de NDVI ont varié entre -0,78 et 0,68 tandis qu'en 2013, la plage des valeurs ont présenté des changements entre -1 et 0,51. Il a été remarqué une dégradation de la plage de valeurs de NDVI exprimant une réduction du couvert végétal traduisant un changement d'occupation du sol, réduction de la couverture arborée (Bernier et *al.*, 2016 ; Martin et *al.*, 2016). Cela traduit également la réduction de l'activité photosynthétique dans la zone. Les valeurs positives traduisent une activité photosynthétique intense et les valeurs négatives

une faible activité. L'allure des courbes en 1988 et 2013 a traduit également l'augmentation de nombre de classes à valeurs négatives en 2013, ce qui exprime l'anthropisation du paysage et une réduction de l'activité photosynthétique.

Analyse de la pente et de la sensibilité des sols à l'érosion

L'analyse de la pente (Figure 6a) a permis à dégager les différents degrés de déclivité de la zone : pente faible (0,09, en vert), pente Moyenne (0,09-0,22, en jaune) et pente forte (0,22-0,46, en rouge).

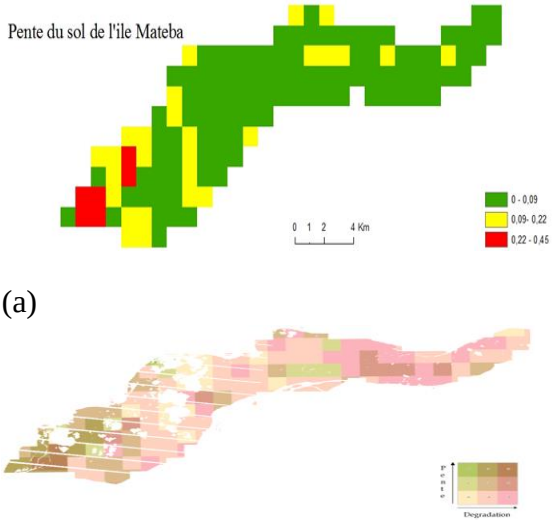


Figure 6. Pente (a) et sensibilité (b) des sols à l'érosion

En effet, une relation d'influence entre l'occupation et la pente a été établie pour dégager les zones potentiellement sensibles à l'érosion tel qu'illustré par la figure 3b. Il se dégage trois zones de sensibilité à l'érosion : (1) une zone de faible sensibilité, caractérisée par de faibles pentes de terrain (0-2%) et/ou une forte couverture de sol ; (2) une zone de sensibilité intermédiaire dont la susceptibilité à l'érosion est faible et la couverture du sol moyennement importante; (3) une zone de sensibilité forte à l'érosion caractérisée par des pentes relativement fortes (2-5% pente) et une très forte activité anthropique caractérisée par une dénudation des sols. Cette analyse de sensibilité de l'île de Mateba à l'érosion a permis d'évaluer l'apport de l'île au processus d'ensablement de la zone divagante (Roose et *al.*, 2017 ; Thior et *al*, 2020).

3.4. Evolution de l'Île de Mateba

La sensibilité de l'Île à l'érosion a été ensuite confirmée après comparaison de sa superficie entre 1988, 2013 et 2021. Entre ces trois dates, il a été noté que les limites de l'île n'ont cessé de varier. En effet, au cours de la période 1988-2013, l'Île a perdu 8,02 km^2 soit un taux moyen de rétrécissement de l'ordre de 32,08 hectares par an. Et de 2013 à 2021, l'Île a perdu 411 hectares (4,11 km^2), environ 51,38 ha par an. Sur base de cette tendance annuelle, la projection de la surface de l'Île à l'horizon 2025 (sur base du taux moyen de 1988 à 2021) a été estimée à 111,49 km^2, soit une perte de 2,49 km^2 ou 249 ha par rapport à 2021 si rien n'est fait pour renverser la tendance (figure7). Le taux annuel de perte entre 1988 et 2025 étant de 62,25 ha. Ces chiffres témoignent l'impact de la pression humaine et de l'érosion sur l'Île.

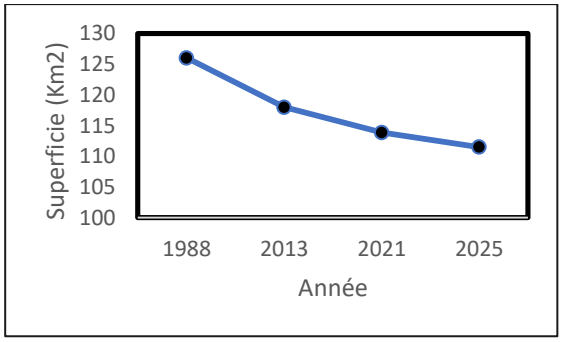


Figure 7. Projection de l'évolution de la superficie de l'Île de Mateba dû au recul de ses berges d'ici 2025.

3.5. Bathymétrie de la partie en amont

La figure 8a présente les isolignes et bathymétries du bassin Fwamalo du barrage d'Inga en amont entre 2010-2012 ; il s'en dégage qu'une formation des bancs de sable a eu lieu au niveau de ce canal, réduisant ainsi sa profondeur. Cette sédimentation inquiétante est observée à l'espace de 2 ans entre 2010 à 2012 en dépit de dragage qu'effectue le Groupe de la Centrale Inga II. En 2013, 49 400 000 m^3 de sable se sont accumulés dans ce bassin (figure 8b).

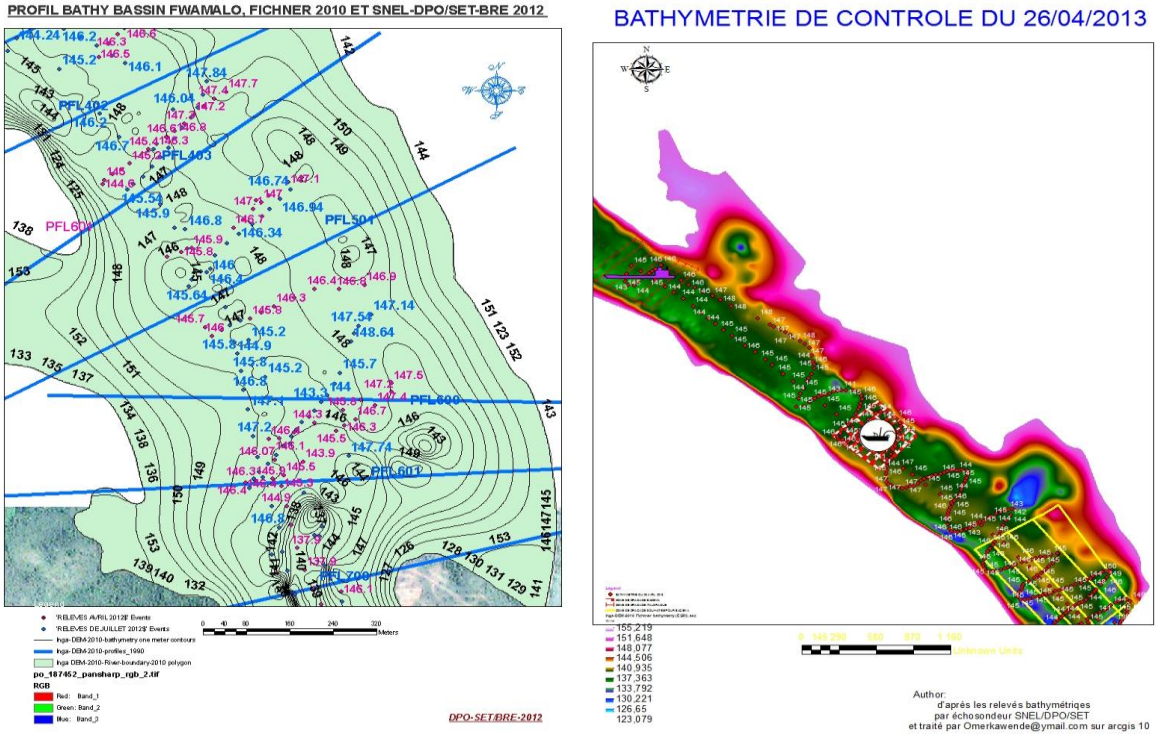


Figure 8. Isoligne du bassin fwamalo 2010-2012 (a) Bathymétrie du bassin Fwamalo du barrage d'Inga 2013(b)

3.5. Granulométrie dans la région divagante

Les études réalisées par la section sédimentologie de la CVM ont montré que la région divagante est surtout constituée de sables fin, moyen, et grossier même si l'argÎle est visible en certains endroits. De sables quartzeux hyalin, rose associé au quartz sombre et au mica sont également présents. Ces sédiments, des dimensions variant entre 0,002 et 200 microns, atteignent par endroit 0,1 mm à 0,5 mm de diamètre, tel que confirmé par l'analyse des échantillons prélevés au niveau du barrage d'Inga (Figure 9), demontrant que 80 % de ce sable ont une granulométrie inférieure à 0,3 mm (variant entre 0,1 mm à 0,5 mm).

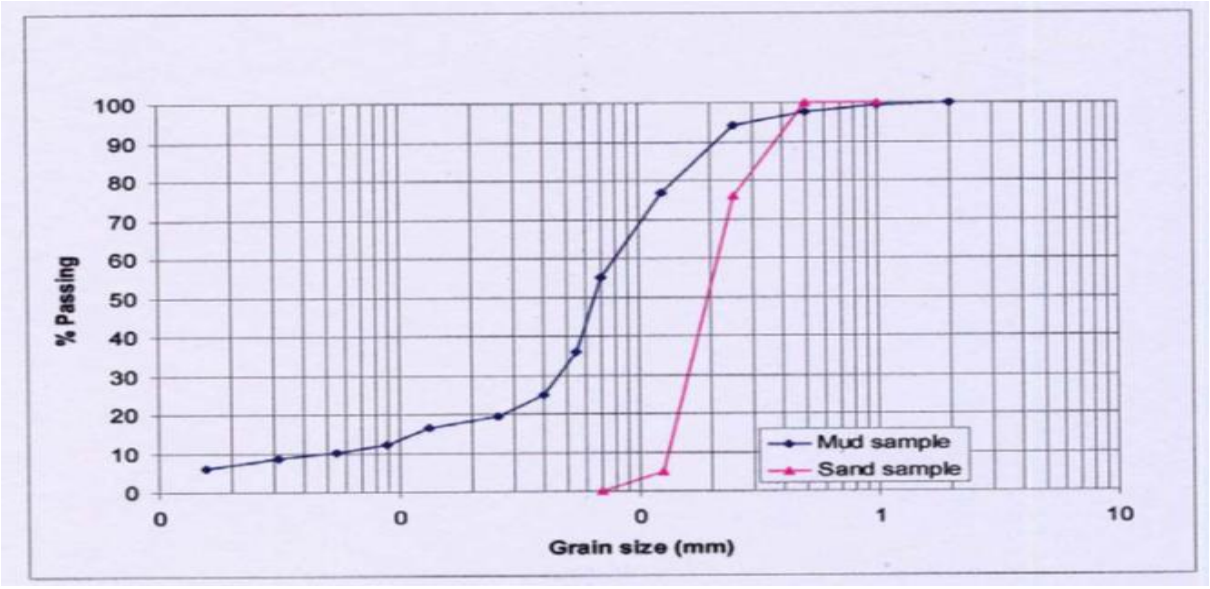
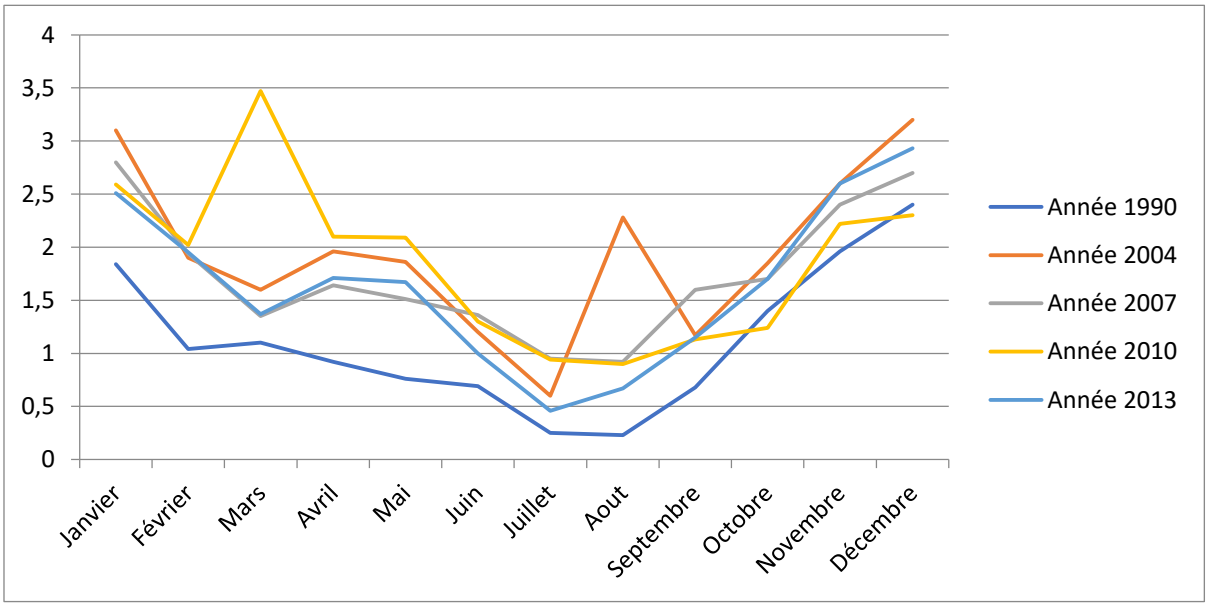


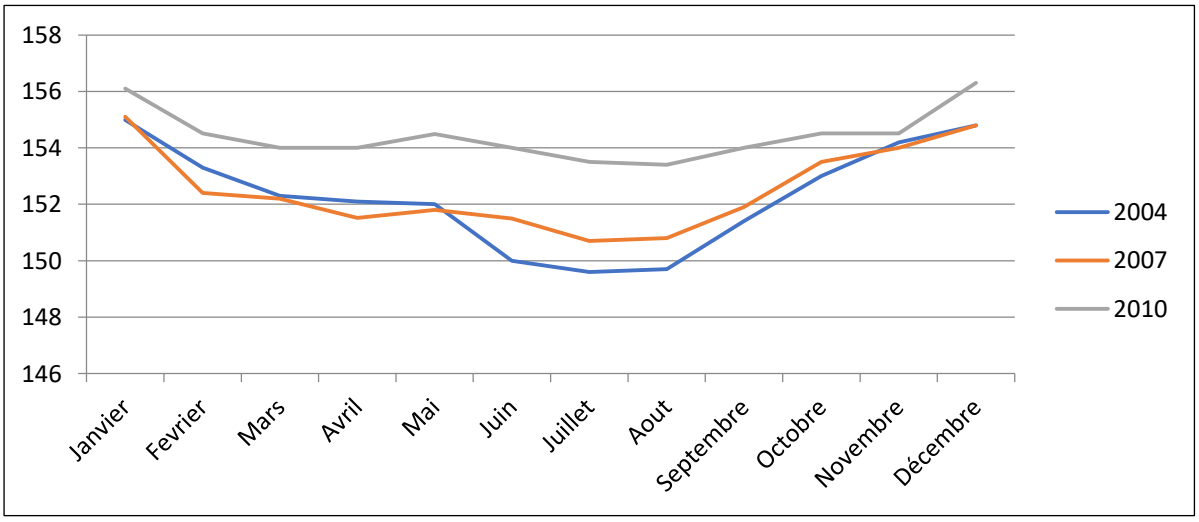
Figure 9.Granulométrie de 2 échantillons prélevés par Fichtner dans le canal d'amenée d'Inga en mai 2006 (source : CVM, 2012)

3.6. Comparaison limnimétrique entre le niveau d'eau dans la Région divagante et au Barrage d'Inga

La figure 13 présente l'analyse des diagrammes limnimétrique du niveau d'eaux mesuré en 1990, 2004, 2007, 2010 et 2013 dans la zone divagante du fleuve Congo; et en 2004, 2007 et 2010 à l'entrée du canal d'amenée du barrage d'Inga. Il ressort de l'analyse des fluctuations du niveau d'eau observées que ces deux sites reçoivent un apport supplémentaire des sédiments en provenance de l'amont car le diagramme limnimétrique montre une augmentation du niveau d'eau pour la période de 1990 à 2013.



(a)



(b)

Figure 13. Diagramme Limnimétrique (m) du niveau d'eau de la zone divagante (a) et canal d'amenée du barrage d'Inga (b)

4. DISCUSSION

4.1. De l'occupation du sol

Les résultats de NDVI signalent une augmentation de la proportion des zones dénudées. Les quelques savanes boisées restantes sont majoritairement situées en aval de l'Île avec une très faible représentation en amont où l'on rencontre des savanes herbeuses exposées à de fortes activités anthropiques. La dégradation dans ces zones, déjà très touchées par les affouillements, associée à la pente (figure 5) augmente la sensibilité du site aux érosions (Batti *et al.*, 2007). Les valeurs de NDVI ont révélé également la dégradation de l'occupation du sol marquée par une réduction de la couverture verte (Shit et *al*, 2021). Les résultats trouvés dans

l'évaluation de NDVI se rapprochent de ceux des études menées par Bernie et *al*., (2016).

4.2. Du processus hydrodynamique et de l'évolution de l'île

Des éboulements provoqués par des facteurs hydrodynamiques et aggravés par les batillages (IAU, 2011) menacent l'Île de Mateba. Les parties les plus sensibles à ces menaces sont : Ntuakulu, Cul De Boma (situé à 2,2 km des berges), Bula Nteva, Iya, Tshongo 1 et 2. En effet, cette perte énorme de la superficie, évaluée d'ici 2025 à 5,29 km^2 ou 529 ha, entrainerait d'une part, un surpâturage dû au rétrécissement des surfaces disponibles et pourrait, à la longue, mener à la perte des infrastructures, des cultures et des habitations des communautés qui y vivent. D'autre part, une augmentation de l'ensablement dans la zone divagante du bief maritime conduirait à des sérieuses difficultés de navigation dues à une réduction de la vitesse d'écoulement et de la profondeur du fleuve.

L'évaluation du processus d'éboulements des berges et la sédimentation dans la zone divagante en se basant entre autres sur les cartes bathymétriques (BRGM, 2009) produites par la CVM pour ce tronçon du bief, ont montré dans un premier temps, un gain en sédiments évalué à 40 007 923,47 m^3 (soit 2,3 km^2 en 1990), provenant aussi bien du charriage des matériaux de l'amont que des érosions et/ou éboulements survenus sur place dans l'Île. Il a été constaté en second lieu une perte en sédiments, évaluée à 28 945 801,58 m^3.

Les profils transversaux et longitudinaux effectués à différents endroits sur cette portion de l'Île ont mis en évidence la variation dans le temps et l'espace de la topographie du lit du fleuve. Des résultats similaires ont été trouvés par Thior *et al.* (2020). Cette perte en terre est principalement attribuable aux dragages périodiques effectués par la CVM à travers les activités d'entretien de la route de navigation du côté de l'Angola mais aussi aux forces du courant des eaux si modérées soient-elles en cette zone du fleuve Congo.

Il convient aussi de souligner que la zone d'étude étant presque située à l'exutoire du bassin du Congo, elle peut également subir les impacts aussi bien du changement climatique que des activités anthropiques ressentis en amont comme soulevé par Wallemack (2011), Zohra (2017), Roose (2017), Kulimushi *et al.*, (2021). En effet, en cas d'élévation du niveau d'eau de façon naturelle, il s'effectue un auto-dragage aux endroits les plus sensibles au passage de forts courants, ce qui entraine des érosions verticales.

Comme il a été soulevé par plusieurs travaux notamment ceux de Hydromet, (2017), Siamo et *al.* (2019), Prygiel *et al.* (2019), Donati *et al.* (2020), les fluctuations du niveau d'eau observées au niveau du barrage d'Inga (figure 8) et la comparaison de la bathymétrie associée à la granulométrie de son canal de dérivation, sont la preuve que la zone divagante reçoit une part importante des sédiments provenant de l'amont. Cela peut être expliqué par les causes d'origine naturelle notamment le régime hydrologique, la sédimentation des matériaux solides charriés et en suspension, les crues et inondations, les érosions sur terres fermes, les variations saisonnières et climatiques ainsi que des causes d'origine anthropique (urbanisation, déforestation et changement d'utilisation du sol, etc.). Kulimushi *et al.* (2021) ont aussi trouvé que les activités anthropiques ont une incidence sur le dépôt des sédiments et le processus érosifs.

La sédimentation du bassin de mise en charge du barrage d'Inga II (53 875 m^2 de superficie) est inquiétante, car en l'espace de 2 ans (2010 à 2012), il y a eu une accumulation moyenne de 12 m^3 de sable en dépit des dragages qu'effectue le groupe de la centrale Inga II.

Conformément à la figure 8, le bassin de Fwamalo a connu une dépression naturelle de superficie de 416.900 m^2 en 2013, et a accumulé un volume de sable de 49 400 000 m^3. Le bassin de Shongo comme le reste du canal d'amené d'Inga, a perdu une partie de sa profondeur suite à la sédimentation, avec comme conséquence, la limitation de la production d'électricité en période d'étiage ; ce qui constitue une situation périlleuse.

L'analyse granulométrique effectuée sur les sédiments de la zone divagante a montré que près de 80 % de ses sédiments sont des sables inférieurs à 0,3 mm, soit de dimensions similaires à celles du canal d'amené du barrage d'Inga ; alors que les sables de l'Île de Mateba (locaux) sont généralement des dimensions variantes entre 0,000002 à 0,2 mm. Cette situation prouve à suffisance que l'ensablement aussi bien du barrage d'Inga que de la zone divagante émane principalement de l'amont du bief maritime et que les érosions des berges de l'Île de Mateba quoique inquiétantes pour la survie de l'Île, ne contribuent qu'a environ 20 % au processus de sédimentation du bief maritime.

Selon Konzi *et al.* (2018) et (2019), en amont du bief maritime, le fleuve est caractérisé par un fort courant coulant d'un seul chenal étroit et profond sur de fortes pentes bordées. Ces caractéristiques entrainent dans la plaine alluvionnaire de la zone divangante, la quasi-totalité des sédiments. Cette abondance de sédiments solides qui arrivent dans la zone divagante à hauteur de l'Île Mateba, prend deux différentes directions, notamment le chenal

Loango à droite et le chenal Mateba à gauche. Ce dernier, le plus large, présente beaucoup de bancs de sable et reçoit, selon la CVM, les 65 % du débit total du fleuve. De plus, la proximité de la route de navigation actuelle à 550 m de moyenne des berges fait penser aux effets des batillages soulevés par Dauphin (2017) sur ces berges, d'où la contribution de 20 % de l'Île de Mateba dans la sédimentation de ce tronçon.

La figure 7 a montré que de 1988 à 2013, l'Île de Mateba avait perdu une surface de 8,02 km^2 à l'intervalle de 25 ans, en raison d'une perte annuelle de 0,32 km^2, soit 32 ha ; la superficie de l'Île a varié de 126 km^2 à 117,98 km^2. De 2013 à 2021, un taux moyen de régression de 51,38 ha a été observé. La projection de la superficie à l'année 2025 à l'aide du taux moyen de 1988 à 2021, a révèle une tendance baissière de 62,25 ha par an. Cette tendance serait accentuée si la projection a été faite à l'aide de la tendance observée en 2013. Il est donc à signaler la possibilité d'une perte plus grande que celle projetée. Ces résultats se marient avec les observations faites par Konzi *et al.* (2018). Cette situation s'explique par le fait que de 1968 à 2005, le recul des berges était essentiellement dû aux facteurs naturels d'érosion, notamment : la nature sablonneuse des berges et les facteurs hydrodynamiques (Degoutte, 2011 ; Konzi *et al.*, 2018). Mais à partir de de 2005, il a été remarqué une pression anthropique croissante sur l'Île. En outre, en croire la Direction d'Exploitation de la CVM, la route de navigation était pendant certaines années sur l'axe Congolais et que la distance moyenne la séparant des berges était de 1100m ; ce qui par conséquent allongeait le temps d'arrivée des vagues générées par le passage des bateaux.

En effet, les résultats de Curtiss *et al.,* (2009), Dauphin (2017), Zohra (2017), Thior *et al*. (2020) ont montré que lorsque les berges sont situées entre 300 et 600 mètres, il existe une relation linéaire entre la navigation commerciale et le vent. Ils précisent ensuite qu'à moins de 300 m de la voie navigable, 100 % de l'érosion est imputable à la navigation ; entre 300 et 460 m, plus de 50 % de l'érosion est attribuable à la navigation et moins de 50 % aux vents ; entre 460 et 600 m, moins de 50 % de l'érosion est imputable à la navigation et plus de 50 % aux vents ; à plus de 600 mètres, 0 % de l'érosion est attribuable à la navigation, seuls les vents seraient responsables.

4.3. Des pistes de stabilisation

En vue de faire face aux pressions humaines et hydrodynamiques, quelques approches sont proposées comme pistes de solution pour une exploitation durable aussi bien de la zone divagante que de l'Île de Mateba. Il s'agit:

(i) des options technologiques : par l'approche des structures solides (murs de soutènement en bêton, brise-lames, barrières en béton, enrochements, murs de briques ou de bloc ou de gabions empierrement,…) qui, bien que bonne, est toutefois non écologique car, en plus d'être coûteux, empêche la dynamique du système côtier « traumatisantes », et crée une neutralisation des échanges entre le milieu aquatique et terrestre par l'effet d'écran induit et l'utilisation récréative des plages ;
(ii) des approches d'adaptation : cette approche appelée génie végétal que l'on redécouvre et qui a fait ses preuves sur les cours d'eau non navigables, permet (Lata *et al.* 2017; Evette *et al.,* 2019) de répondre aux contraintes techniques liées à la navigation tout en respectant et en améliorant les fonctions écologiques des milieux rivulaires des voies d'eau.

Le développement de ces techniques dans la protection des berges de l'Île de Mateba devra être une préoccupation de toutes les entreprises œuvrant sur ce tronçon et par-dessus tout, le gouvernement national et les institutions internationales, du fait que ceci peut avoir des répercussions néfastes sur les mangroves en aval (Parc marin), zone humide à écosystème unique, fragile et d'importance internationale.

La combinaison des techniques végétales existantes est indispensable, car elle apporte une solution efficace à chaque cas particulier rencontré (Lata et *al.*, 2017 ; Peters *et al.*, 2018, Evette *et al.*, 2019). Chaque cas d'érosion doit être géré dans son contexte et particularité, et les techniques végétales ne seront pas toujours utilisables partout (Lambert *et al.*, 2020; Kulimushi *et al.*, 2021). Elles sont soumises à des limites et contraintes. Ainsi, dans le cas par exemple de profondeurs d'eau trop importantes, des contraintes géotechniques ou hydrauliques trop fortes ou encore de problèmes d'accessibilité, des techniques mixtes voire des techniques du génie civil classique doivent être mises en œuvre.

La gestion des berges des voies navigables appelle à une approche intégrée, dans le sens où toutes les fonctions de la voie d'eau et des terres riveraines doivent être prises en compte, mais aussi les diverses étapes de la démarche doivent être traitées comme un tout (Lata *et al.*, 2017 ; Petters *et al.*, 2018). Il est conseillé de définir un programme global de protection des berges, en choisissant les secteurs à protéger en priorité et sans oublier qu'une végétation rivulaire spontanée bien gérée est un excellent moyen naturel pour préserver l'interface terre-eau des berges. Caractérisés par un pouvoir d'adaptation exceptionnel, les systèmes racinaires de la végétation créent un réseau vivant très dense qui piège les particules minérales

augmente la cohésion du sol et consolide en profondeur la berge, diminuant ainsi les phénomènes érosifs face à l'agression régulière du courant, des vagues et des batillages.

Cette aptitude stabilisatrice des berges varie en fonction des espèces :
(i) vétiver, espèces du genre *Chrysopogon* connue pour ces grandes touffes, possède un enracinement vertical pouvant atteindre des profondeurs allant jusqu'à trois mètres ;
(ii) la graminée *Festuca arundinacea* (faux roseau), peut s'installer jusqu'à 2,50 m de profondeur ;
(iii) le bambou (*Bambusa vulgaris*) dispose d'un réseau de rhizomes très dense qui limite l'érosion des sols. Selon Kermoal (2008), il est estimé à 6 m^3, la quantité de sol fixée par les bambous. C'est également une ressource renouvelable à croissance rapide, il peut fixer (Roose 1999 ; Uprety et *al*., 2012; Lambert *et al.*, 2020) 30 % de plus de CO_2 (12 tonnes de CO_2 /ha/an) comparés aux arbres feuillus; et libérer 30% de plus d'O_2. La quantité de matière organique produite par une bambouseraie augmente de 10 à 30 % par an, contre 2 à 5 % pour une forêt (Roose 1999 ; Kermoal, 2008 ; Uprety *et al*., 2012; Lambert *et al.*, 2020).

Tant que cela ne présente pas un risque pour la navigation, il est très souhaitable de laisser se développer une végétation buissonnante ou arbustive sur la berge (Peeters *et al.*, 2018 ; Evette *et al.*, 2019). En plus de ces mesures, la mise en place d'un instrument législatif et institutionnel visant à défendre les activités dégradantes s'avère indispensable (Khuabi, 2014). La limitation de la déforestation sur l'ensemble du bassin du Congo est une priorité afin d'éviter, en plus des effets du changement climatique (Claude, 2011) et de l'explosion démographique, la dégradation des sols par érosion ; lesquels ont des impacts négatifs s'exprimant par l'ensablement aussi bien du bassin de rétention de la centrale hydroélectrique du barrage d'Inga que de la zone divagante du bief maritime du fleuve Congo est la seule porte maritime du pays ouverte au commerce international.

5. CONCLUSION

Cette étude a permis par les outils de la télédétection, d'évaluer la dynamique des berges de l'île de Mateba et son impact sur la zone divagante du bief maritime du fleuve Congo. Elle a révélé que les pressions humaines et hydrodynamiques se sont développées à un rythme sans précédent de sorte que les plus importants espaces côtiers congolais sont en train de perdre certaines de leurs fonctionnalités écologiques, leur dynamique interne, et par conséquent, leurs valeurs patrimoniales. Les résultats sur la granulométrie et la bathymétrie ont montré que les éboulements des berges ainsi que les activités anthropiques dans l'Île comme en amont, aggravent la sédimentation aussi bien de la zone divagante que du canal d'amenée de la centrale hydroélectrique du barrage d'Inga.

Combattre de manière systématique ces phénomènes d'éboulements à l'aide d'ouvrage lourd de protection reste inadapté à la préservation des écosystèmes et conduit le plus souvent à accentuer les désordres et perturbe inévitablement la dynamique naturelle du cours d'eau (augmentation de la vitesse et de la force érosive du courant, encaissement du lit, érosion régressive, appauvrissement biologique du milieu…). Ceci doit faire l'objet des mesures compensatoires pour atténuer l'impact paysager et environnemental. Des mesures utilisant le Génie végétal ou l'utilisation des méthodes mixtes sont vivement encouragées.

L'analyse des caractéristiques géologiques de l'Île de Mateba combinée aux résultats sur la sensibilité de l'Île à l'érosion, pourra permettre la mise en place des cartes définitives de risque à l'érosion indispensables pour assurer le suivi et la surveillance de la dynamique des berges et du changement du couvert végétal.

Références

Arnaud R. & Emery X, 2000. *Estimation et interpolation spatiale, méthodes déterministes et méthodes géostatiques*, 50 p

Barbade L., 1994. *Programme d'action pour de petits états insulaires : Conférence mondiale sur le développement durable des petits Etats insulaires en développement Bridgetown Barbade 26 avril - 6 mai 1994*, 2 p.

Batti A. & Depraetere C., 2007. *Panorama des méthodes d'analyse de l'érosion dans un contexte insulaire*. Techniques de l'eau, 16 p.

Bernier M., Dissanka M., Simard A. & Courant S., 2016. *Elaboration d'indicateurs de biodiversité spatiaux temporels intégrant la télédétection et portrait partiel de la biodiversité du Québec.* Rapport final. INRS, Centre Eau, terre et environnement, 88 p.

BRGM (Bureau de Recherche Géologique et Minière), 2009. *Comprendre les berges pour mieux agir*, pp. 35-78.

Charbel L. & Hassan H.E., 2017. Modélisation de la perte de sol dans la forêt Bkassine. *Géo-éco_trop*, 41(31), 479-492.
Claude S., 2011. *Impact à long terme du changement climatique sur le littoral métropolitain*, pp. 26-49 ;

Congoénergie, 2017. *Le bief maritime du fleuve congo. L'écosystème vulnerable et menace. Les Cris d'une population oubliée. Boma*, 20 p.
https://congoenergie.org/images/biblioteque/Congoenergie_Rapport_sur_les_cris_d%27une_population_oubli%C3%A9_%20inga_140118.pdf

Curtiss G., M., Osborne P. D. & Horner-Devine A. R., 2009. Seasonal patternsof coarse sediment transport on a mixed sand and gravel beach due to vessel wakes,wind waves, and tidal currents. *Marine Geology*, 259(1-4), 73–85.

CVM (Congolaise des Voies Maritimes), 2012. *Rapport de la section hydrologique de la direction d'exploitation/CVM: Description de la maquette du bief maritime du fleuve Congo*, 100 p.

Dauphin D., 2017. *Influence de la navigation commerciale et de la navigation de plaisance sur l'érosion des rives du Saint Luarenty dans le tronçon cornwall-Montmazgny*. Publication gouvernementale. Service de transport maritime et aérien, 194 p.

Degoute G., 2011. *Formes naturelles des Rivières Ripisylves, évolution des berges*, 65-72 p.

Diane D., 2000. *Influence de la navigation commerciale et de la navigation de plaisance sur l'érosion des rives du Saint-Laurent dans le tronçon Cornwall-Montmagny*, pp. 42-45.

Donati F., Toucahart L. & Partout P. 2020.les Seuils en rivière transformeront-ils les milieux lytiques en milieux lentiques *? Physio-Géo*., 15, 111-131.

Evette A., Keita N. Poulin M., & Tiserand M. 2019. *Le génié vegetal pour la protrection des berges de cours d'eau au Québec: état des lieux et perspectives pour les basses terres du saint-Laurent. Sciences Eaux et Territoires*, 8 p.

Fillippa G., Creminese E., Migliavacca M., Galvano M., Sonnetag O., Humphreu E., Hufkens K., Ryu Y., Verfaillie J., Di cella U.M. & Richarson. 2018. NDVI derived from near infra-red-enabled digital camera. Application, across différent plan finctionnal types. *Agricultural and meteorology*. 249, 275-285. http://environment.snu.ac.kr/wp-content/uploads/2016/03/Filippa_2018_AFM.pdf consulté le 20 Juillet 2021.

Florinsky I., 2016. *Digital terrain analysis in soil science and geology*. Academic Press, 506 p. https://www.elsevier.com/books/digital-terrain-analysis-in-soil-science-and-geology/florinsky/978-0-12-804632-6

IUA (Institut d'Aménagement et d'Urbanisme), 2011. *Aménagement écologique des berges en site urbain*, p. 43-87.

Jacolin Y. & Walker R., 2006. *Infographie des Modèles Numérique des terrains (MNT) ; ENISE*. Université Jean Monnet, St Etienne France, 14 p.

Jourdan H., Payri C., &Vidal E., 2019. *Îles et milieux insulaires face aux changements climatiques globaux. Institut de Recherche et de Développement*, 3 p. https://lemag.ird.fr/fr/Îles-et-milieux-insulaires-face-aux-changements-globaux.

Kasongo D.I., Mayiluebo S.K.L.R.C., Dieudonné M.N. & Pangu R.S.S., 2021. Voies d'eau navigables de desserte agricole en République Démocratique du Congo : enjeux, analyse et pistes de solution. *Revue Africaine d'Environnement et d'Agriculture*, Numéro Spécial 01, 48-51. http://www.rafea-congo.com/admin/pdfFÎle/Article-RAFEA-OVDA-2021-ok-ok.pdf

Konzi E. & Likwanda D.Y., 2019. *Prédiction du transport solide dans le trocon errant du tronçon maritime du fleuve Congo, tenant compte des limites de la méthode Ashmore in Progrès récent des cinces de l'environnement dans les régions euro-méditerranéennes et environnantes*, p. 1055-1056.

Kulumushi L.C., Choudhani P., Maniraga A., Elbe tagi A., Pingale S.M. & Sigh S.K., 2021. Erosion risk assessment through priorization of sub-watershed in Nyabarongo river catchment. Rwanda. Envirommental challenges N°5/2021. Elsevier, 20 p.

Kuabi N.C., 2014. *Le régime juridique de navigation dans le bassin du Fleuve Congo: Entre centralisation, application et rejet d'un cadre conventionnel régional mal négocié en RDC*. Librairie africaine d'études juriquyes, pp. 350-382.

Lambert L. & Billaud, 2020. *Biotope 2019. Programme de la Forêts et du Bois de Martinique. Rapport Environnemental.* Programme régional de la Forêt et du Bois de Martinique, 255 p.

Lata J-C. & Evrette A., 2017. *Le génie végétal pour la protection des berges de rivière. Acte de colloque GAIE (Groupe des Acteurs de l'Ingénierie Ecologique) 11ème edition Biodiversité, ingénierie écologique et sociétés. Quelles interventions de l'homme sur le vivant ? Agroparistech*, 17 p.

Maleval V., Destombes R.B. & Astrale L., 2016. *Diagnostic et propositions d'actions relatifs à l'érosion des berges du Léman sur la commune de Thonhon-les-bains (Huate-savoie-France)*.

Martin D.E. & Latheef M.A. 2016. *Evaluation par télédetection des dommages causes par tétranyque à deux points sur le coton de serre*. USDA-ARS, 15 p.

MECNT (Ministère de l'Environnement, Conservation de la Nature et Tourisme), 2007. *Profil de la zone Côtière de la RDC*, p. 13-34.

Peeters A., Houbrechts G, Hallot E. Campenhout J.V. Verniers G. & Petit F., 20128. Efficacité et resistance des techniques de protection des berges en génie végétal. Géomoprohologie, relief, processus et environnement, 24(2), 479-479.

PNUD (Programme des Nation Unies pour le Développement), 2020. *Emergence d'infrastructures côtières à Muanda pour contrer la furie des vagues de l'Océan Atlantique*. https://www.cd.undp.org/content/rdc/fr/home/presscenter/articles/2020/emergence-d_infrastructures-cotieres-a-muanda.html

Prygiel E., Servier A. & Ramey P. 2019. *Somme et marais d'Isle de Saint Quentin.Analyse hydrualique, physico-chimique et biologique.* Rapport CEREMA, 224 p.

Riazanoff S., 1989. *Extraction et Analyse automatique de réseaux à partir des Modèles Numériques de terrain ;*

contribution à l'analyse d'image de télédétection. Thèse, Université de Paris VII, 84 p.

Roose E., 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Rome : FAO, coll. *Bulletin pédologique de la FAO*, n° 70, 470 p. ISBN : 92-5-203451-X ;

Roose E., 1999. *Introduvtion à la gestion durable conservatoire de l'eau et de la biomasse et de la fertilité des sols.* Services sols, FAO, 200 p.

Roose E., 2017. *Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerrannéens*. IRD, Editions, 712 p.

Roose E., Duchaufour H. & De Noni G., 2012. *Lutte anti-érosive des sols tropicaux. Réhabilitation des sols tropicaux et protection contre les pluies exceptionnelles*. IRD, Edition, 758 p.

Shit P., Pourghasemiu H., AdhikaryP., Bhunia G. & Sati V., 2021. *Foreste resources resilience and conflicts*. Elsevier, 476 p. https://www.elsevier.com/books/forest-resources-resilience-and-conflicts/shit/978-0-12-822931-6

Siamo E.K.P., Kubeta M. J.B. & Mbamba K.R., 2019. *Les passes navigables de la région divagante du bief maritime du fleuve congo, face à l'évolution des paramètres hydrologiques, quel avenir?* 26 p.

Soudani K., 2005. *Indices de végétation radiométrique*, p. 17-23.

Thior M., Sane T., Abou-Sy A., Dieye EHB., Bing B. & Descroix, 2020. Evolution morphologique du cordon sableux de la presqu'île aux oiseaux sur littoral de la Casamance (Sebegal). Revue *marocaine de la géomorphologie*, l3(4), 47-78.

Uprety D.C, Dhar S., Hongnin D., Kimball B.A., Garg A. & Upadhyay J., 2012. *Technologies pour l'atténbuation des effets du changements climatiques. Secteur de l'Agriculture*. Série des liverts TNA, 30 p.

Tusse D.C., Mapoko M.N. A. KAgufa M.J. & Minengu J.D., 2021. Problématique de l'aménagement et de l'entretien des voies navigables : cas du bief maritime du Fleuve Congo. *Revue Africaine d'Environnement et d'Agriculture*, Numéro Spécial 01, 2-9. http://www.rafea-congo.com/admin/pdfFÎle/Article-RAFEA-MAPOKO-2021.pdf

Wallemacq V., Petit F., Campenhout J.V. & Houbrechts G., 2011. Impact de la glace de ségrégation sur l'érosion d'un ruisseau ardennais (la Chavannes, Belgique). *Géomrophologie, Relief, processet environnement*, 17(1), 11-17.

Zohra H., 2017. *Quantification de la recharge naturelle et artficielle d'un système aquifère soumis à des contraintes climatiques et anthropiques en zone sémi-aride (basin de Foussama) Tunisie centrale.* Thèse de doctorat, 261 p.

View publication stats