

# EVALUATION DE LA VULNERABILITE DES SOLS A L'EROSION HYDRIQUE DANS LA COMMUNE RURALE DE KARIMAMA, NORD BENIN

## ASSESSMENT OF SOIL VULNERABILITY TO WATER EROSION IN THE RURAL COMMUNE OF KARIMAMA, NORTHERN BENIN

| Hervé Dègla KOU MASSI <sup>1,2\*</sup> | et | Judith Eric Georges YETONGNON <sup>2,3</sup> |

<sup>1</sup>Institut du Cadre de Vie de Université d'Abomey-Calavi, République du Bénin (ICaV/ UAC)

<sup>2</sup>Laboratoire Pierre Pagney | Climat, Eau, Ecosystèmes et Développement (LACEEDE) | Université d'Abomey Calavi, B.P 526, Cotonou | République du Bénin |

<sup>3</sup>Institut National de l'Eau (INE)



| DOI: 10.5281/zenodo.10251091 | | Received October 20, 2023 | | Accepted November 27, 2023 | | Published November 03, 2023 | | ID Article | Hervé-Ref1-5-17ajiras201123 |

### RESUME

**Introduction :** L'érosion hydrique est un problème environnemental majeur et le premier facteur de dégradation des sols dans la Commune de Karimama. **Objectif :** L'objectif est d'analyser la vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique dans la Commune de Karimama. **Méthodes :** L'approche méthodologique a consisté à étudier les facteurs influençant l'érosion (pente, couverture végétale, érosivité des pluies, érodibilité des sols), à les cartographier, puis à les combiner dans le modèle RUSLE pour estimer les pertes en sol. L'évolution de l'occupation du sol de 1990 à 2017 a également été analysée. **Résultats :** La carte de vulnérabilité montre une faible vulnérabilité (-591 à -161 t/ha/an) sur 35,85% du territoire et une très forte vulnérabilité (485 à 6126 t/ha/an) sur 7,79%. L'analyse diachronique révèle une augmentation des sols nus et agglomérations (+3 à +6%) et des savanes (+9 à +4%), ainsi qu'une diminution des forêts et savanes boisées (-12 à -21%). **Conclusion :** L'étude met en évidence différents niveaux de vulnérabilité des sols à l'érosion dans la Commune, ainsi qu'une évolution défavorable de l'occupation du sol accentuant ce phénomène. Des actions de lutte contre l'érosion hydrique s'avèrent nécessaires.

**Mots-clés :** érosion hydrique, vulnérabilité, RUSLE, occupation du sol, Karimama.

### ABSTRACT

**Introduction:** Water erosion is a major environmental problem and the primary factor contributing to soil degradation in the Municipality of Karimama. **Objective:** The objective is to analyze the vulnerability of soils to water erosion in the Municipality of Karimama. **Methods:** The methodological approach involved studying factors influencing erosion (slope, vegetation cover, rainfall erosivity, soil erodibility), mapping them, and then combining them in the RUSLE model to estimate soil losses. The land use change from 1990 to 2017 was also analyzed. **Results:** The vulnerability map shows low vulnerability (-591 to -161 t/ha/year) on 35.85% of the territory and very high vulnerability (485 to 6126 t/ha/year) on 7.79%. Diachronic analysis reveals an increase in bare soils and settlements (+3 to +6%) and savannas (+9 to +4%), as well as a decrease in forests and wooded savannas (-12 to -21%). **Conclusion:** The study highlights different levels of soil vulnerability to erosion in the Municipality, along with an unfavorable evolution of land use exacerbating this phenomenon. Actions to combat water erosion are necessary.

**Key words:** Water erosion, RUSLE, vulnerability, land use, Karimama.

## 1. INTRODUCTION

Les terres cultivables sont en diminution à un rythme d'environ 5 à 10 millions d'ha par an, et ceci pendant une période de croissance démographique globale [1]. La dégradation des terres, qui concerne actuellement 1,9 milliard d'hectares de terre dans le monde, soit près de 65 % des ressources mondiales en sols, est due à 85 % à l'érosion des sols, qui en est le facteur principal. Près de 1,5 milliard de personnes, soit un quart de la population mondiale, dépendent directement de la nourriture produite à partir de terres dégradées. Plus de 36 milliards de tonnes de terres fertiles sont perdues chaque année par les systèmes agricoles dans le monde en raison de l'érosion des sols [2]. La dégradation des sols est une préoccupation écologique dont les conséquences sont ressenties le plus fortement par les populations pauvres des pays en voie de développement. La croissance démographique et l'augmentation du niveau de vie ont induit à une demande de plus en plus importante en produits alimentaires, en eau et en habitat. Cette demande progressive, où les besoins des populations dépassent souvent la production des écosystèmes, a poussé l'homme à utiliser des pratiques inappropriées qui ont bouleversé les équilibres naturels et ont induit à une érosion accélérée. Cette dernière touche chaque année de plus en plus de terre, réduisant leur capacité de production en devenant parfois totalement stériles [3]. Les principales causes de dégradation des sols sont anthropiques : agriculture intensive, déforestation, surpâturage, pollution industrielle, irrigation... Et cette dégradation risque de s'aggraver si rien n'évolue dans les pratiques agricoles et environnementales. Avec la réduction et l'appauvrissement des surfaces destinées à produire des aliments, la prospective alimentaire devient un défi majeur des prochaines décennies [4].

En Afrique subsaharienne, le phénomène de l'érosion hydrique est également très répandu. Sur environ 494 millions d'hectares de terres de cette région touchée par la dégradation des sols, 46 % sont affectés par l'érosion hydrique, 38 % par l'érosion éolienne, 12 % par la dégradation chimique et 4 % par la dégradation physique [5]

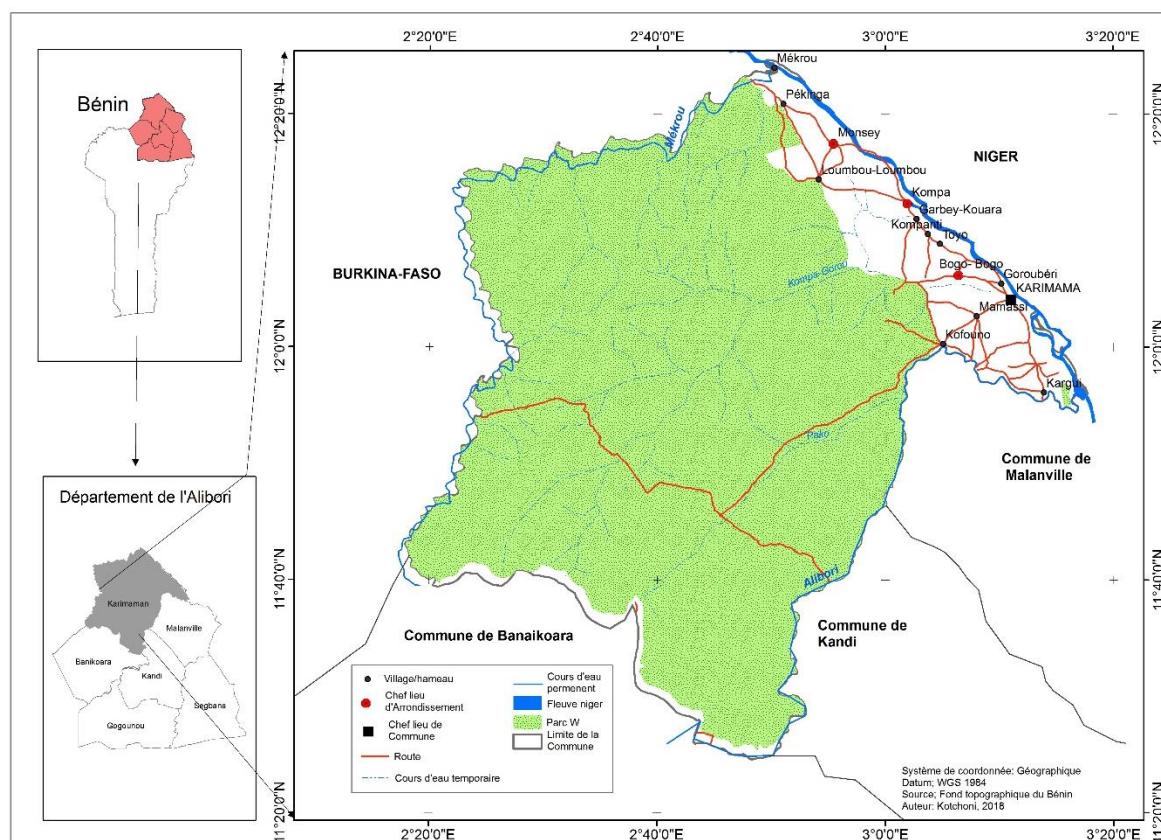
La dégradation des sols par érosion hydrique représente une grave menace qui met en danger la production agricole et les moyens d'existence ruraux et qui continue de prendre des proportions alarmantes, notamment dans les régions pauvres et de forte démographie [6]. Globalement, 29 % et 33 % des terres au Bénin se trouvent dans un état respectivement de forte et, moyenne dégradation [7]. Ce niveau de dégradation varie en fonction des zones agro-écologiques [8]. Selon ce dernier, les sols fortement dégradés se retrouvent dans les zones agro écologiques I (Extrême Nord) et II (Nord-Benin) avec des taux de dégradation respectivement de 84 et 40 % de la superficie des terres.

La Commune de Karimama est confrontée à un grave problème de dégradation des terres, caractérisé par les phénomènes d'érosion et d'effondrement naturels des sols connus sous le nom de dongas [9, 10]. Selon les mêmes auteurs, les dongas ont une origine anthropique et naturelle et ils proviennent d'une mauvaise utilisation des terres liée aux pratiques de feu de végétation, de surpâturage, de mauvaise construction des routes, des ponts et des canaux de drainage. La dégradation des terres de la Commune est aussi liée à la pauvreté et à des pressions humaines, aux régimes fonciers et à la sécheresse qui ont pour corollaires le surpâturage, les activités agricoles non durables, la surexploitation des terres et la déforestation [11].

Ces pressions anthropiques sur les ressources biologiques de la Commune de Karimama se font de plus en plus intenses, compromettent sérieusement l'équilibre écologique du milieu et constituent une menace à la sécurité alimentaire. Les conséquences socioéconomiques de ces phénomènes sont très importantes. Dans le cadre de réduire le risque d'érosion des sols dans la Commune, il urge d'analyser la vulnérabilité de ces sols à l'érosion.

## 1 Situation géographique et administrative

La Commune de Karimama est située au nord-ouest du département de l'Alibori, entre les parallèles 11°50' et 12°25' de latitude nord d'une part et les méridiens 2°43' et 3°20' de longitude est d'autre part (Figure 1).



**Figure 1 :** Localisation de la Commune de Karimama.

La Commune de Karimama est limitée au nord par le fleuve Niger (frontière naturelle), au sud par la Commune de Banaikoara, à l'est par les Communes de Kandi et de Malanville et à l'ouest par le Burkina-Faso. Elle couvre une superficie de 6.102 Km<sup>2</sup> et est subdivisée en cinq arrondissements. Elle comporte quatre (4) quartiers de ville (Goroubéri, Karimama 1, Karimama 2, Mamassy-Peulh) et quatorze (14) villages à savoir Kargui, Birni-Lafia, Toundi-Koaria, Banikani,

Bogobogo, Mamassy Gourma, Torioh, Kompa, Garbey Koara, Kompanti, Loumbou-Loumbou, Monsey Dendi, Monsey Haoussa, Pétchinga). Le climat de la Commune de Karimama est de type soudano-sahélien mais un peu plus sahélien à deux saisons : une saison sèche de novembre à mi-mai et une saison de pluie de mi-mai à octobre avec un maximal de pluie en août [13]. La hauteur de pluie moyenne gravite autour de 900 mm par an. Les pluies s'installent effectivement au début du mois de mai et sont inégalement réparties dans le temps et dans l'espace.

## 2. Approche méthodologique

### 2.1 Méthode de traitement et d'analyse de l'érosivité des pluies

Dans la Commune de Karimama, l'agressivité des pluies est le principal facteur climatique de l'érosion et de la dégradation des terres. Le pouvoir érosif dépend de l'intensité de la pluie [12]. Plus l'intensité est grande, plus l'effet de battage du sol est prononcé. Wischmeier et al., (1971) [14] définissent donc un indice d'érosivité par la relation suivante :

$$R = 0,00059.I^{30} S [(11,9 + \log I) h i]$$

Avec :

$i$  : représente une pluviophase d'intensité sensiblement constante ;

$I i$  : l'intensité pluviométrique correspondante (mm/h) ;

$h i$  : hauteur pluviométrique correspondante (mm) ;

$I_{30}$  : l'intensité maximale observée en 30 mm (mm/h).

Guillobez (1990) [15] fait remarquer qu'au Burkina Faso des auteurs comme [16] ont établi une équation qui permet un calcul rapide de l'indice de l'érosivité. Pour chaque pluie l'indice est une fonction du produit de la pluie P par l'intensité en 30mn ( $I_{30}$ ) :

$$R = 0,0158.P.I_{30} - 1,2 \quad (1)$$

Dans le cadre de ce travail, la formule de [17 s. 72] qui permet de connaître la valeur annuelle de R lorsqu'on ne dispose que des précipitations a été appliquée aux valeurs obtenues afin de déterminer l'indice d'érosivité pour chaque station. Cette formule se présente comme suit :

$$R = 0,0295.P^{1,89} \quad (2)$$

Les données pluviométriques ont été obtenues des stations synoptiques et pluviométriques les plus proches de la Commune de Karimama que sont les stations de Gaya, Kandi, Fada N'Gourma, Malanville, Guéné, Karimama et de Niamey Aéroport.

De façon pratique les précipitations de l'année 2017 sont prises en compte pour chaque station pluviométrique. La moyenne pluviométrique des mois pluvieux allant d'avril à septembre a été calculée pour les quatre stations synoptiques retenues. Elles ont permis principalement de déterminer l'agressivité des pluies vis-à-vis des sols à partir de l'indice d'érosivité (R) en vue d'apprécier le degré d'érosivité des pluies.

Afin que tout le secteur d'étude soit couvert, il a été procédé à l'interpolation des valeurs d'érosivité des pluies obtenues par station proche de la zone d'étude. Cette interpolation a été faite avec la méthode IDW. Le résultat de l'interpolation a été redimensionné à 30 m de résolution. Ainsi, à chaque point du milieu d'étude, la valeur de l'érosivité de la pluie est connue. Ces différentes opérations ont permis l'établissement de la carte d'érosivité des pluies.

### 2.2 Méthode de traitement et d'analyse de l'érodibilité des sols

La vulnérabilité des sols à l'érosion est influencée par les paramètres intrinsèques du sol : stabilité structurale, croûte de battance, état dispersé, matière organique et texture [18]. Selon Wischmeier (1971) [19], la structure, la texture et de la teneur en matière organique sont les facteurs qui conditionnent la perméabilité et la cohésion des agrégats.

Dans le cadre de ce travail, le coefficient d'érodibilité des sols issus des travaux de Roose (1994) [20] a été appliqué aux différentes unités pédologiques de la Commune étudiée. L'application de ces coefficients a permis de générer la carte d'érodibilité des sols.

### 2.3 Méthode de traitement et d'analyse du facteur topographique

La longueur, la forme et surtout l'inclinaison de pente sont des paramètres qui influencent considérablement l'érosion des sols [21]. Selon Maurizot (1995) [22]. Dans le cadre de cette recherche, l'Indice de Position Topographique (TPI) est utilisé pour illustrer l'influence de la topographie dans le processus de l'érosion. L'Indice de Position Topographique (TPI) a été créé par Dickson (2005) [23] d'après les travaux de Weiss (2001) [24] Cet indice s'exprime sous la formule :

$$TPI = \text{Élévation} - \text{Moyen d'élévation des cellules voisines} \quad (3)$$

Pour le calcul de TPI, le choix du seuil de voisinage est déterminant. Ce seuil est choisi en fonction des formes de relief à mettre en évidence. Un seuil élevé permet d'extraire l'ensemble des vallées, un faible seuil permet de caractériser les irrégularités du relief et un seuil peu élevé fait apparaître les crevasses, les réseaux de talweg, les sommets et les crêtes [25]. L'extension "Topography Tools 10.3" est téléchargée et implémenté dans le logiciel ArcGIS 10.3 pour le calcul de cet indice.

## 2.4 Méthode de traitement et d'analyse de la couverture végétale

Le couvert végétal protège le sol de deux manières [12]. D'une part, il augmente l'infiltration, améliore les propriétés (physiques et chimiques) du sol et maintient la cohésion des matériaux grâce au système racinaire. D'autre part, il brise l'énergie cinétique des gouttes de pluie et intercepte une partie des précipitations. Les feuilles des plantes en tombant se transforment en matière organique toute chose qui contribue à la cohésion du sol [26]. Un sol bien couvert par la végétation ralentit l'écoulement des eaux tandis qu'un sol nu est plus exposé à l'érosion. Afin de déterminer la part de ce facteur dans le processus d'érosion, il a été procédé à la classification supervisée de l'image Landsat OLI 2017 de la Commune de Karimama. L'algorithme de Maximum de Vraisemblance est utilisé pour cette opération dans le logiciel Envi 5.1. La descente sur le terrain et l'image haute résolution de Google earth ont permis de confirmer les résultats issus de cette classification.

## 2.5 Méthode de la hiérarchisation des facteurs d'érosion

La hiérarchisation des facteurs d'érosion est faite au moyen de la régression linéaire simple. Un facteur est explicatif de l'érosion si et seulement si : (i) le modèle est globalement significatif et (ii) la probabilité associée au coefficient de corrélation est  $\leq$  à 0,005.

Le modèle de la régression linéaire simple est écrit sous la forme :

$$y = a + bx \quad (4)$$

Avec :

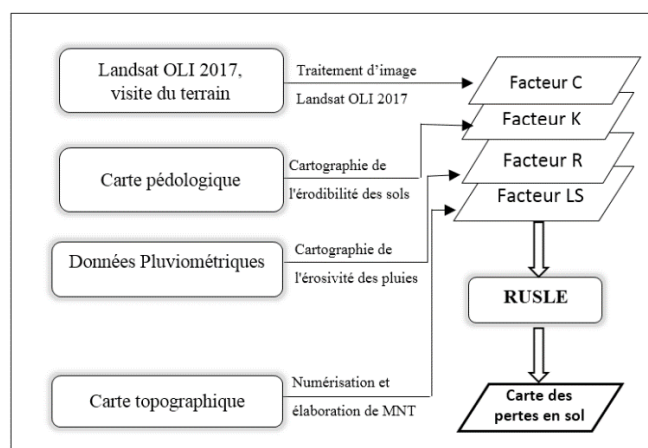
**a** : étant une constante ;

**b** : la pente de la variable explicative.

Dans le cas de cette recherche, la variable dépendante est la perte en sol (**y**) et les variables explicatives (**b**) sont la longueur et l'inclinaison des pentes, la couverture végétale, l'érosivité des pluies et l'érodibilité des sols.

## 2.6 Méthode d'établissement et d'analyse de la carte de la vulnérabilité des sols à l'érosion

De nombreux modèles empiriques (quantitatif et qualitatif) ont été conçus pour évaluer le risque d'érosion hydrique. Ils se différencient en termes de complexité, d'objectif, de description des processus élémentaires et de demande en données d'entrée [29]. Généralement il n'y a pas un modèle idéal pour toutes les applications. La pertinence du modèle dépend de l'utilisation voulue et des particularités du milieu d'étude. Le modèle RUSLE est utilisé dans ce travail. C'est un modèle qui combine les facteurs d'érosion dans un SIG pour l'estimation de la perte annuelle du sol dans les conditions bien définies. La figure 2 résume la procédure générale appliquée pour la cartographie de la vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique dans la Commune de Karimama.



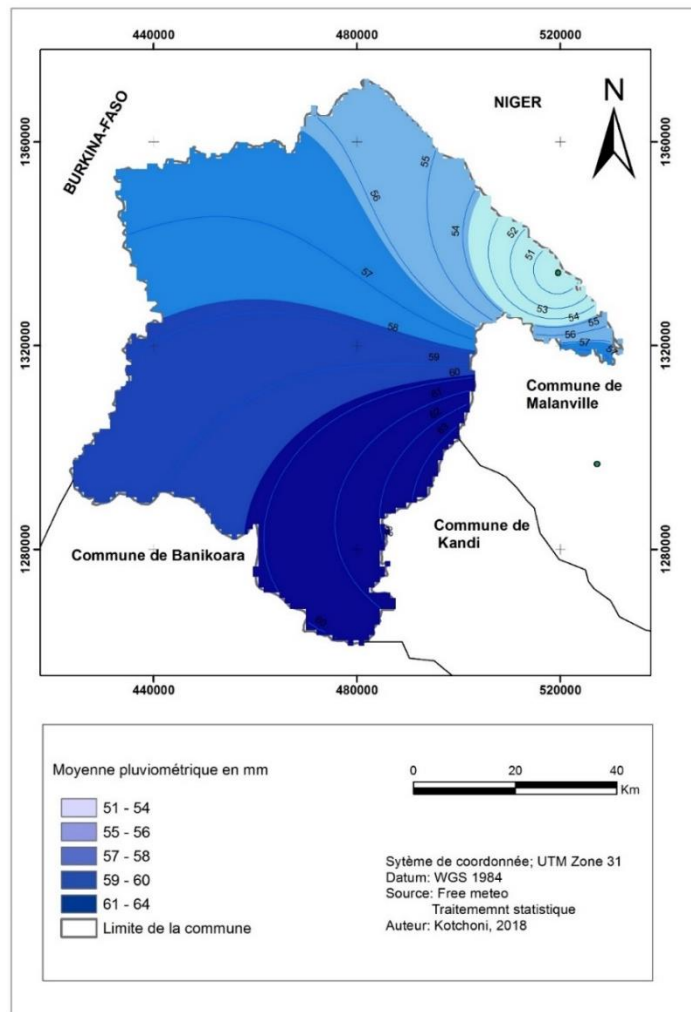
**Figure 2** : Diagramme résumé du modèle RUSLE.

La Figure 2 présente le modèle conceptuel utilisé pour évaluer l'érosion hydrique dans la Commune de Karimama. Le taux d'érosion résulte de la combinaison des facteurs d'érosion dans un Système d'Information Géographique (SIG) et de l'application du modèle RUSLE. Sa détermination a permis d'élaborer, à l'échelle de la Commune de Karimama, la carte de vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique.

### 3 RESULTATS ET DISCUSSION

#### 3.1 Répartition de l'érosivité des pluies

L'érosivité de la pluie représente l'interaction entre l'énergie cinétique de la pluie et la surface du sol [31]. La pluie constitue le principal facteur de l'érosion hydrique. En effet, plus les précipitations sont abondantes, plus leur impact sur l'érosion des sols augmente. La Figure 3 présente la carte d'érosivité de la pluie dans la Commune de Karimama.



**Figure 3:** Répartition de la vulnérabilité de l'érosivité des pluies

La distribution spatiale de l'érosivité des pluies dans la Commune de Karimama présente une concentration des fortes valeurs d'érosivité des pluies du sud-est vers le nord-ouest. Ainsi, on observe une érosivité des pluies plus prononcée à l'intérieur de la RBTW qu'au sein du terroir de la Commune de Karimama. Cette situation s'explique par la distribution globale de la pluviométrie, qui diminue progressivement à mesure que l'on s'éloigne de l'équateur. Étant donné que la pluviométrie évolue avec la latitude, la répartition de la pluie est également affectée, de même que l'érosivité. Plus on se dirige vers le nord, plus les pluies deviennent rares, ce qui entraîne une érosivité très faible. C'est ce qui explique la représentation zonale de la vulnérabilité de l'érosivité. Les valeurs de l'indice d'érosivité de la pluie R (Tableau 1) montrent une diminution verticale du sud vers le nord, indiquant ainsi l'effet de la continentalité sur les précipitations.

**Tableau 1:** Classification de l'indice d'érosivité de la pluie

Classes	Erosivité R de la pluie	Degré d'érosivité
1	51 - 54	Très faible
2	55 - 56	Faible
3	57 - 58	Moyen
4	59 - 60	Fort
5	61 - 64	Très fort

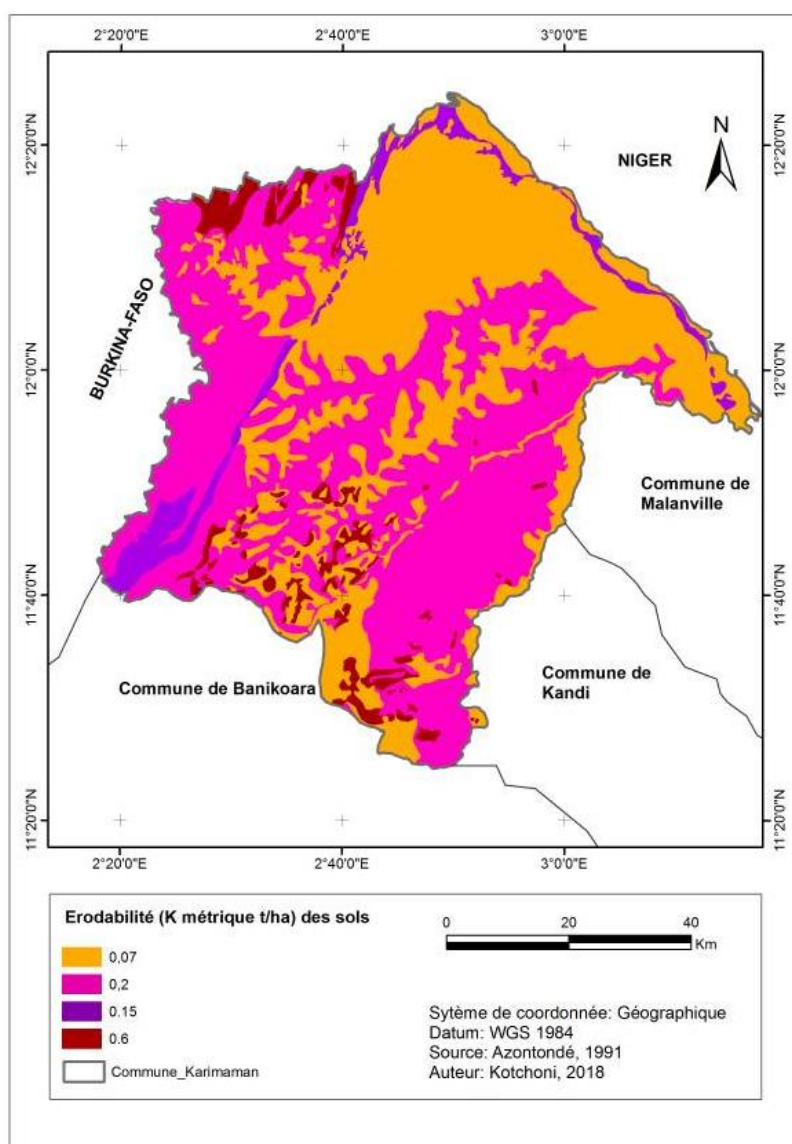
**Source :** Traitement des données pluviométriques.

L'érosivité de la pluie est très faible dans les terroirs riverains de la RBTW. Cependant, elle évolue progressivement de faible à très forte à l'intérieur de la RBTW. Cette évolution s'explique par la baisse progressive de la pluviométrie de

l'intérieur de la RBTW vers ses terroirs riverains à Karimama. Malgré cela, les sols des deux milieux (RBTW et ses terroirs riverains) restent fortement sensibles à l'érosion.

### 3.2 Cartographie de l'érodibilité des sols

De façon générale, les sols de la Commune de Karimama présentent une forte érodibilité. Cependant cette érodibilité diffère des types de sol en présence. La figure 4 présente la répartition spatiale de l'érodibilité K des sols.



**Figure 4:** Dynamique de l'indice d'érodibilité des sols.

Les zones à érodibilité très faible sont principalement observées sur les sols hydromorphes, couvrant 4,76 % du milieu d'étude (Tableau 2). Ce sont des sites de dépôt de sédiments arrachés et transportés par les eaux de ruissellement. Ensuite, les zones à érodibilité faible (4,67 %) de la Commune de Karimama (Tableau 2) se situent au sud, au nord-ouest et au nord-est. Ces zones sont exclusivement constituées de sols minéraux bruts qui, sous l'influence d'une forte pluviométrie, sont soumis à une intense altération.

Les zones à érodibilité moyenne, couvrant 4,57 % de l'espace étudié (Tableau 2), bordent l'est de la Commune, avec de petites extensions au sud-ouest et au nord-est. Les sols dans ces zones sont des sols peu évolués modaux et lithiques. Enfin, les zones à érodibilité forte, représentant 86 % de la superficie totale de la Commune (Tableau 2), sont essentiellement présentes sur tout le territoire du milieu d'étude. Il s'agit des sols ferrugineux tropicaux lessivés et peu lessivés, présentant une forte vulnérabilité à l'érosion hydrique.

Les valeurs de l'indice d'érodibilité K sont comprises entre 0,07 et 0,2 et sont réparties dans le milieu d'étude selon les différentes unités homogènes. La Commune de Karimama présente généralement une forte érodibilité (0,2), couvrant presque la totalité (86 %) de sa superficie (Tableau 2).

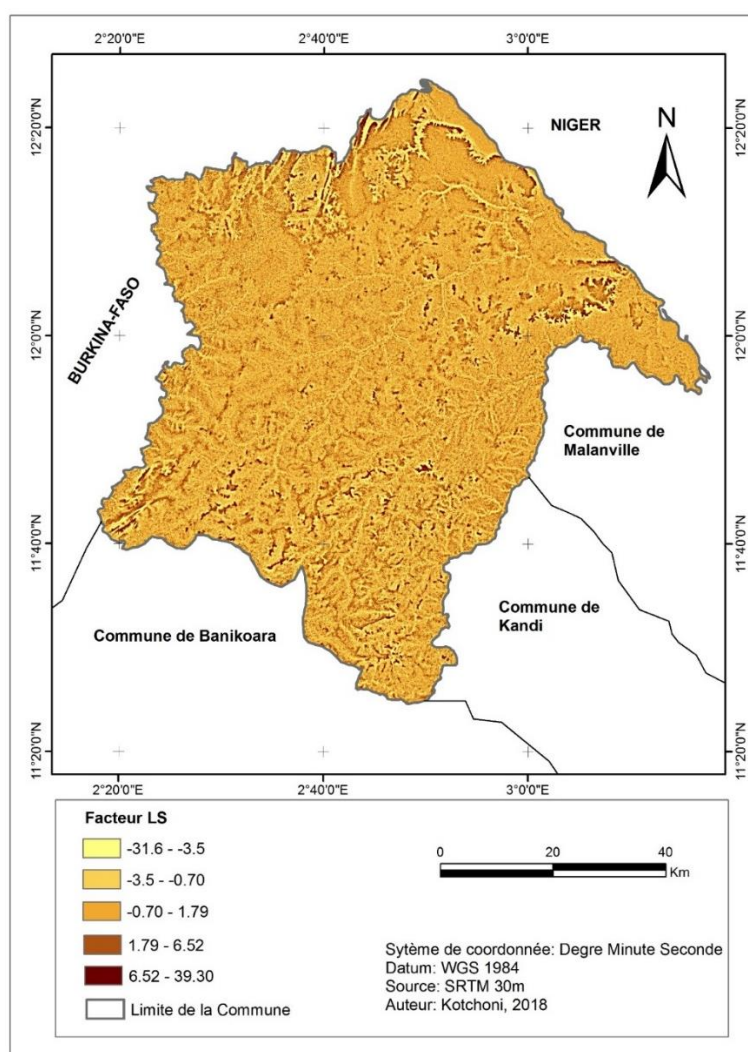
**Tableau2 :** Coefficient d'érodibilité des sols.

Types de sol	Superficie (ha)	% Superficie	Coefficient d'érodibilité K	Degré de vulnérabilité
Sols hydromorphes	29057,03	4,76	0,07	Très faible
Sols minéraux	28512,34	4,67	0,6	Faible
Sols peu évolués	27876,76	4,57	0,15	Moyen
Sols ferrugineux	524753,88	86	0,2	Forte

(Source : Azontondé, 1991 et traitement des données).

### 3.3 Cartographie de l'inclinaison des pentes

La pente et la longueur de la pente influencent grandement l'ampleur de l'érosion par leur action gravitaire et fournissent leur énergie érosive à l'eau. Par ailleurs, l'existence d'une érosion et d'un ruissellement intensif sur des pentes moyennes indique, au contraire, qu'il n'est pas nécessaire d'avoir une forte pente pour déclencher ce phénomène. La reclassification de l'indice topographique a permis la réalisation de la carte de vulnérabilité de la topographie à l'érosion (Figure 5).



**Figure 5:** Répartition de la vulnérabilité topographique.

De façon générale, la carte du facteur topographie est dominée par la présence de la vulnérabilité moyenne, indiquant ainsi que le milieu d'étude serait dans son ensemble faiblement plat. On observe cependant une concentration de la vulnérabilité forte au niveau des "dongas" et près des cours d'eau principaux (Niger et Alibori) au nord-est, à l'est et au sud-est du milieu. Ce sont les versants des vallées qui représentent les parties les plus accidentées de la Commune. Le nord-ouest et le sud-est se présentent comme des zones où se rencontrent les reliefs faiblement élevés, car on y observe par endroit la présence de la vulnérabilité faible. Le Tableau 3 rend compte du niveau de vulnérabilité de la topographie de la Commune de Karimama.

**Tableau 3 :** Le tableau montre la classification des pentes.

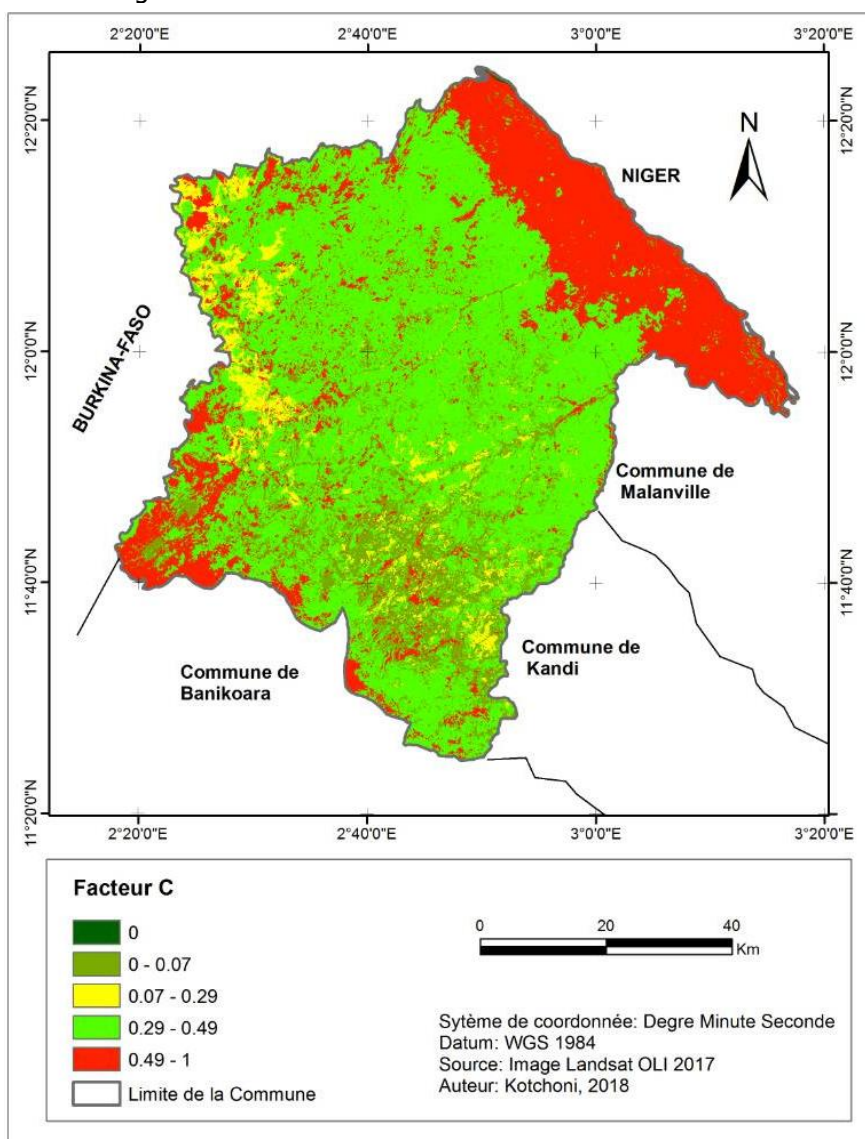
Classe	TPI (%)	Effet sur l'érosion
1	-3,16 – -3,5	Très faible
2	-3,5 – 0,70	Faible
3	-0,70 – 1,79	Moyen
4	1,79 – 6,52	Forte
5	6,52 – 39,30	Très fort

(Source : Traitement de l'image SRTM)

De l'analyse du Tableau 3, cinq classes d'Indice de Position Topographique se dégagent, à savoir : les pentes très faibles (-3,16 à -3,5 %), les pentes faibles (-3,5 à -0,70 %), les pentes moyennes (-0,70 à 1,79 %), les pentes fortes (1,79 à 6,52 %), et les pentes très fortes (6,52 à 39,30 %). Cette nouvelle classification a permis d'apprécier l'effet de la pente dans le processus de l'érosion hydrique dans le milieu d'étude. Les zones où la vulnérabilité des pentes est faible, c'est-à-dire les zones de faible pente, présentent une vulnérabilité non négligeable. Cela s'explique par le fait que l'érosion peut être intense sur des pentes relativement faibles. On peut donc affirmer que le niveau de vulnérabilité des sols à l'érosion ne dépend pas seulement de la topographie, mais aussi des conditions de la couverture végétale.

### 3.4 Cartographie du couvert végétal

Le risque d'érosion diminue lorsque le sol est bien protégé par la végétation ou une couche de résidus de culture. La végétation et les résidus limitent l'impact des gouttes de pluie, réduisent la vitesse d'écoulement de l'eau et améliorent l'infiltration de l'eau dans le sol. En effet, les sols nus sont les plus vulnérables à l'érosion. La Figure 6 présente l'indice de sensibilité de la couverture végétale dans le milieu d'étude.



**Figure 6 :** Répartition de l'indice de la sensibilité de la couverture végétale.



Il ressort de la Figure 6 que la Commune de Karimama présente, dans les terroirs villageois et au niveau de la périphérie au sud-ouest du RBTW, un état de surface très fortement sensible à l'érosion. Cependant, les faibles vulnérabilités sont réparties sur l'ensemble du RBTW. En ce qui concerne les états de surface moyennement sensibles, ils sont dispersés au nord-ouest et au sud-est du RBTW. Ce constat reflète l'état de dégradation avancée des sols, car l'observation de la très forte vulnérabilité des sols dans les terroirs villageois et au sud-ouest du Parc indique une absence totale de couverture végétale. Cette absence de couverture végétale expose davantage le sol à l'érosion. L'évaluation de la couverture végétale a été réalisée sur la base de la reclassification des valeurs de réflectance des sols (Tableau 4).

**Tableau I :** Reclassification des valeurs de réflectance.

Classes	Valeurs de réflectance	Degré d'exposition des sols
1	0 - 50	Très faible
2	50,001 - 100	Faible
3	100,001 - 150	Moyen
4	150,001 - 200	Fort
5	200,001 - 255	Très forte

(Source : Traitement d'image Landsat OLI 2017).

L'analyse du Tableau 4 révèle cinq classes de vulnérabilité de l'état de surface à l'érosion hydrique. Les zones fortement végétalisées sont associées aux valeurs de réflectance les plus faibles (0 - 50), tandis que les valeurs les plus élevées (200,001 - 255) correspondent aux sols nus. Les zones de vulnérabilité moyenne (100,001 - 150) correspondent à la savane herbeuse, souvent dégradée, et représentent le type de couvert végétal le plus sensible aux processus d'érosion dans la Commune. L'exposition des sols à l'érosion est due à la déforestation, au surpâturage et aux feux de végétation qui tendent à substituer les formations primitives à des couverts secondaires de nature différente, telle que la savane herbeuse.

### 3.5 Hiérarchisation des facteurs d'érosion

Le tableau 5 récapitule les pertes de sol, l'équation de la droite d'ajustement, les facteurs d'érosion et la probabilité associée à chaque modèle.

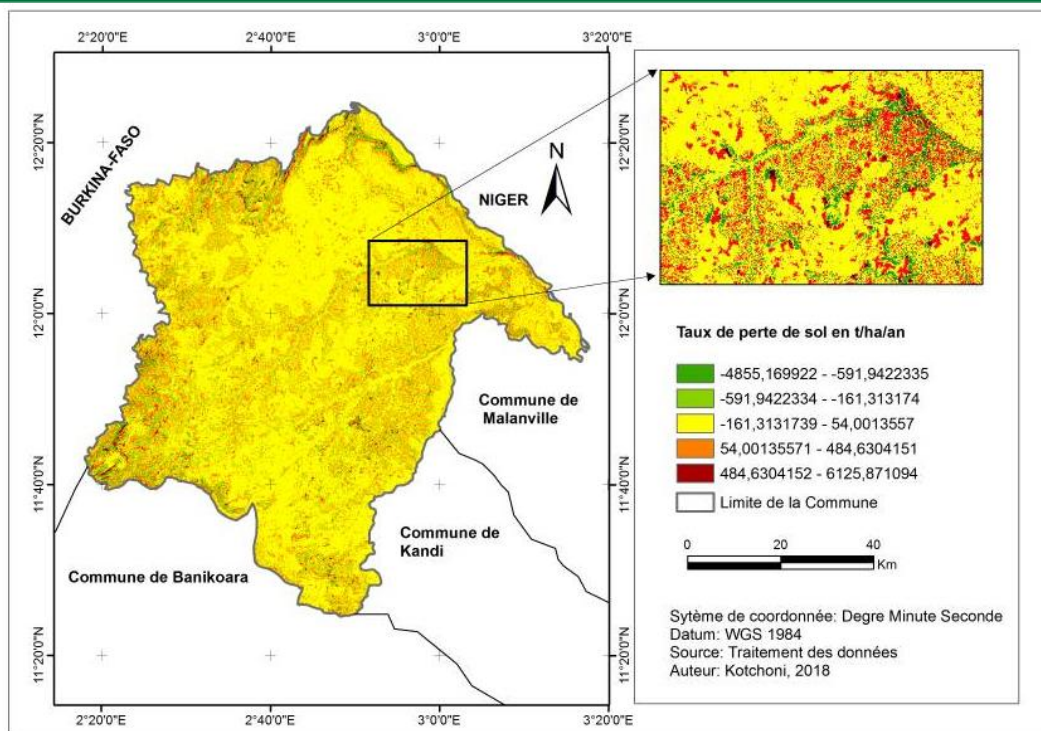
**Tableau 5 :** Coefficient d'ajustement  $R^2$  du modèle perte de sol et facteurs d'érosion

Forme d'érosion	Variables	Equations	Coefficient de corrélation	Probabilité
Perte de sol	Facteur LS	$Erosion\_kari = 39,2961 * \text{Facteur LS}$	24,92	0,0001
	Facteur C	$Erosion\_kari = 215,6871 * \text{facteur C}$	15,64	0,0001
	Facteur R	$Erosion\_kari = 1,4915 * \text{Facteur R}$	2,18	0,0001
	Facteur K	$Erosion\_kari = 401,0157 * \text{Facteur K}$	0,62	0,0001

Il ressort de l'analyse du Tableau V que la probabilité est identique et significative pour toutes les variables étudiées (valeur de  $P = 0,0001$ ). Cependant, le coefficient de détermination  $R^2$  de la relation entre les pertes de sol et la longueur et l'inclinaison de la pente est de 24,92 %, de 15,64 % pour la couverture végétale, de 2,18 % pour l'érosivité des pluies et de 0,62 % pour l'érodibilité des sols. Ainsi, les facteurs d'érosion dans la Commune de Karimama, par ordre d'importance, sont la longueur et l'inclinaison des pentes, la couverture végétale, l'érosivité des pluies et l'érodibilité des sols. Après l'étude des facteurs intervenant dans le processus d'érosion dans la Commune de Karimama, les résultats obtenus sont intégrés dans le modèle d'analyse retenu pour évaluer la vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique.

### 3.6 Niveau de vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique

Le résultat issu de la combinaison des différents facteurs d'érosion dans le modèle RUSLE est présenté sous forme de carte. La figure 7 présente les estimations de pertes annuelles de sol dans la Commune de Karimama.



**Figure 7:** Vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique.

La Figure 7 illustre l'étendue des pertes de sol dans la Commune de Karimama. Les pertes de terre, déterminées par le modèle RUSLE pour les quatre facteurs d'érosion, varient entre -4855,169922 et 6125,871094 t/ha/an. Les valeurs négatives indiquent le dépôt de sédiments, tandis que les valeurs positives correspondent aux pertes de sol. Ces valeurs d'érosion potentielle (t/ha/an), obtenues à l'échelle de la Commune, sont regroupées en cinq classes de vulnérabilité comme suit : une première classe de vulnérabilité très faible (-4855,169922 à -591,9422335 t/ha/an) et une deuxième classe de faible vulnérabilité comprise entre -591,9422335 et -161,3131739 t/ha/an, réparties sur l'ensemble de la RBTW et les bordures des principaux cours d'eau tels que le Niger, la Mékrou et l'Alibori. Ensuite, une classe de vulnérabilité moyenne (-161,3131739 à 54,0013557 t/ha/an) est dispersée dans toute la Commune étudiée. Les classes de forte vulnérabilité (54,0013557 à 484,6304151 t/ha/an) et de très forte vulnérabilité (484,6304151 à 6125,871094 t/ha/an) sont localisées dans le terroir villageois et à la périphérie sud-ouest de la RBTW. Le Tableau 5 présente la répartition spatiale des classes d'érosion dans la Commune de Karimama.

## 4 DISCUSSION

La carte de la vulnérabilité des sols à l'érosion obtenue par le modèle RUSLE montre une répartition spatiale « éparpillée » des classes d'érosion dans la Commune de Karimama. Les taux d'érosion varient entre -4855,169922 et 6125,871094 t/ha/an, avec une moyenne comprise entre -161,3131739 et 54,0013557 t/ha/an. Ces taux restent en général inférieurs ou supérieurs ou proches à ceux estimés par les travaux effectués par d'autres auteurs. A titre de comparaison, des études réalisées à l'échelle du Rif ont révélé des taux d'érosion moyens plus élevés, par exemple 65 t/ha/an ont été estimées au niveau du bassin versant de Nakhla et al., (2012) [27] alors qu'il est de , 61 t/ha/an au niveau du bassin versant de l'oued Telata dans le Prérif oriental [28] et 55,35 t/ha/an au niveau de l'oued Boussouab [30]. D'autres études réalisées par et al., (201) [32] au niveau du barrage Ibn Battouta et al., (2012) [33] au niveau montrent respectivement une perte moyenne en terre faible de 39,6 t/ha/an et 37 t/ha/an.

Selon Wall et al., (2002) [35], une érosion très faible à faible varie entre 0 et 11 t/ha/an, une érosion modérée entre 11 et 22 t/ha/an, alors qu'au-delà de 22, l'érosion est forte (22 à 33 t/ha/an) à très forte (> 33t/ha/an). Au sud de l'Espagne, une étude [35] a montré que les taux d'érosion varient sensiblement en fonction du type de l'occupation du sol, de 22 t/ha/an sur les terres en vignobles, à 87 t/ha/an sur les champs à terrasses abandonnés, jusqu'à 115 t/ha/an sur des champs de céréales. Cela peut être une raison pour laquelle les taux d'érosion sur les terres agricoles et nues au niveau de la Commune de Karimama changent parfois sur des terrains de même lithologie et des conditions de topographie similaires. Les valeurs d'érosion obtenues par l'application de cette méthode peuvent varier considérablement en raison des différentes conditions météorologiques. Par contre, à long terme, les valeurs moyennes obtenues par RUSLE représentent les pertes en sol avec plus de précision [36].

Les classes de vulnérabilité importante à l'érosion correspondent aux niveaux, moyen, fort et très fort. Ceux-ci affectent 42,57 % du milieu d'étude, avec une répartition générale de la vulnérabilité moyenne dans toute la Commune. Ces classes se trouvent dans les terroirs villageois, dans la zone tampon et une petite partie de la périphérie sud-ouest de la RBTW. Ces résultats rejoignent ceux de Aké et al., (2012) [37] qui a trouvé que le phénomène d'érosion est particulièrement sensible dans les localités où sont implantées les principales plantations agro-industrielles. De même dans le cadre de la mise en œuvre de la convention sur la lutte contre la désertification au Gabon les études montrent que les actions anthropiques, telles que l'intense exploitation forestière et les techniques agricoles traditionnelles et modernes augmentent les risques d'érosion des sols. Cette situation pourrait s'expliquer par des pratiques agricoles extensives et une croissance de la population qui induit une augmentation des superficies emblavées dans les terroirs et dans la zone tampon. La conversion des espaces forestiers en zones de culture accentue les phénomènes d'érosion, dont le degré d'occurrence est lié au type d'utilisation [38].

## 5 CONCLUSION

L'érosion des sols constitue la principale cause de dégradation des terres dans la Commune de Karimama. Plusieurs facteurs déterminants ont été identifiés, ce qui a permis d'établir la carte de vulnérabilité des sols à l'érosion. La cartographie de la vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique a permis de distinguer cinq classes de vulnérabilité à l'érosion hydrique. Près de la moitié (42,57 %) de la superficie totale de la Commune présente une vulnérabilité moyenne à forte (-4855,169922 à 6125,871094 t/ha/an) à l'érosion. Ces zones couvrent l'ensemble des terroirs riverains et la périphérie sud-ouest de la RBTW. L'ampleur de la dégradation des terres provoquée par la pression humaine représente une menace pour l'intégrité de la RBTW et pour les moyens d'existence dans la Commune de Karimama. Il est donc urgent que les producteurs agricoles modifient leurs pratiques agricoles. Ils doivent désormais mettre en œuvre des stratégies leur permettant de passer d'une agriculture extensive à une agriculture intensive.

## 6 REFERENCE

- [1] Durand, Mathieu A Sylvy Jaglin. Inégalités environnementales et écologiques : quelles applications dans les territoires et les services urbains ? *Flux* [online]. 2012; **89-90**(3-4): 4-1. doi:10.3917/flux.089.0004
- [2] Robert, Michel A Pierre Stengel. Sols et agriculture: ressource en sol, qualité et processus de dégradation. Une prospective mondiale, européenne et française. *Cahiers Agricoles*. 1999; **8**(4): 301-308.
- [3] Zekri, N. A. A. Tounkob. Cartographie de la vulnérabilité potentielle des sols à l'érosion hydrique dans le bassin versant de Tafna (Nord-Ouest Algérien). *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*. 2021; **9**(4): 608-615.
- [4] Benbrahim, Kawtar Fikri, Mohammed Ismaili, Sanae Fikri Benbrahim A Abdellatif Tribak. Problèmes de dégradation de l'environnement par la désertification et la déforestation: impact du phénomène au Maroc. *Science et changements planétaires/Sécheresse*. 2004; **15**(4): 307-320.
- [5] Milandou, Idriss Auguste Williams M'bouka. *Etude de la dégradation des routes en terre, par l'érosion hydrique, en milieu rural: cas de la Sous-préfecture de Goma tsé-tsé (sud du Congo)*. B.m., 2019. PhD Thesis. Université Marien N'Gouabi (Congo).
- [6] Ozer, Pierre, Yvon-Carmen Hountondji, Abdoul Jelil Niang, Salifou Karimoune, Ousmane Laminou Manzo A Marc Salmon. Désertification au Sahel: historique et perspectives. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*. 2010, **54**.
- [7] Assogba, S. Claude-Gervais, D. Sandrine ZANCRAN a Rodrigue V. Cao DIOGO. Perception de l'efficacité des outils d'information et de communication dans la diffusion des pratiques de restauration des terres au Nord-Bénin. *Annales de l'Université de Parakou-Série Sciences Naturelles et Agronomie*. 2022; **12**(2): 1-12.
- [8] Assogba, S. C. G., E. Akpinfa, G. Gouwakinnou A S. Larissa. La gestion durable des terres: analyse d'expériences de projets de développement agricole au Bénin (Rapport de Synthèse). *Institute for Advanced Sustainability Studies, Potsdam, Germany*. 2017, 32.
- [9] Mccarthy, James J. *Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability: contribution of Working Group II to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. B.m.: Cambridge University Press, 2001.
- [10] Toko, I. Productivité des pâturages de savanes en relation avec les phénomènes d'érosion naturelle des sols (Dongas) dans le Parc National du W. *Mémoire de DEA EDP/FLASH/UAC*. 2005.
- [11] Avakoudjo et al., 2014 - Google Scholar [online]. [vid. 2023-12-02]. Dostupné z: [https://scholar.google.com/scholar?hl=fr&as\\_sdt=0%2C5&q=Avakoudjo+et+al.%2C+2014&btnG=](https://scholar.google.com/scholar?hl=fr&as_sdt=0%2C5&q=Avakoudjo+et+al.%2C+2014&btnG=)
- [12] El Hage Hassan, Hussein, Laurence Charbel A Laurent Touchart. Cartographie des conditions de l'érosion hydrique des sols au Mont-Liban: exemple de la région d'El Aaqouira. *Physio-Géo. Géographie physique et environnement*. 2015; **9**: 141-156.
- [13] Adam, S. A. M. Boko. Le Bénin Les éditions du Flamboyant. *Edicef: Paris*. 1993, 96.
- [14] Wischmeier, Walter H. a Dwight David SMITH. *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*. B.m.: Department of Agriculture, Science and Education Administration, 1978. 537.
- [15] Guillobez, Serge. Réflexions théoriques du ruissellement et de l'érosion. Bases d'un contrôle, application à la détermination des écartements entre dispositifs anti-érosifs. 1990.
- [16] Galabert, J. A Eugène Millogo. Indice d'érosion par la pluie en Haute Volta. 1972.
- [17] Roose, E. J. Adaptation des méthodes de conservation des sols aux conditions écologiques et socio-économiques de l'Afrique de l'Ouest. *Agronomie tropicale*. 1977; **32**(2): 132-140.
- [18] Roose, Eric A Jean-Marie Sarrailh. Erodibilité de quelques sols tropicaux. Vingt années de mesure en parcelles d'érosion sous pluies naturelles. *Cahiers de l'ORSTOM*. 1990.
- [19] Wischmeier, Walter H., C. B. Johnson A B. V. Cross. Soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. 1971.
- [20] Azontondé, H. A. Propriétés physiques et hydrauliques des sols au Bénin. *IAHS-AISH publication*. 1991; (199): 249-258.
- [21] Roose, Eric. *Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES)*. B.m.: Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, 1994.
- [22] Maurizot, P. A M. Delfau. Cartographie de la sensibilité à l'érosion, Province Sud de Nouvelle-Calédonie. *Rapport BRGM n. 1995, 38660*.
- [23] Dickson, Brett G., Jeffrey S. Jenness A Paul Beier. Influence of vegetation, topography, and roads on cougar movement in southern California. *The Journal of Wildlife Management*. 2005, **69**(1), 264-276.
- [24] Weiss, Andrew. Topographic position and landforms analysis. In: *Poster presentation, ESRI user conference, San Diego, CA*. 2001.
- [25] O. S. S. Rapport de Synthèse. 2012.

- [26] Kabre, Mamadou. Vulnérabilité des sols à l'érosion dans la région du Centre Nord du Burkina Faso: approche par télédétection et SIG (Système d'Information Géographique). 2009.
- [27] Tribak, A., A. El Garouani A M. Abahrour. L'érosion hydrique dans les séries marneuses tertiaires du préif oriental: agents, processus et évaluation quantitative. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*. 2012; **1**(1): 47–52.
- [28] Poesen, Jean A Hanoch Lavee. Rock fragments in top soils: significance and processes. *Catena*. 1994; **23**(1–2); 1–28.
- [29] Mercader et al., 2006 - *Google Scholar* [online]. [vid. 2023-12-02]. Dostupné z: [https://scholar.google.com/scholar?hl=fr&as\\_sdt=0%2C5&q=Mercader+et+al.%2C+2006&btnG=](https://scholar.google.com/scholar?hl=fr&as_sdt=0%2C5&q=Mercader+et+al.%2C+2006&btnG=)
- [30] Sadiki, Abdelhamid, Saïdati Bouhlassa, Jamal Auajjar, Ali Faleh A Jean-Jacques Macaire. Utilisation d'un SIG pour l'évaluation et la cartographie des risques d'érosion par l'Equation universelle des pertes en sol dans le Rif oriental (Maroc): cas du bassin versant de l'oued Boussouab. *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre*. 2004; **26**(2004): 69–79.
- [31] Wischmeier, Walter H., C. B. Johnson A B. V. Cross. Soil erodibility nomograph for farmland and construction sites [online]. 1971 [vid. 2023-12-02]. Available on: <https://trid.trb.org/view/125184>
- [32] Issa, Lamiae Khali, Ahmed Raissouni, Rachid Moussadek, A. El Arrimissa, L. Khali, A. Raissouni, R. Moussadek A A. El Arrim. Mapping and assessment of water erosion in the Khmiss Watershed (North Western Rif, Morocco). *Current Advances in Environmental Science*. 2014; **2**(4): 119–130.
- [33] Raissouni, Ahmed, Lamiae Khali Issa, A. Arrim, M. Maâtouk A Roberto Passalacqua. GIS-based model to assess erosion sensitivity in Northern Morocco. Laou watershed case study. *International Journal of Geosciences*. 2012; **3**(3): 610–626.
- [34] Wall, G. J., D. R. Coote, E. A. Pringle A I. J. Shelton. RUSLE-CAN. 2002.
- [35] García-Ruiz, José M. The effects of land uses on soil erosion in Spain: A review. *Catena*. 2010; **81**(1): 1–11.
- [36] Kumar, Amit, Mamta Devi A Benidhar Deshmukh. Integrated remote sensing and geographic information system based RUSLE modelling for estimation of soil loss in western Himalaya, India. *Water resources management*. 2014; **28**: 3307–3317.
- [37] Aké, Gabriel Étienne, Boyossoro Hélène Kouadio, Miessan Germain Adja, Jean-Baptiste Ettien, Kôkôh Rose Effebi A Jean Biémi. Cartographie de la vulnérabilité multifactorielle à l'érosion hydrique des sols de la région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). *Physio-Géo. Géographie physique et environnement*. 2012; **6**, 1–42.
- [38] Rijdsdijk, A. A Leendert Adriaan Bruijnzeel. Erosion, sediment yield and land-use patterns in the upper Konto watershed East Java, Indonesia. 1. Introductory chapters. 2. Results of the 1987-1989 measuring campaigns. *Project Communication Series DHV Consulting Engineers (Netherlands)*. 1990, (18, ç. 1).



How to cite this article: **Andry Harinaina Rabearisoa, Bertrand Manjolongo, et Ravo Victoire Nasolomampionona.**

**ÉTUDE APPROFONDIE DE LA CONTAMINATION CHIMIQUE PAR LE SULFATE D'ALUMINE ET LA CHAUX VIVE DANS LES EAUX DU LAC TSIANDRAZANDOHA, AMBOSITRA, MADAGASCAR : CARACTERISATION ET CONTROLE.**  
*Am. J. innov. res. appl. sci.* 2023;17(6): 41-52. DOI : [10.5281/zenodo.10251091](https://doi.org/10.5281/zenodo.10251091)

This is an Open Access article distributed in accordance with the Creative Commons Attribution Non Commercial (CC BY-NC 4.0) license, which permits others to distribute, remix, adapt, build upon this work non-commercially, and license their derivative works on different terms, provided the original work is properly cited and the use is non-commercial. See:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>