

Évaluation du risque d'érosion du sol au Sahel : cas du paysage de Tillabéry

Mansour MAHAMANE¹, Issiaka ISSAHAROU MATCHI¹, Volker HOCHSCHILD² et Ali MAHAMANE^{1,3}

¹ Université de Diffa, Institut Supérieur en Environnement et Ecologie, Département de sol,
Cartographie et Télédétection, BP 78 Diffa, Niger

² Eberhard Karls University, Mathematisch - Naturwissenschaftlichen Fakultät, Tuebingen, Allemagne

³ Université Abdou Moumouni, Faculté des Sciences et Techniques Département de Biologie,
BP 10662 Niamey, Niger

* Correspondance, courriel : msourtchiani77@gmail.com

Résumé

Pour lutter contre la dégradation des écosystèmes au Sahel, il est indispensable de comprendre les processus et les mécanismes d'érosion des sols. Cette étude vise à évaluer l'érosion hydrique dans le paysage de Tillabéry (Niger). L'approche méthodologique vise à développer des modèles à l'aide de l'équation Universelle Révisée des pertes en sols (RUSLE) et des modèles de dépôts d'érosion à base d'énergie par courant unitaire (USPED) pour quantifier et évaluer l'érosion hydrique. Les informations relatives au sol, les données satellitaires du capteur Landsat et les paramètres numériques du modèle topographique ont été utilisés pour prédire la texture et de quantifier et évaluer l'érosion hydrique. A l'issue de cette étude, il ressort que le limon (63,91 %) est la texture du sol dominante, suggérant ainsi que la zone d'étude a tendance à avoir une forte perte en sol et les valeurs moyennes annuelles de perte de sol varient de 0 à 140 t / ha par an. Les résultats révèlent aussi que les scénarios de manifestation d'érosion du sol prévoient une érosion du sol plus importante (> 50 t / ha / an) dans la zone d'étude en 2070. Enfin, ils suggèrent que les facteurs anthropiques et topographiques sont les principaux facteurs d'impact dans les zones affectées par ce fléau.

Mots-clés : *érosion du sol, RUSLE, USPED, "Data mining", Sahel.*

Abstract

Assessment of the water erosion risk in the Tillabéry landscape, Sahel region, Niger

To combat the degradation of ecosystems in the Sahel, it is essential to understand the processes and mechanisms of soil erosion, this study aimed to assess water erosion in the landscape of Tillabéry (Niger). The methodological approach was to develop the models using the Revised Universal Equation of Soil Losses (RUSLE) and unit current energy-based erosion deposition models (USPED) in order to quantify and assess water erosion. Soil information, satellite data from the Landsat sensor and digital parameters from the topographic model were used to predict the soil texture and to quantify and assess water erosion. This study, it appears that the silt (63.91%) is the dominant soil texture, thus suggesting that the study area tends to have a high soil loss and the annual average loss values of soil range from 0 to 140 t / ha per year. The results also reveal that the soil erosion manifestation scenarios predict greater soil erosion (> 50 t / ha / year) in the study area in 2070. Finally, they suggest that anthropogenic and topographic factors are the main impact factors in the affected areas.

Keywords : *water erosion, RUSLE, USPED, Data mining, Sahel.*

1. Introduction

La destruction du couvert végétal prive le sol de sa protection naturelle avec des conséquences néfastes sur le régime hydrique, accélérant ainsi le processus d'érosion hydrique et éolienne [1]. La perte du matériel organique et des particules fines dans le sol pourrait provoquer des dégâts quasi irréversibles au niveau des écosystèmes [2, 3]. La dégradation des écosystèmes s'accélèrent grâce à la déforestation, au surpâturage et à la sécheresse dans le Sahel. Dans la région de Tillabéry (Niger), une diminution du couvert végétal de l'ordre de 80 % a été observée due à l'augmentation des besoins des populations en bois de chauffe et la progression du front agricole [4]. Cette augmentation des terres de cultures au détriment des savanes les sols à l'érosion qui entraîne des pertes en terres [5]. L'érosion des sols est un phénomène naturel inévitable qui devient un problème environnemental et économique majeur qui s'accélère et prend de l'ampleur au Sahel [6]. Elle est la principale cause de la perte de la productivité des sols (réduction des éléments nutritifs principalement l'azote, le phosphore et le potassium), de la dégradation des terres et de la désertification dans les régions semi-arides [7]. Elle contribue à la contamination des eaux affectant ainsi sa qualité. L'érosion diminue en outre la teneur en particules fines des sols ainsi que, la capacité de rétention d'eau et la profondeur des sols supérieurs. Le risque d'érosion du sol est influencé par la texture du sol. La texture du sol affecte directement la porosité du sol, les conditions de drainage, la perméabilité et la capacité de rétention d'eau et la fertilité du sol à long terme [8]. Dans la partie Sahélienne de l'ouest du Niger (le paysage de Tillabéry), ce problème d'érosion des sols se pose avec acuité affectant par voie de conséquence la base productive des populations largement dépendantes de la production agricole pour leur subsistance. Par conséquent il s'avère nécessaire d'évaluer l'érosion hydrique, ainsi que la configuration du paysage de Tillabéry (Niger) afin d'accroître la résilience des communautés dans un contexte du changement climatique. Ainsi cette étude vise à (i) déterminer la texture du sol; (ii) quantifier l'érosion hydrique et (iii) analyser des scénarios de risque d'érosion hydrique des sols en 2070.

2. Matériel et méthodes

2-1. Matériel

2-1-1. Site d'étude

La zone d'étude est située dans le département de Tillabéry comprenant une grande partie de la vallée du fleuve Niger (*Figure 1*). Les précipitations annuelles sont comprises entre 250 et 400 mm. Le vent est un autre facteur climatique influant sur la dégradation des sols. Le processus d'érosion éolienne a lieu sous l'influence des vents à grande vitesse. La combinaison de l'effet du vent et des températures élevées du sol affecte sérieusement l'établissement de la couverture végétale. Des vents supérieurs à 100 km / h ont été observés dans la zone [9]. Dans cette zone le sol est très improductif et pose d'énormes problèmes pour la production agricole [8]. Cette zone a été choisie en raison du fait qu'elle se situe au cœur du Sahel où la désertification est le problème environnemental le plus grave. Aussi, la profondeur et la largeur du fleuve Niger sont en diminution constante, due au phénomène de l'ensablement. Les céréales telles que le mil et le sorgho constituent l'aliment de base et représentent environ 85 % des besoins en production de cultures vivrières des populations de la zone d'étude [8]. En outre, le bétail joue également un rôle important dans l'économie. Par conséquent, l'élevage et l'agriculture sont toujours en compétition pour les terres fertiles disponibles. Cela a engendré une série de conflits entre les nomades et les sédentaires.

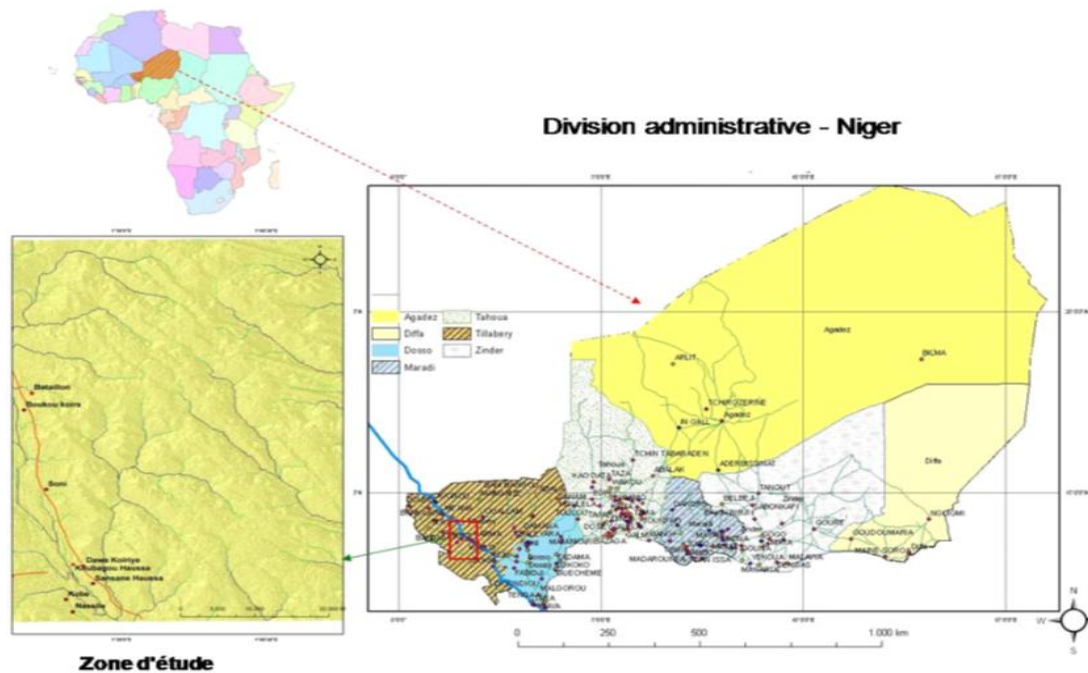


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude

2-2. Méthodes

2-2-1. Changement de dynamique du couvert végétal et le facteur de la couverture (C)

Dans le cadre de la présente étude, une approche pluridisciplinaire et multi-échelle basée l'échelle de temps (de 1973 à 2017) et celle de l'espace (du simple point jusqu' à la totalité de la zone d'étude) a été adoptée. Pour analyser la dynamique de l'occupation des sols, les images Landsat ont subi le prétraitement (correction atmosphérique, géométrique et radiométrique) avec le logiciel QGIS et ERDAS imagine. Dans cette étude, la légende des unités d'occupation des sols utilisée s'est basée sur la nomenclature d'occupation des terres publiée par UNEP/ FAO [10] et les informations des signatures spectrales des données Landsat. Nous avons, en plus, utilisé la classification supervisée à cause de sa robustesse et de son aspect pratique. La fiabilité de la classification ou précision globale a été calculée pour la dynamique de l'occupation des sols des années 1973, 1989, 2001 et 2007 avec respectivement 83 %, 91%, 92 et 90 %. L'occupation des sols à partir d'images Landsat de 1973, 1989, 2001 et 2007 ont été converties en facteur de la couverture (C). La valeur de C est comprise entre 0 et 1. Ainsi, si la valeur de C est égale à 0 (par exemple au niveau de la rivière), ceci indique que l'érosion est nulle, alors que si la valeur de C atteint le maximum 1, on assiste au maximum d'érosion (par exemple, les zones nues). Dans le cadre de cette étude, pour les terres agricoles nous avons considéré 0,4 comme étant la valeur de C [11]. Par contre, nous avons utilisé 0,01 et 0,1 comme valeurs de C pour les zones arbustives et la végétation sur le plateau respectivement [12].

2-2-2. Échantillonnage de sol et méthodes d'analyse au laboratoire

Pour étudier la quantité et la distribution spatiale de la structure et de l'érosion du sol, l'échantillonnage aléatoire stratifié a été adopté en utilisant comme variables de stratification la topographie et l'occupation des sols. Nous avons utilisé l'indice d'humidité ("Topographic wetness index") qui a été dérivé de la topographie radar Shuttle (MNT) à une résolution de 90 m avec deux classes telles que les zones d'humidité potentielle du sol (valeur 1) et les zones sèches (valeur 2). L'indice d'humidité a été combiné à L'occupation des sols dérivée d'une image Landsat. Ainsi 12 unités environnementales ont été identifiées dans la zone

d'étude. Cependant nous avons considéré les dix unités environnementales en excluant les deux qui représentent les masses d'eau (fleuve Niger) car ne présentant aucune catégorie classique d'attributs du sol. Dans chaque unité environnementale nous avons prélevé au hasard 25 échantillons de sol (250 échantillons de sol à 30 cm de profondeur). Les coordonnées géographiques de tous les points échantillonnés ont été prises à l'aide de GPS et les échantillons du sol ont été testés par la méthode de toucher. Aussi 40 échantillons de sol (4 échantillons dans les 10 unités environnementales) ont fait l'objet d'analyse au laboratoire afin de déterminer le pourcentage de taille des particules, classes USDA selon la méthode de la pipette, et la quantité du carbone organique par la méthode de combustion.

2-2-3. Modèles numériques et prédiction de la texture du sol à l'aide du modèle TreeNet

Les Modèles Numériques de Terrain (MNT) de la mission de topographie radar de la navette à 90 m de résolution spatiale ont été obtenus auprès de l'Université du Maryland. Aussi, pour prédire la distribution spatiale de la texture du sol à partir de paramètres de terrain les coordonnées x et y collectées sur le terrain ainsi que le champ z représentant les informations de texture provenant de 250 points d'observation ont été utilisés. SAGA GIS (Système d'analyses géo-scientifiques automatisées) a été utilisé pour superposer des attributs de terrain dérivés de modèles numériques (MNT). La prévision spatiale de la texture du sol du paysage a été développée à l'aide du modèle TreeNet [14]. La prédiction de la texture du sol a été quantifiée à l'aide de logiciel SAGA GIS, la méthode d'interpolations spatiale (distance au carré inverse^o) et les attributs de terrain (variable indépendantes). La distance au carré inverse (DCI) a été sélectionnée sur la base des histogrammes de distribution d'erreur qui montrent que la méthode offre des performances supérieures à celles des méthodes de Krigeage et Splines. De plus, DCI présentait le meilleur résultat du point de vue de la visualisation.

2-2-4. Modélisation de l'érodibilité du sol (K)

Dans cette étude, l'érodibilité du sol (K) a été exprimée en utilisant deux **Équations** empiriques notamment :

(i) Une relation de calcul a été proposée par [15] dans lesquels ils ont appliqué le pourcentage des classes de texture du sol et du diamètre moyen géométrique respectifs pour obtenir le K (sans prendre en compte les données relatives à la matière organique). Ceci est exprimé dans **l'Équation** suivante.

$$k = 0,0034 + 0,0405 * \exp \left[-0,5 \left(\frac{\log Dg + 1,659}{0,7101} \right)^2 \right] \quad (1)$$

k est l'érodibilité du sol (t ha h / ha MJ mm) ; Dg est le diamètre géométrique moyen pondéré des particules primaires du sol (mm) exprimé par **l'Équation** suivante :

$$Dg = \exp(0.01 \sum_{i=1}^n f_i \ln m_i) \quad (2)$$

f_i est la fraction granulométrique primaire en pourcentage; n est le nombre de classes de taille dans lesquelles la courbe de distribution a été divisée ; m_i est la moyenne arithmétique des limites de taille de particule de cette taille. Les résultats ont montré que l'érodabilité est comprise entre 0,05 et 0,40 t ha h / ha MJ mm.

(ii) K est déterminé par une approche différente, selon **l'Équation 3** en calculant le pourcentage de limon très fin, le pourcentage de sable, le pourcentage de matière organique et la structure du sol [16].

$$K = 0.0293 * (0.65 - Dg + 0.24Dg^2) * \exp \left\{ -0.0021 * \left(\frac{OM}{C} \right) - 0.00037 * \left[\left(\frac{OM}{C} \right)^2 \right] - 4.02C + 1.72C^2 \right\} \quad (3)$$

K est l'érodibilité du sol (t ha h / ha MJ mm); Dg est le diamètre géométrique moyen pondéré des particules primaires du sol (mm), OM est le contenu en matière organique (%) et C est la teneur en argile du sol (fraction).

TreeNet a été appliqué en utilisant ces deux *Équations*. Ainsi, la plus faible prédiction a été observée au niveau de l'équation de détermination de K avec la matière organique (*Équation 3*). Cela impliquait que l'intégrale de la caractéristique d'exploitation du récepteur (ROC) était inférieure à 0,70 pour toutes les classes en raison de la faible quantité d'échantillons de sol (40 échantillons). La faible performance du modèle pourrait être liée aux données insignifiantes [17] ou à la taille de la zone d'étude. Enfin, les deux facteurs K ont été calculés à l'aide du modèle de Co-krigeage avec l'indice d'humidité comme variable indépendante afin de produire une carte de Co-krigée des résultats des facteurs K. Nous avons considéré cet indice du fait qu'il constitue la première variable importante pour les deux facteurs K.

2-2-5. Modélisation et simulation numériques de l'érosion des sols

Le modèle RUSLE utilisé s'appuie sur cinq composantes : le facteur d'érosivité des pluies (R), le facteur d'érodibilité du sol (K), le facteur topographique (Pente et longueur de pente) (LS), le facteur de gestion de la couverture (C) et le facteur de soutien à la pratique (P). La perte moyenne annuelle du sol (A, t / ha l'année) est calculée de la manière suivante :

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (4)$$

A est le taux annuel de perte en sol en t/ha.an ; R est le facteur d'érosivité des pluies exprimé en Mégajoule. mm / ha. H; K est le facteur d'érodibilité des sols exprimé en t. ha / ha. MJ.mm ; LS est le facteur topographique sans dimension représentant l'inclinaison (S en %) et la longueur de pente (L en m); C est le facteur sans dimension représentant l'effet de la couverture végétale ; et P est le facteur de soutien à la pratique.

Les modèles spatiaux de l'érosion des sols et de dépôts ont été simulés avec le modèle USPED [18]. Ces modèles ont permis de quantifier l'ampleur et la variabilité spatiale de la perte et des dépôts des sols afin d'identifier les zones les plus profondément affectées dans le paysage de Tillabéry. Les données sur l'occupation des sols pour les quatre années d'analyse 1973, 1989, 2001 et 2007 ont été utilisées pour déterminer les facteurs C. Nous avons également utilisé les données de précipitation de la période 1973- 2007 pour calculer les valeurs de facteur R. En ce qui concerne le facteur K, sans matière organique (Equation 1), il est identique à celui utilisé dans le modèle RUSLE. Cependant, la composante topographique a été calculée en combinant la courbure du profil et la courbure tangentielle, la courbure du plan, l'altitude, l'aspect et la pente. Dans la sortie de modèle, les zones d'érosion et de dépôt sont représentées par des signes positifs et négatifs, respectivement. Ainsi, la distribution spatial d'érosion et de dépôt se présente comme suit : -5 à -0,1 t / ha l'année (Erosion) ; -0,1 à 0,1 t / ha l'année (Stabilité) et 0,1 à 5 t / ha l'année (dépôt ou sédimentation) [19]. En plus, l'érosivité des pluies pour l'année 2070 dans la zone d'étude a été utilisée. Pour déterminer cette érosivité, nous avons utilisé des précipitations futures issues des prédictions à partir du model Had CM3 dans le scénario d'émission A2 [21]. Cette érosivité fournit des informations utiles sur le risque d'érosion dans des conditions climatiques modifiées.

3. Résultats et discussion

3-1. Texture du sol

3-1-1. Influence de paramètres indépendants sur la texture du sol (classement des variables importantes)

La quantification des relations entre les éléments topographiques et la texture du sol a été réalisée dans cette partie (*Figure 2*). En utilisant la technique du modèle TreeNet, une estimation des paramètres topographiques importants en relation avec différents éléments de la structure du sol est présentée au niveau de la *Figure 2*. Les résultats montrent qu'il existe une relation relativement forte entre la distribution de la

structure du sol et les paramètres topographiques. Ainsi les résultats révèlent que l'altitude (100 %) a la valeur la plus élevée pour les modèles de structure de sol. Aussi le bassin versant ("Watershed") (88 %), le réseau hydrographique ("Channel network") (76 %), la courbure du profil ("Profile curvature") (75 %), la Courbure du plan ("Plan curvature") (74 %), l'Indice d'humidité ("Wetness index") (72 %), l'Ombrage analytique ("Analytical hillshading") (72 %), la Courbure ("Curvature") (70 %), l'Aspect (Aspect) (66 %) et la Pente et longueur de pente (facteur LS) (65 %) sont également importants. Les autres variables dont les valeurs varient de 6 % à 56 % ont une influence non significative. La teneur en sable affichait le score le plus élevé avec l'altitude (100 %) et le réseau hydrographique (94 %), tandis que la teneur en Limon ("Loam") affichait le score le plus élevé avec l'altitude (100 %) et le plan de courbure (83 %). Il existe une forte dépendance entre la texture du sol et l'altitude, suivie d'une bonne corrélation positive entre l'altitude et la teneur en sable, mais une corrélation négative avec la teneur en argile [20]. L'altitude au-dessus du Réseau hydrographique était le facteur prédictif le plus important pour le limon sableux, le limon et le limon argileux dans la zone d'étude en raison des processus d'érosion et de dépôt.

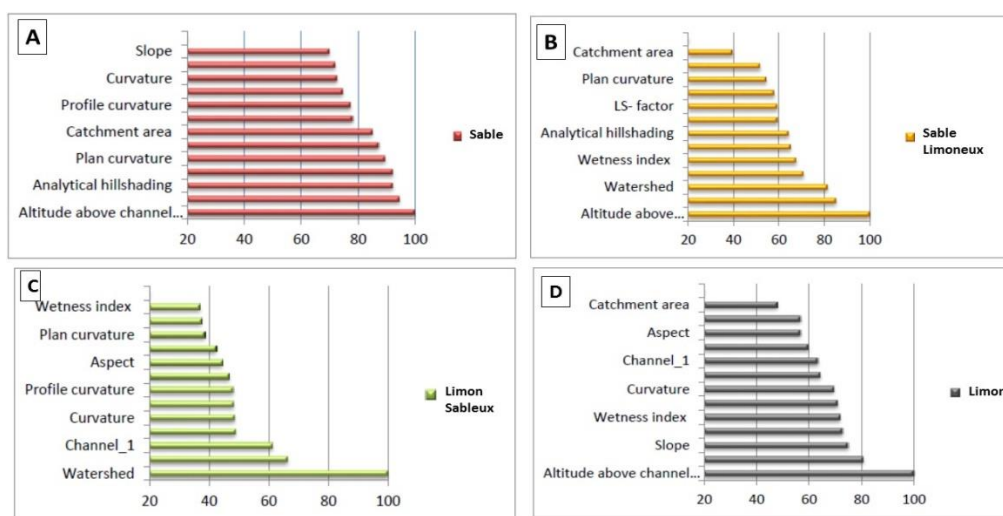


Figure 2 : Classement de la variable d'importance liée à la modélisation du contenu de la texture du sol

(Watershed = Bassin versant, Channel network = Réseau hydrographique, Profile curvature = Courbure du profil, Aspect = Aspect, Plan curvature = Courbure du plan, Wetness index = Indice d'humidité, facteur LS = Pente et longueur de pente, Curvature = Courbure, Analytical hillshading = Ombrage analytique)

3-1-2. Évaluation de la performance du modèle et validation croisée

Tableau 1 : Prédiction du succès de la validation croisée par "Ten-cross" (total de 250 échantillons)

Classes	Echantillons	Pourcentage correct
Sable	56	77,84
Sable limoneux	78	39,74
Limon sableux	29	89,66
Limon	33	87,88
Limon fin	24	95,83
Limon argileux	30	90,00
Moyenne		80,88
% Globalement correct		72,80

La courbe ROC ("Receiver Operating Characteristic") a été utilisée pour caractériser les performances du modèle. La valeur de ROC est comprise entre 0 et 1. Il ressort de l'analyse de ROC que le taux de vrais positifs est représenté sur l'axe des Y et le taux de faux positifs sur l'axe des X. En effet, la valeur de ROC ne peut être inférieure à 0,5 et la meilleure pourrait être proche de 1 [18, 24]. Pour l'analyse de ROC, le prédicteur de la texture du sol le plus fiable était le limon et le sable avec 0,98 et 0,98 respectivement (**Tableau 1**). Les erreurs de prédiction de la texture spatiale de la terre arable dans la zone d'étude ont été quantifiées par une méthode de validation croisée ("Ten-cross") (**Tableau 1**). Le modèle affichait un taux de précision de 72,80 % qui pourrait être dû à un nombre limité d'échantillons de sol.

3-1-3. Distribution spatiale de la texture du sol

La texture du sol joue un rôle très important non seulement pour la fertilité du sol, mais également pour sa stabilité, sa capacité de rétention d'eau et la biodiversité du sol. Le résultat a mis en évidence l'importance des paramètres topographiques pour la prédiction de la texture du sol. Par conséquent, le résultat suggère que les éléments topographiques ont joué un rôle important dans la détermination de la distribution spatiale de la texture du sol. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que tous les attributs de terrain pris en compte dans cette étude ont influencé la texture du sol qui pourrait être due à l'érosion, le transport et les processus de dépôt. Cette étude a démontré que le limon (63,91 %) est la texture du sol dominante, suggérant ainsi que la zone d'étude a tendance à avoir une forte perte en sol. Les **Figures 3a et 3b** montrent l'existence du limon près du fleuve Niger et de plans d'eau saisonniers.

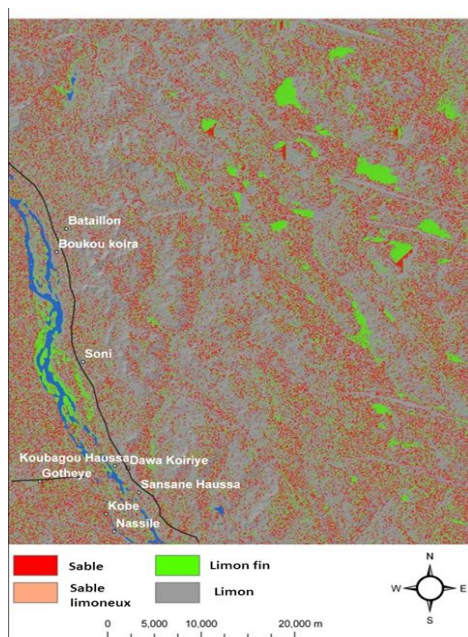


Figure 3a : Texture du sol pour la couche de terre arable (0 - 30 cm)

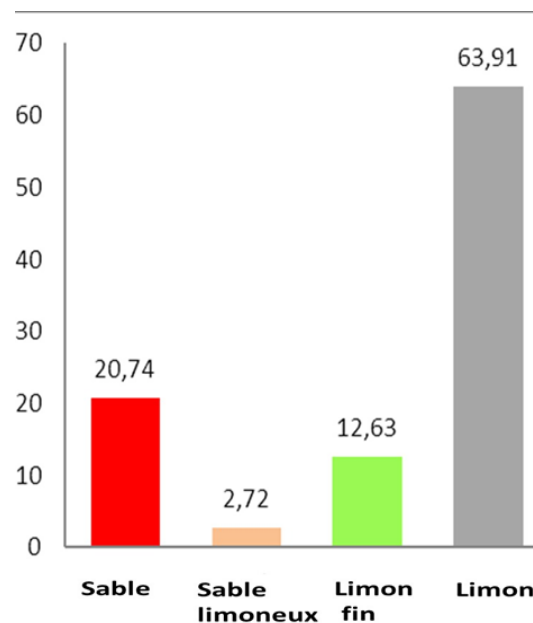


Figure 3b : Le pourcentage de texture du sol

Les résultats ont également montré que la distribution spatiale de la texture du sol dans la zone d'étude dépend du régime des vents. La répartition des sols sableux est indiquée par l'activité des processus éoliens et agit en fonction de la direction des vents. Il s'agit notamment du vent sec harmattan (Octobre - Avril) qui se déplace vers le nord-est en saison sèche du vent humide la mousson (Mai- Juillet) qui se déplace vers l'ouest à travers tout le Sahel pendant la saison des pluies.

3-2. Distribution spatiale de la perte en sol en utilisant RUSLE

Les cartes de répartition spatiale de l'érosion en nappe et en rigoles dans le paysage de Tillabéry de 1973 à 2007 sont illustrées par les **Figures 4a, 4b, 4c et 4d** sur la base du facteur K sans et avec matière organique. Les résultats sont affichés dans une grille de 90 x 90 mètres.

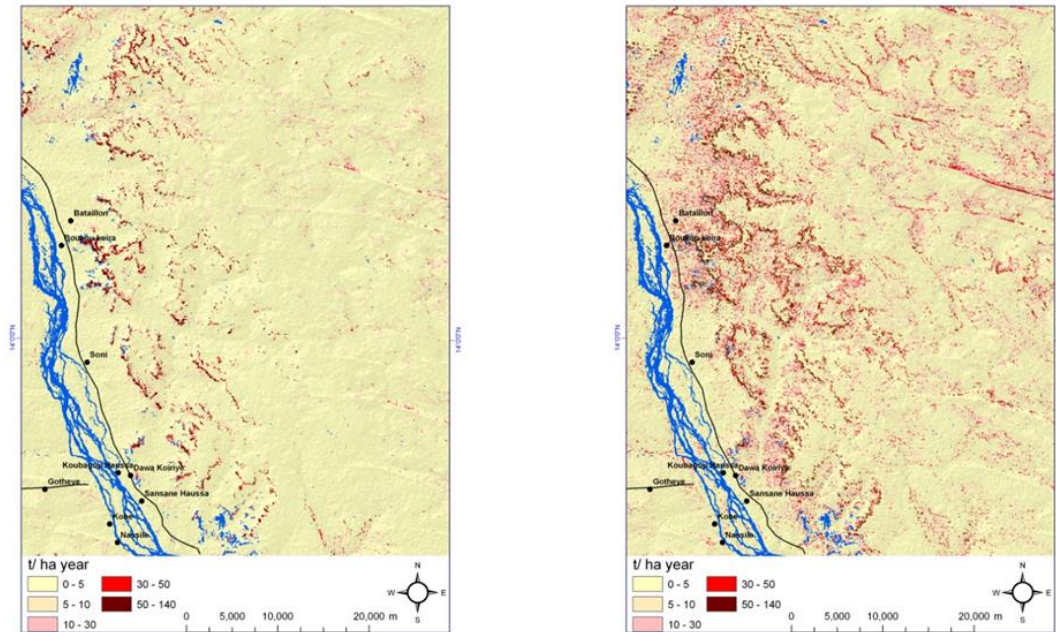


Figure 4a : *Distribution spatiale de la perte de sol basée sur le facteur K sans matière organique en 1973 (t / ha par an)* **Figure 4b :** *Distribution spatiale de la perte de sol basée sur le facteur K sans matière organique en 1989 (t / ha par an)*

L'intensité de l'érosion du sol a été catégorisée. La perte en sol maximale tolérable (12 t / ha) est décrite comme « le niveau maximal d'érosion du sol permettant de maintenir un niveau de productivité agricole durable et économique » [7]. Dans cette étude, les valeurs des facteurs K, LS et P étaient constantes et celles des facteurs R et C ont été modifiées en fonction des paramètres du scénario. Les résultats de cette analyse ont montré que l'érosion en rigoles et en nappe au cours des périodes d'étude augmentaient parallèlement aux modèles à facteur K. Les valeurs moyennes annuelles de perte en sol de 1973 à 2007 sont présentées dans les **Figures 4a, 4b, 4c et 4d**. Ces valeurs varient de 0 à 140 t / ha par an et les plus élevées (plus de 50 t / ha par an) sont observées au centre de la zone d'étude en 1973. Elles ont augmenté avec le temps dans selon les deux modèles à cause des sols nus et une pente supérieure à 7 %. Les résultats montrent clairement l'existence de corrélation entre la pente, la couverture végétale et la texture du sol. Les résultats montrent également que les pertes de sol sont plus importantes avec le premier modèle en raison des valeurs élevées du facteur K. Les résultats révèlent aussi d'une part que l'érosion en nappe est plus concentrée dans le nord-est de la zone d'étude, dominée par les terres agricoles et les prairies. Cela pourrait s'expliquer par le fait que dans la zone sahélienne, cette forme d'érosion hydrique est associée aux activités de production animale et agricole qui accentuent la compaction du sol et la destruction de la couverture végétale. D'autre part, la distribution spatiale de l'érosion en rigoles est plus concentrée autour du centre et à proximité du fleuve Niger. Ceci est dû au fait que l'érosion en rigoles dans la zone Sahélienne est liée aux zones de haute altitude (centre de la zone d'étude) et avec le type de sol à dominance Limon fin.

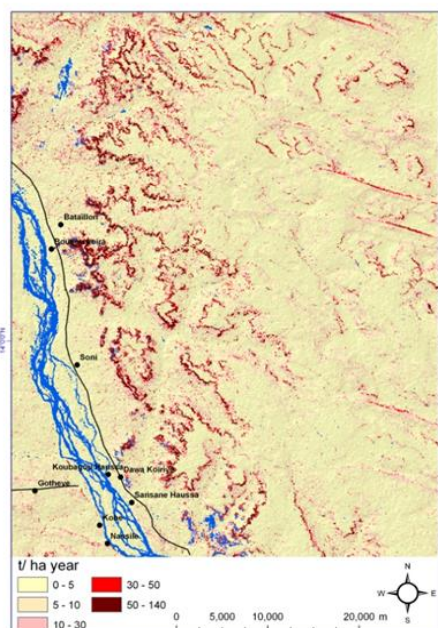


Figure 4c : *Distribution spatiale de la perte en sol basée sur le facteur K sans matière organique en 2001 (t / ha par an)*

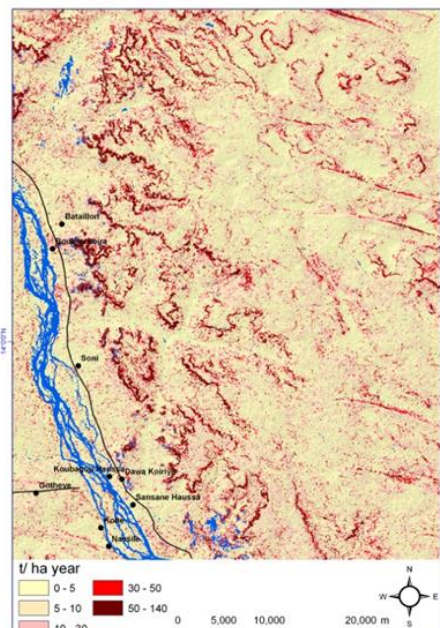


Figure 4d : *Distribution spatiale de la perte en sol basée sur le facteur K sans matière organique en 2007 (t / ha par an)*

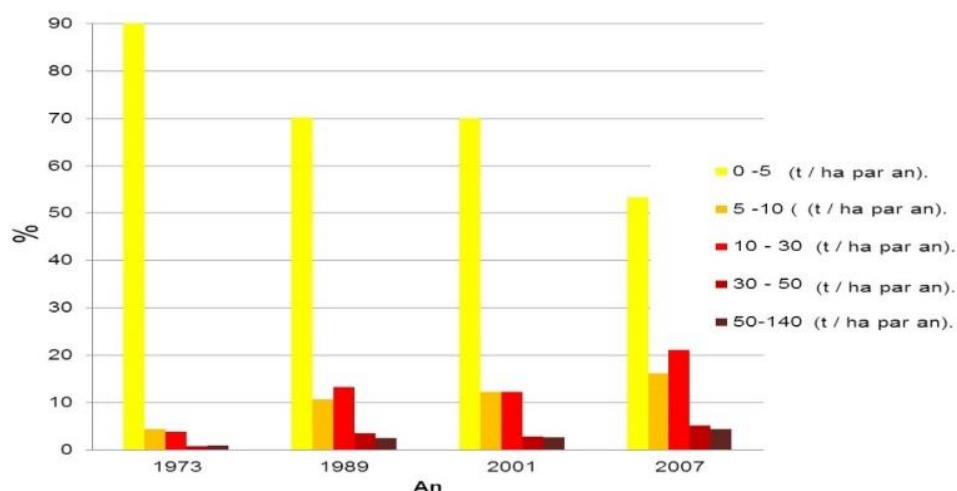


Figure 4e : *Comparaison du taux de perte en sol (basé sur le facteur K sans matière organique) (t / ha par an)*

3-3. Comparaison des scénarios d'érosion des sols dans les options de pluies (selon deux facteurs K)

Les **Figures 5a et 7b** montrent l'évolution spatiale de l'érosion des sols dans le paysage de Tillabéry jusqu'en 2070 selon deux scénarios (Tillabéry I et Tillabéry II). Tillabéry I est une modification simulée du risque d'érosion des sols pour les scénarios basés sur l'érosivité des pluies en utilisant les précipitations futures et en considérant le facteur K avec la matière organique. Tillabéry II décrit un changement simulé du risque d'érosion du sol pour la même zone sur la base de l'érosivité des pluies jusqu'en 2070 en utilisant les précipitations futures prédites et le Facteur K sans matière organique.

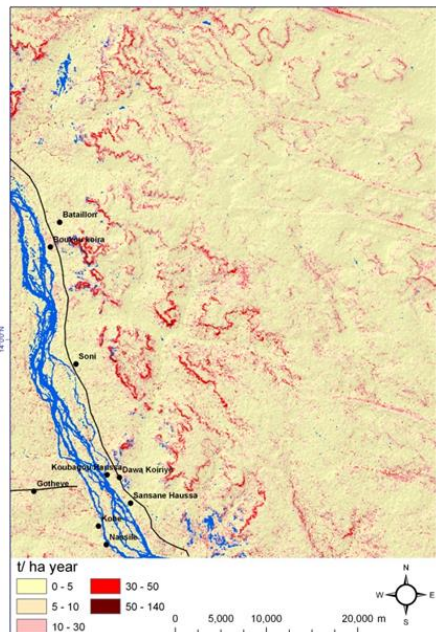


Figure 5a : *Simulation de l'évolution dans les scénarios de risque d'érosion des sols en 2070 (Tillabéry I) avec de la matière organique(t / ha par an)*

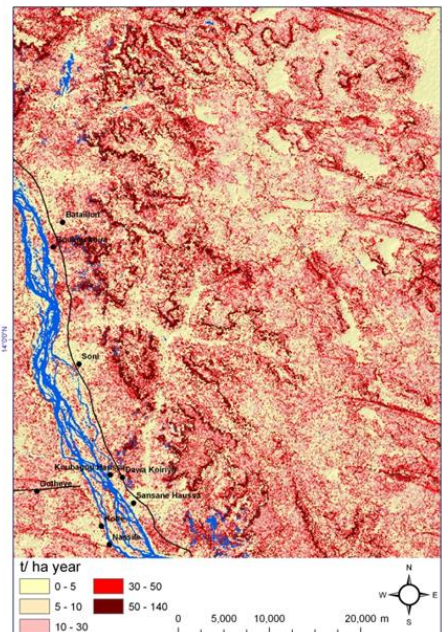


Figure 5b : *Simulation de l'évolution dans les scénarios de risque d'érosion des sols en 2070 (Tillabéry II) sans matière organique (t / ha par an)*

Dans les deux scénarios (Tillabéry I et II), on observe une augmentation de l'érosion du sol. À Tillabéry I, les zones de faible altitude (plates) du bassin du Niger ne présentent aucun risque d'érosion. Au niveau de Tillabéry II, le risque d'érosion plus élevé ($> 50 \text{ t / ha / an}$) est visible. Ainsi, ces changements affectent le reste des classes. La distribution spatiale d'érosion des sols entre les deux scénarios montrent en général une relation étroite (**Figures 5a et 5b**). Ainsi, les zones à forte valeur d'érosion avec Tillabéry I pourraient probablement avoir une forte valeur d'érosion avec Tillabéry II. Tillabéry II se concentre essentiellement dans les zones centrales du paysage de Tillabéry, tandis que la répartition spatiale des zones sujettes à l'érosion avec Tillabéry I se concentre dans la partie nord-est, précisément près du fleuve Niger.

3-4. Structure spatiale de l'érosion des sols et dépôt du sol par USPED Modèle

Les résultats montrent qu'une forte érosion du sol a été observée et prévue sur des positions de paysage convexes et qu'un dépôt de sol a été observé et prévu sur une position de paysage concave et confirme les résultats obtenus par l'analyse RUSLE. Les cartes d'érosion/dépôt du sol pour 1973 montrent que la majeure partie de la zone d'étude était très stable. La perte en sol était très minime ($0 - 0,1 \text{ t / ha / an}$). Le taux de dépôt a également été très faible ($0 \text{ à } 0,1 \text{ t / ha / an}$) (**Figure 6 b**). Les résultats révèlent aussi qu'au cours des années d'analyse (1973, 1989, 2001 et 2007), les résultats d'érosion / dépôt des sols quantifiées sont de l'ordre de $0,1 \text{ à } 5 \text{ t / ha par an}$. La perte des sols est plus importante en 2007 qui pourrait s'expliquer par une réduction des steppes arbustes. Cela signifie que l'érosion en rigoles et en nappe sont entre autres les facteurs qui contribuent largement à la dégradation des terres, diminuant ainsi la productivité du sol et accentuant la détérioration de la qualité du sol et de l'eau dans le paysage Tillabéry. Le modèle USPED met en évidence les zones susceptibles d'être touchées par l'érosion hydrique. Ainsi, les zones d'érosion pourraient être bien connues dans une courte période de temps à l'aide de ce modèle.



Figure 6a : L'érosion et les dépôts de sol simulés avec l'USPED au cours des périodes d'étude

La zone de dépôt est limitée au fleuve Niger sujettes à l'accumulation et à proximité du réseau de ruissellement en raison de la variation des gradients de pente. Les **Figures 6b et 6c** montrent une nette corrélation entre la zone affectée par l'érosion et les zones dénudées avec des pentes supérieures à 10 %. En 1989, 2001 et 2007, certaines zones de la partie centrale de la zone d'étude présentent des taux d'érosion élevés, mais en 1973 elles sont caractérisées par des taux d'érosion faibles. Cela pourrait s'expliquer par le fait qu'au cours de cette période (1973) la zone est généralement plus densément couvertes de la végétation. La réduction de l'érosion des sols dans la zone d'étude pourrait être une stratégie de gestion des terres plus rentable, facile et efficace comparativement à la politique d'élimination des sédiments déposés dans le lit du fleuve Niger. L'étude de l'érosion/dépôt de sol dans le paysage de Tillabéry peut en réalité être considérée comme une étape permettant d'obtenir des informations sur la répartition spatiale de l'érosion du sol et du dépôt de sédiments dans la région. En outre, les chiffres pourraient être utilisés pour identifier les zones appropriées pour la mise en œuvre d'une évaluation de la conservation des terres.

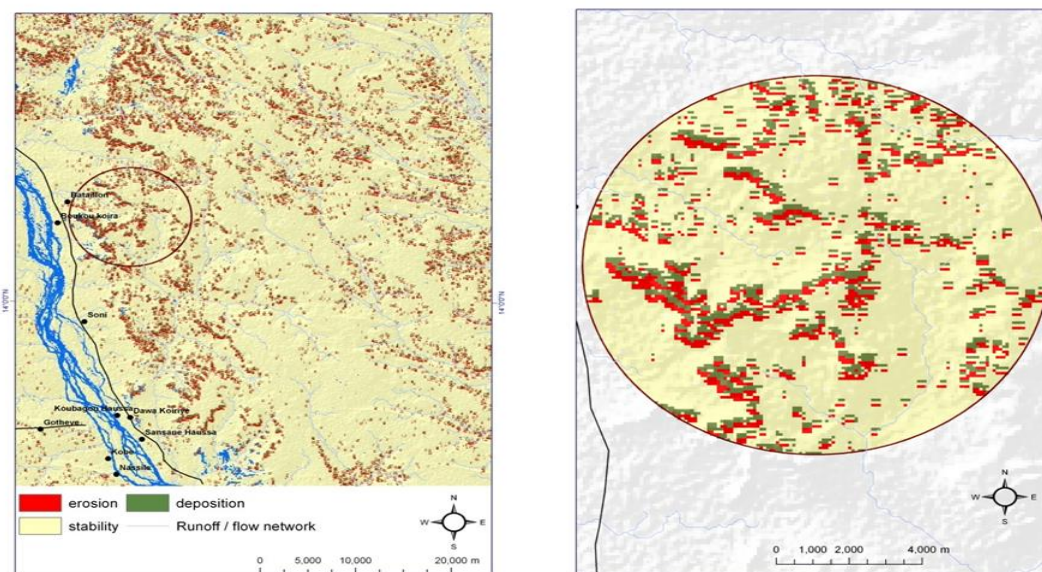


Figure 6b : Distribution spatiale de l'érosion et des dépôts de sol simulés par le modèle USPED en 1973
(NB : Stability = stabilité)

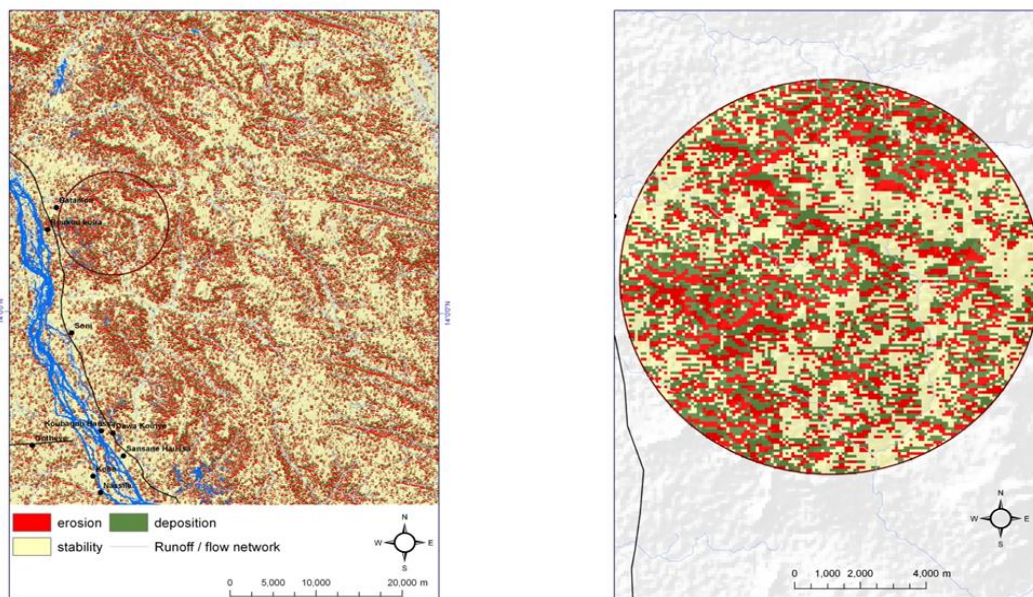


Figure 6c : *Distribution spatiale de l'érosion et des dépôts de sol simulés par le modèle USPED en 2007 (NB : Stability = stabilité)*

3-5. Répartition spatiale de la dynamique et intensité de la dégradation

Les relations entre la dégradation du couvert végétal et l'érosion ont été mis en exergue grâce à la superposition des résultats obtenus sur l'indice désertifié [8] et l'érosion hydrique calculés à partir du modèle RUSLE basé sur le facteur K sans matière organique (**Figure 7a et 7b**). Cette approche avait permis d'acquérir des informations relatives à l'érosion en rigoles et en nappes et la désertification qui pourraient être capitale pour la surveillance future de la dégradation des terres dans la zone d'étude. Les périodes allant de 1989 à 2001 et 2001 à 2007 montrent que les zones à désertification élevée et / ou très élevée ont augmenté. Les résultats suggèrent que les perturbations humaines et les facteurs topographiques ont conduit à l'augmentation des zones affectées par ce fléau [22].

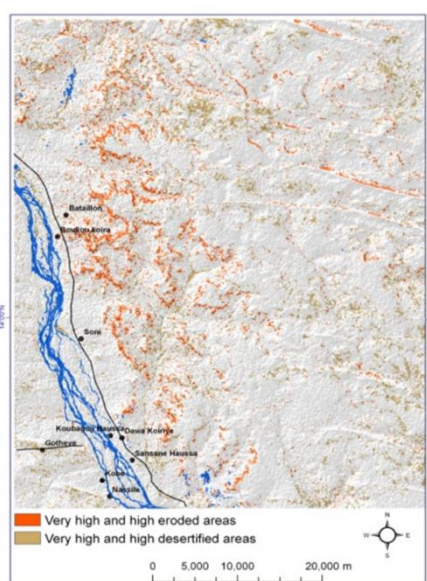


Figure 7a : *Répartition spatiale de la dynamique et intensité de la dégradation entre 1973 et 1989*

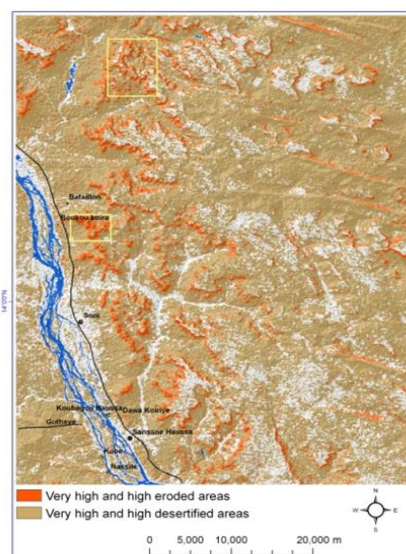


Figure 7b : *Répartition spatiale de la dynamique et intensité de la dégradation entre 1989 et 2001*

4. Conclusion

L'étude sur l'évaluation de l'érosion hydrique dans le paysage de Tillabéry (Niger), montre que les zones les plus sensibles et les tendances aux processus de dégradation des sols ont été identifiées à l'aide de RUSLE et USPED. L'étude de l'érosion/dépôt de sol peut être considérée comme une étape primordiale permettant d'obtenir des informations sur la répartition spatiale de l'érosion du sol et du dépôt de sédiments dans la région. En outre, les chiffres pourraient être utilisés pour identifier les zones appropriées pour la mise en œuvre d'une évaluation de la conservation des terres. De plus, les résultats montrent que la pente et la couverture végétale sont les facteurs les plus importants influant sur l'érosion des sols dans la zone d'étude. Ceci montre également que les pratiques de gestion rationnelle des terres ont un effet déterminant sur la perte de sol.

Références

- [1] - FAO, Situation des forêts du monde. Rome, (2012) 66 p.
- [2] - R. MAAZOU, H. RABIOU, I. YOUSOUFA, I. S. SANI et A. MAHAMANE, Influence de l'occupation des terres sur la dynamique des communautés végétales en zone Sahélienne : cas de la commune rurale de Dantchandou (Niger), *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 11 (1) (2017) 79 - 92
- [3] - AFD (Agence Française de Développement), Crise et développement : la Région du Lac Tchad à l'épreuve de Boko Haram, (2018) 294 p.
- [4] - R. LAL, Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality : critical reviews. *Plant Sci*, 7 (1998) 319 - 464
- [5] - A. A. TOURE, Erosion en milieu sableux cultivé au Niger : Dynamique actuelle et récente en liaison avec la pression anthropique et les changements climatiques, Thèse doctorat Université de Bourgogne, France, (2011) 224 p.
- [6] - J. D. COBO, G. DERCON and G. CADISCH, Nutrient balances in African land use systems across different spatial scales : A review of approaches, challenges and progress. *Agr. Ecosyst. Environ.*, 136 (2010) 1 - 15
- [7] - W. H. WISCHMEIER and D.D. SMITH, Predicting rainfall erosion loss. USDA. Agricultural research Service Handbook, (1978) 537
- [8] - M. MAHAMANE, V. HOCHSCHILD, A. SCHULTZ and J. KUMA, Monitoring desertification in the Tillabery landscape (Sahel region) using change detection methods and landscape metrics, *International Journal of Applied Research*, 1 (10) (2015) 315 - 321
- [9] - M. MAHAMANE, "Application of Remote Sensing and Geographic Information System techniques for desertification and land degradation monitoring and assessment in the Tillabéry landscape (Niger)". PhD., Tuebingen University, (August-2013)
- [10] - M. V. SIVAKUMAR, A. MAIDOUKIA et R. D. STERN, Agroclimatologie de l'Afrique de l'Ouest Niger, Bulletin d'informations No 5, ICRISAT, *Patancheru. India*, (1993) 108
- [11] - UNEP/FAO, Report of the UNEP/FAO Expert Meeting on Harmonizing Land Cover and Land Use Classifications. Geneva, 23-25 November 1993. GEMS Report Series, N° 25 (1994)
- [12] - R. P. C. MORGAN, Soil Erosion and Conservation. Addison-Wesley. Edinburgh, UK, (1995) 198 p.
- [13] - E. ROOSE, V. DE NONI, Recherche sur l'érosion hydrique en Afrique-revue et perspectives. *Sécheresse*, 15 (2004) 121 - 129
- [14] - J. H. FRIEDMAN, Stochastic gradient boosting. Stanford : statistics Dept., Stanford University, USA, (1999)
- [15] - K. G. RENARD, G. R. FOSTER, G. A. WEESIES, D. K. MCCOOL and D. C. YODER, Prediction soil erosion by: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation. Agricultural Handbook, U. S. Dept. of agriculture, Vol. 703, (1997) 404

- [16] - D. TORRI, J. POESEN and L. BORSELLI, Corrigendum to predictability and uncertainty of the soil erodibility factor using global dataset, *Catena*, 46 (2002) 309 - 310
- [17] - M. LIEB, B. GLASER, B. HUWE, Uncertainty in the spatial prediction of soil texture comparison of regression tree and random forest models, *Geodenna*, 170 (2011) 70 - 79
- [18] - M. LÓPEZ-VICENTE, J. POESEN, A. NAVAS, L. GASPAR, Predicting runoff and sediment connectivity at different land use scenarios in the Spanish, *Catena*, (2013) 63 - 73
- [19] - P. DE ROSA, Analisi e Confronti di modelli di erosione del suolo e trasporto di sedimenti tramite l'uso di sistemi G.I.S. Degree Thesis, Università degli studi di Perugia, Italia, (2005)
- [20] - W. WILCKE, S. YASIN, A. SCHMITT, C. VALAREZO, W. ZECH, Soils along the altitudinal transect and in catchments. In : Beck, E., J. Bendix, I. Kottke, F. Makeschin, and R. Mosandl (Eds). *Gradients in a Tropical Mountain Ecosystem of Ecuador-Ecological Studies*, Springer, Berlin, 198 (2008) 75 - 87
- [21] - J. ALCAMO, M. MÄRKER, M. FLÖRKE, S. VASSOLO, Water and climate : A global perspective. Kassel world water series 6, Center for environmental systems research, University of Kassel, Kurt-Wotters-Strasse, Kassel, Germany, 3 (2003) 34109
- [22] - R. SPIEKERMANN, M. BRANDT, C. SAMIMI, Woody vegetation and land cover changes in the Sahel of Mali (1967-2011), *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 34 (2014) 113 - 121
- [23] - S. L. ZHANG, X. Y. ZHANG, T. HUFFMAN, X. B. LIU and J. Y. YANG, Influence of topography and land management on soil nutrients variability in Northeast China. *Nutrient cycling in agroecosystems*, 89 (2011) 427 - 438
- [24] - T. BEHRENS, A. X. ZHU, T. SCHOLZEN, Multi-scale digital terrain analysis and feature selection for digital soil mapping. *Geoderma*, 155 (2010) 175 - 189