



Original Paper

<http://ajol.info/index.php/ijbcs>

<http://indexmedicus.afro.who.int>

Évaluation du risque d'érosion sur quelques sols de la plaine de Lubumbashi, R.D. Congo

Franco MUAMBA KALENDA BWANDAMUKA^{1*}, John BANZA MUKALAY¹,
Franck KATUMBWE NDANDULA¹, Francis KABWE MASANGU²,
Michel MWAMBA KASONGO², Gaillard MAYAMBA MAKANDA¹,
Jules NKULU MWINE FYAMA³ et Emery KASONGO LENGE MUKONZO¹

¹Unité de recherche en Évaluation des Terres, Conservation des Sols et Agro-météorologie, Département de Gestion de Ressources Naturelles Renouvelables, Faculté des Sciences Agronomiques, Université de Lubumbashi B.P 1825, Lubumbashi, RD Congo.

²Unité de recherche en Production Végétale, Département de Phytotechnie, Faculté des Sciences Agronomiques, Université de Lubumbashi B.P 1825, Lubumbashi, RD Congo.

³Institut Supérieur d'Études Sociales, Département de Développement Communautaire, Lubumbashi, RD Congo.

³Unité de Recherche en Économie et Développement Agricole, Département d'Économie Agricole, Faculté des Sciences Agronomiques, Université de Lubumbashi B.P 1825, Lubumbashi, RD Congo.

*Auteur correspondant ; E-mail : mwambakalendafranco@gmail.com; Tel : + 32 465955694

Received: 03-03-2021

Accepted: 24-08-2021

Published: 30-10-2021

RÉSUMÉ

Le contrôle de l'érosion hydrique des sols est l'une des préoccupations importantes en agriculture pluviale, notamment sous les climats tropicaux. Dans la plaine de Lubumbashi, deux sites agricoles (ferme Kasapa et le périmètre agroforestier de Mukoma) ont été étudiés en vue d'évaluer le risque d'érosion hydrique du sol. Des cartes thématiques des différents facteurs d'érosion, tels que décrits dans l'Équation universelle de pertes de sol, ont été intégrées dans un Système d'Information Géographique, permettant ainsi de : (1) démêler leur complexité et leur interdépendance dans l'analyse des risques d'érosion et (2) cerner l'impact et la contribution de chacun d'eux aux pertes en sol. Cette démarche a permis de : (1) hiérarchiser les différentes zones de sites étudiés selon leurs degrés de sensibilité à l'érosion et (2) déterminer le taux d'érosion par le ruissellement en nappe (30,8 t/ha/an en moyenne pour la ferme Kasapa et de 3,6 t/ha/an pour le site de Mukoma). Par ordre d'importance, les facteurs décisifs qui contrôlent l'érosion hydrique dans la plaine de Lubumbashi sont : la pente, l'érodibilité des sols et la couverture végétale.

© 2021 International Formulae Group. All rights reserved.

Mots clés : Erosion du sol, Mukoma/AFODEK, Ferme Kasapa, Plaine de Lubumbashi.

Soil erosion risk assessment on some soils of the Lubumbashi plain, D.R. Congo

ABSTRACT

The control of soil erosion by water is one of the major concerns in rainfed agriculture, especially in tropical climates. In the plain of Lubumbashi, two agricultural sites (Kasapa farm and the agroforestry perimeter of Mukoma) have been studied to assess the risk of soil erosion. Thematic maps of the various erosion factors,

© 2021 International Formulae Group. All rights reserved.

DOI: <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v15i5.32>

8808-IJBSCS

as described in the Universal Soil Losses Equation, were integrated into a Geographic Information System to (1) unravel their complexity and interdependence in the analysis of erosion risks and (2) identify the impact and contribution of each of them to soil losses. This approach allowed us to (1) prioritize the different areas of the studied sites according to their degree of sensitivity to erosion and (2) determine the rate of sheet erosion by runoff (30.8 t/ha/year on average for the Kasapa farm and 3.6 t/ha/year for the Mukoma site). In order of importance, the decisive factors that control water erosion in the Lubumbashi plain are: slope, soil erodibility and vegetation cover.

© 2021 International Formulae Group. All rights reserved.

Keywords: Soil erosion, Mukoma/AFODEK, Kasapa Farm, Lubumbashi Plain.

INTRODUCTION

Le contrôle de l'érosion hydrique des sols est l'une des préoccupations importantes en agriculture pluviale, notamment sous les climats tropicaux. La dynamique agricole de la République Démocratique du Congo basée, jadis, sur l'extension des cultures de rentes et des cultures vivrières, s'est affirmée au prix d'une forte pression sur les ressources naturelles. Dans la zone agricole du Haut Katanga, l'agriculture est caractérisée, de manière générale, par une faible technicité et un système de culture itinérante sur brûlis. Ces pratiques agricoles entraînent un déboisement rapide et exposent les sols à l'érosion. Dans cette région, l'érosion se fait, principalement, en nappe. Ce type d'érosion est particulièrement dangereux pour l'agriculture. En effet, elle enlève sélectivement les particules fines et légères (matières organiques, les argiles, les limons et les nutriments) et accélère la dégradation physique, biologique et chimique des horizons superficiels des sols cultivés. Cette situation réduit non seulement la fertilité des sols, mais entraîne aussi la baisse des rendements agricoles et de la production de la biomasse. L'érosion constitue une d'importantes menaces pour la stabilité de la bonne partie de la RD Congo étant donné l'importance la plus grande de sa population rurale. Les produits de l'agriculture semblent quasiment une de principales sources de revenus au côté de l'exploitation minière. En vue de planifier le développement durable de l'agriculture dans cette région, il convient de suivre l'évaluation spatio-temporelle de l'érosion des sols.

Koussa et Bouziane (2018) ont démontré les avantages qu'offrent les Systèmes

d'Information Géographique (SIG) dans l'évaluation des pertes de sol en utilisant l'Universal Soil Loss Equation (USLE). En effet, les données pédologiques, la couverture du sol et les modèles numériques de terrain (élévation, pente, exposition et longueur de pentes) fournis par les données de télédétection et agro-climatiques sont les informations de base utilisées pour le calcul de la perte de sol. Toutefois, différents modèles d'érosion des sols utilisant les SIG et les données de la télédétection ont été développés (Sadiki et al., 2004 ; Elbouqdaoui et al., 2005 ; El Garouani et al., 2008 ; Samir et al., 2013 ; Mohamed et al., 2014 ; Bouguerra et al., 2016 ; Khali et al., 2016 ; Meliho et al., 2016 ; Benchettouh et al., 2017 ; Ouedraogo et al., 2019 ; Khaoula et Sihem, 2021). Cependant, l'USLE reste le modèle le plus utilisé pour sa simplicité. Au Burkina Faso, Guillobez et al. (2000) a utilisé les paramètres de l'USLE pour spatialiser l'érosion hydrique, tandis que Nafu (2006) et Kaci et al. (2017) ont quantifié le sol transporté à partir de ce modèle respectivement au Mali et en Algérie.

En RD Congo, l'érosion a été sporadiquement étudiée par Ilunga (2006). Les principales causes de l'érosion des sols restent les pratiques culturelles inappropriées, la déforestation, surpâturage et les activités de construction (Dossa, 2020). Accroître la prise de conscience des scientifiques et des politiciens sur le problème de la dégradation des sols est maintenant une nécessité. L'identification des zones sensibles à l'érosion peut être utile pour améliorer nos connaissances sur l'étendue des surfaces affectées et, finalement, pour développer des

moyens de contrôle du problème, quand cela est possible.

Le résultat de ce travail permet de dresser des cartes où sont localisées les zones exposées aux différents niveaux de risques d'érosion (faible, moyen, fort). L'objectif de cette étude était d'estimer le risque de l'érosion dans deux sites (Ferme Kasapa et Mukoma) à partir de l'USLE et des données de télédétection disponibles couplées à celles de terrain. L'étude, cherche à mettre en relief la nature et l'ampleur des facteurs et des paramètres contribuant à la dégradation du sol du fait de phénomènes naturels (climat tropical avec des épisodes pluvieux qui se caractérisent par leur aspect orageux) et anthropiques (défrichements et feux de forêts).

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Milieu

L'étude comprend deux sites distants l'un de l'autre de 12 km et situés tous dans la zone rurale autour de la ville de Lubumbashi, dans sa partie nord (Figure 1.A et Figure 1.B).

Le choix des sites a été motivé par leur proximité à la station météorologique de l'INERA/Kipopo et par leur mode de gestion opposable. Le site de la ferme Kasapa semble être exploité par des méthodes de non-conservation des ressources en sol en revanche celui de Mukoma/AFODEK est sous gestion conservatoire, ayant mis en place un système agro forestier depuis 2012.

Ferme Kasapa

Ce périmètre agricole couvre une superficie de 171ha. Il est situé entre les latitudes : 11,57537° et 11,59077° Sud et les longitudes 27,40593° et 27,42901° Est, à une altitude moyenne de 1253 m. Du point de vue administratif, la ferme se trouve à cheval de la limite entre le territoire de Kipushi et la ville de Lubumbashi. Il est délimité vers l'Ouest par la concession de l'NERA Kipopo et au sud par le village Kasibala. Le périmètre de la ferme Kasapa, l'un des versants de la vallée de la rivière Lubumbashi qui est drainé en sa partie Est par les rivières Kanatuebo et Kasapa et en sa partie sud par la rivière Lubumbashi (Figure 1.A).

Site de Mukoma / AFODEK

Le périmètre agroforestier du projet AFODEK (Agro-forêts pour le développement de Kipushi) situé dans le village Mukoma (Figure 1.B). Il est dans la chefferie Kaponda à environ 28 km du centre-ville de Lubumbashi. Il est situé entre les latitudes : 11,597° et 11,649° Sud et les longitudes 27,293° et 27,358° Est, à une altitude moyenne de 1303m. Il couvre une superficie de 2340,5 ha répartie en quelques associations correspondant à 11 blocs (A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, Y) dans lesquels vivent les exploitants.

Ce périmètre agro-forestier a été établi sur une zone préalablement couverte (avant-projet) par végétation dominée par la forêt claire du type Miombo fortement dégradée et par des champs cultivés. Il s'agit d'un site fortement anthropisé par des activités diverses (agriculture, carbonisation, transport de minerais, etc.). Ngongo et al. (2009) font savoir la présence sur ce périmètre d'une couverture pédologique dominée par les sols ferrallitiques.

Méthodes

La mise en place du modèle USLE nécessite des données sur la topographie, l'occupation du sol, la climatologie et la pédologie. L'une des difficultés majeures à l'application du modèle a été la collecte de données pertinentes. En effet, la zone d'étude, Lubumbashi en général est relativement peu renseignée sur le phénomène d'érosion hydrique. Les données géographiques de référence sur la topographie, les précipitations, l'occupation du sol sont, soit inexistantes, soit incomplètes ou obsolètes à petite échelle et les données numériques géoréférencées sont encore plus rares. L'essentiel des connaissances de référence sur les sites d'étude et dans un cadre plus large sur la région de Lubumbashi date de 1959 (Sys et Schmitz, 1959) rendant difficiles leurs exploitations directes. Les documents cartographiques ont été pour la plupart réalisés à petite échelle et sans mise à jour récente. L'accès à des bases de données en ligne à l'échelle mondiale constitue dans certains cas une alternative qui est alors intéressante de tester. Un des objectifs de cette étude est donc d'évaluer le potentiel

des données existantes et les démarches de production d'information numérique à y associer pour une modélisation spatialisée dans un SIG, de l'érosion hydrique des sols, dans le contexte actuel de la région de Lubumbashi.

Selon le modèle USLE de Wischmeier et Smith, (1978), l'érosion est une fonction multiplicative (1), tenant compte de l'érosivité des pluies (facteur R) par la résistance du milieu (facteurs C, K, LS, P). Chaque facteur est une estimation numérique d'une composante précise qui affecte la gravité de l'érosion du sol en un endroit donné.

Cinq facteurs servent à calculer les pertes en sol (A) : la topographie (LS), l'agressivité des précipitations (R), l'érodibilité du sol (K), le couvert végétal (C), les pratiques antiérosives (P), dont l'équation 1 se présente sous la forme :

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (1)$$

A : pertes en sol annuelles moyennes possibles à long terme (t.ha.an),

R : indice d'érosivité des pluies (MJ.mm/ ha.h.an),

K : indice d'érodibilité des sols (t.ha.h/ha.MJ.mm),

LS : facteur de déclivité (adimensionnel),

C : facteur de végétation (adimensionnel),

P : facteur de pratique de soutien (adimensionnel).

Inventaire des données utilisées

Le jeu des données constitué pour cette étude est composé de bases des données historiques et celles issues de missions de terrain, optimisant l'information disponible. Le facteur LS a été calculé à partir des données altitudinales obtenues après affectation de la cote altitudinale (Z) grâce au logiciel TCX Converter 2.0.32 ; Build Date : 2014-11-06 11 :54 :14, aux données (X, Y) en format KML reçues de Google earth.

Pour le facteur R, les données pluviométriques sont issues de la station météorologique de l'INERA/KIPOPO et qui ont été comparées à celles mises en ligne par le site de la NASA (National Aeronautics and space Administration). Le modèle consiste à

l'interpolation de données climatiques mensuelles moyennes recueillies sur une période d'au moins 25 ans (1993-2017).

L'occupation du sol est extraite de l'Image satellite ETM+ de 2016, type Landsat TM de 30 m de résolution à une échelle (1/1.100.000) de la ville de Lubumbashi et ses environs. Cette dernière contient des données raster sur l'occupation du sol et l'hydrographie. Cette image a été mise à profit pour la détermination du facteur C de l'érosion (couvert du sol) en passant par le calcul de l'indice de végétation normalisée (NDVI) à l'aide du logiciel ENVI 4.5.

La carte pédologique au 1/200 000^e de la ville de Lubumbashi (Sys et Schmitz, 1959) constitue parmi les données disponibles à l'échelle de la ville de Lubumbashi archivées sous forme numérique dans la base des données (Shape file) et en version papier.

Ces divers jeux de données ainsi constitués comportent des échelles, des systèmes de localisation et des formats très hétérogènes (jpg, Shape, Tiff). Une longue phase de prétraitement a permis la production d'une base de données de type vectoriel et raster spatialement cohérentes et exploitables sous QGIS aux échelles de 1/27 000^e et de 1/9 000^e respectivement pour le site AFODEK et la Ferme Kasapa.

L'extraction de la zone d'intérêt, la conversion de format des fichiers, la création de tables attributaires et le changement de leur système de projection ont constitué les principales étapes de prétraitement des données.

Méthodes d'analyse et modèle de données

En raison de l'hétérogénéité des sources d'information utilisées (Tableau 1), une fois la base de données géographiques constituée, une structure maillée au pas de 30 mètres correspondant à la résolution des images satellitaires utilisées a été choisie et affectée à toutes les couches géographiques. Cette étape de rééchantillonnage permet de mettre en cohérence l'ensemble des données à la même résolution spatiale. La méthode d'interpolation sélectionnée est du « plus proche voisin » qui consiste à attribuer à chaque point cible une combinaison des valeurs des points sources les

plus proches de son antécédent par la transformation inverse. Cette méthode a pour avantage de ne pas modifier les valeurs des cellules, l'erreur spatiale maximale est alors communément estimée à la moitié d'une taille de cellule. Cette étape permet le croisement des données pixel à pixel et la superposition parfaite des couches d'informations. Le système de projection commun pour l'ensemble des données est le système WGS 84, UTM 35 Sud. La fiabilité du changement de projection est justifiée par la superposition « exacte » avec l'ensemble des données. Cependant, pour la ferme Kasapa, où les images satellites n'ont pas été exploitées, une structure maillée au pas de 5 mètres a été affectée à toutes les couches géographiques.

Les données de télédétection ont été réprojetées à la zone UTM 35S grâce au module « réprojection » du logiciel QGIS 2.18.1 ». La récolte des données de terrain avec un GPS a été nécessaire, ainsi que les renseignements supplémentaires dans le choix des zones d'entraînement. Plusieurs compositions colorées ont été effectuées grâce au logiciel ENVI 4.5. La combinaison des bandes 4-3-2 respectivement dans le rouge, le vert et le bleu a été utilisée pour discriminer le couvert végétal, car elle donnait après observation visuelle le meilleur résultat. Les travaux de terrain sont indispensables pour appuyer et corriger l'interprétation des images par le logiciel (Karimoune et al., 1993).

Choix des équations

Facteur de l'érosivité des pluies (R)

La pluie est l'un des principaux facteurs de l'érosion des sols. Ceci se produit lorsque les eaux pluviales ne peuvent plus s'infiltrer dans le sol et arrachent les particules du sol en emportant des particules (Le Bissonnais et al., 2002). Ainsi, le rôle du facteur R est de caractériser la force érosive des précipitations sur le sol. Il considère les différences régionales du climat selon le type, l'intensité et la fréquence des précipitations.

L'érosivité de la pluie est définie traditionnellement par l'équation 2 :

$$R = E \times I_{30} \quad (2)$$

Où

E = l'énergie cinétique des pluies (MJ/ha)

I₃₀ = l'intensité maximale des pluies en 30 minutes exprimées (mm/heure).

L'énergie cinétique des pluies est donnée par l'équation 3 suivante :

$$E = 210 + 89 \times \log_{10} \times I \quad (3)$$

Où

I = l'intensité de pluie.

Ces équations (2 et 3) proposées par Wischmeier et Smith (1978) comme indicateurs d'érosivité restent difficilement applicables pour les régions où les données pluviométriques ne sont pas régulières. Il existe quelques stations météorologiques connues dans la zone d'étude celles-ci ne fournissant que des données pluviométriques journalières. Le régime des précipitations de la ville est de ce fait très mal renseigné. Ces données ne sont pas compatibles avec le calcul du facteur d'érosivité des pluies R en fonction de l'intensité des pluies estimables toutes les 30 minutes. Toutefois de nombreuses équations permettant le calcul de R en fonction des précipitations annuelles établies par plusieurs auteurs, permettent de contourner cette difficulté notamment l'indice de Fournier (Kalman, 1970 ; Roose, 1977 ; Arnoldus, 1980 ; Renard et Freimund, 1994). Ces équations de substitution ont été appliquées dans différents travaux impliquant une modélisation USLE (Morschel et Fox, 2004 ; Sadiki et al., 2004 ; El Gouarani et al., 2008) et ont montré des résultats satisfaisants.

Dans cette étude, le facteur érosivité des pluies (R) a été calculé en utilisant l'Indice Modifié de Fournier (IMF) (Arnoldus, 1980), grâce aux données mensuelles des précipitations recueillies à la station météorologique de l'INERA/KIPOPO située proche de sites étudiés, pendant la période allant de 1993 à 2017.

L'érosivité des pluies dérive de l'équation 4 suivante pour chaque année.

$$R = \sum_{i=1}^{12} p_i^2 / P \quad (4)$$

Où :

R = Erosivité des pluies,

p_i = quantité totale des précipitations de chaque mois de l'année,

P = quantité totale des précipitations recueillies chaque année.

L'échelle d'appréciation présentée au Tableau 2 a permis de classer le niveau d'agressivité des pluies à partir des valeurs proposées dans CEC (1992).

Facteur de l'érodibilité des sols (K)

L'érodibilité d'un sol se traduit par la résistance inhérente au détachement et au transport des particules par l'eau. Les paramètres intrinsèques du sol (stabilité structurale, croûte de battance, état dispersé, matière organique, texture) contribuent largement à influencer la sensibilité des sols à l'érosion (Roose et Sarrailh, 1990). Le facteur K est fonction de la texture, la teneur du sol en matière organique, et la perméabilité du sol. Ces données pour les sites étudiés ont été extraites à partir des échantillons de sols décrits dans la notice de la carte de sols au 1/200.000. Ce facteur représente la détachabilité des particules terreuses sous l'action de l'eau. Il est fonction de la texture des sols (M), de la teneur en matière organique (a), de la structure du profil ($1 \leq b \leq 4$) et de la capacité d'infiltration du sol ($1 \leq c \leq 6$).

L'érodibilité des sols détermine la sensibilité ou la résistance d'un sol à l'érosion. La répétition des expérimentations sur différents types de sols a permis à Wischmeier et Smith, (1978) de développer l'équation 5 ci-après :

$$K = 2.1 \times 10^{-6} \times M^{1.14} \times (12 - a) + 0.0325 \times (b - 2) + 0.025 \times (c - 3) \quad (5)$$

Avec :

M = facteur granulométrique = (% limon + % sable très fin) (100 - % argile),

a = matière organique (%)

b = code de la structure du sol (granulaire très fine : 1; granulaire fine : 2; granulaire moyenne et grossière : 3; en bloc ou massive : 4)

c = code de la classe de perméabilité (rapide : 1; modérée à rapide : 2; modérée : 3; lente à modérée : 4; lente : 5; très lente : 6)

Les valeurs de code de la perméabilité du sol (c) ont été estimées en se référant au Tableau 3 issu de travaux de Wischmeier et Smith (1978) et ceux de Nafu (2006).

Quant à l'appréciation des classes de l'érodibilité des sols, celle-ci a été réalisée selon l'échelle proposée par Goldsmith, (1977) comme repris dans le Tableau 4.

Le Facteurs topographiques (LS)

La longueur, la forme et surtout l'inclinaison de pente sont des paramètres qui influencent considérablement l'érosion des sols (Roose, 1994). La longueur de pente conditionne la vitesse de ruissellement et le transport des particules croît en fonction de la longueur de la parcelle. De même, les transports solides croissent de façon exponentielle avec le pourcentage de pente (Zingg, 1940 ; Hudson, 1973 ; Roose, 1994). Ces processus ont pour effet de former des rigoles et des creusements à la surface du sol. Les facteurs L (longueur de pente) et S (angle de la pente en %) sont le plus souvent combinés en un facteur unique adimensionnel LS afin de définir l'effet de l'érosion en nappe et en rigoles. L'angle et la longueur de pente peuvent être calculés selon l'équation de Wischmeier, basée sur des parcelles expérimentales de 22,1 m et 9% de pente.

Elle constitue l'équation de référence (6), la plus usitée permettant de définir le facteur LS et se définit par :

$$LS = (\lambda/22,1)m \times (65,4 \sin^2 \theta + 4,56 \sin \theta + 0,065) \quad (6)$$

Où :

λ = La longueur de pente en mètre,

θ = L'inclinaison de la pente en °,

m = Le facteur établi en fonction de la pente

Ce facteur représente l'effet combiné de la longueur et l'inclinaison de la pente. Il joue un rôle important avec la raideur et la longueur de la pente à partir de l'endroit où les éléments du sol sont détachés jusqu'à l'endroit où ils sont déposés (Brooks et al., 1992).

Dans cette étude, une équation empirique développée par David, (1987) a été retenue pour calculer les valeurs du facteur LS au lieu et place de la précédente et qui est exprimée par l'équation 7 ci-après :

$$LS = 0.10 + 0.12 \times (S)^{4/3} \quad (7)$$

Où :

S : est la pente en %.

Ce facteur est calculé en utilisant les fonctions de calculatrice raster de QGIS 2.18. Plusieurs étapes, utilisant les fonctions d'analyse spatiale en mode raster, ont par la suite été menées. La première est la création d'un raster de direction des écoulements à partir de chaque cellule vers sa voisine de plus faible altitude. Cette détermination de la direction des flux du réseau hydrographique théorique permet ensuite de calculer la longueur de pente, tout d'abord pour une cellule et ensuite, pour chaque cellule. La seconde étape consiste à calculer les pentes en degrés pour chaque cellule.

Facteur d'occupation du sol (C)

Ce facteur, sans dimension représentant l'effet de la couverture végétale ; estimé à partir de l'indice de végétation normalisé dérivé NDVI à partir de l'imagerie satellitaire, car il transforme la réflectance de la végétation en pourcentage de la couverture végétale (Jensen, 2000). Cependant, une approche alternative a été suivie comme une réponse au manque de l'information saisonnière du couvert végétal ; il s'agit de remplacer le facteur-C avec l'indice de végétation NDVI (Ioannis, 2009). Dans cette étude, l'NDVI est généré à partir de l'Image satellite ETM+ de 2016, type Landsat TM d'une résolution spatiale de 30 m, tel que la réflexion de la partie du proche infrarouge du spectre électromagnétique IR, et le rouge ; la réflexion dans le spectre visible supérieur, il est utilisé aussi pour calculer la signature spectrale. La relation entre le NDVI et C est déterminée par l'équation 8 (Zhou et al., 2008 ; Kouli et al., 2009) :

$$C = \exp[-\alpha \times NDVI / (\beta - NDVI)] \quad (8)$$

Avec :

$$NDVI = (PIR - R) / (PIR + R) \quad (9)$$

Où : PIR est le Proche Infra Rouge et R est le Rouge, alors que α et β sont les paramètres déterminant la forme de la courbe de NDVI - C ($\alpha = 2$ et $\beta = 1$).

Facteur de pratiques antiérosives ou de conservation (P)

Il faut retenir ici, qu'il n'y a aucune étude de modélisation de ce paramètre. Seules des observations de terrain pourraient permettre de le calculer par comparaison de la perte en terres sur un sol avec les pratiques antiérosives à la perte sur le même sol sans aucune pratique. Les cultures en courbes de niveau, en bandes alternées ou en terrasses, les reboisements en banquettes, le buttage et le billonnage sont les pratiques les plus efficaces de conservation des sols. Les valeurs de P sont inférieures ou égales à 1. La valeur 1 est attribuée aux terrains sur lesquels aucune des pratiques citées n'est utilisée. Les valeurs de P varient selon la pratique adoptée et aussi selon la pente. Sur le site de Mukoma, le projet AFODEK a mis en place depuis l'an 2012, un dispositif agro-forestier correspondant à un aménagement antiérosif.

Dans ce contexte, la valeur P = 0,37 a été attribuée à toute la superficie du site Mukoma (AFODEK) en se référant au Tableau 5 proposé par Stone et Hilborn (2000).

Taux de pertes en terre (A)

La combinaison des couches s'appuie sur des règles arithmétiques et des opérateurs booléens afin de produire une nouvelle valeur dans la couche composite, ici représentative pour chaque pixel des pertes de sols (A).

L'appréciation de niveau de pertes en terre a été réalisée selon l'échelle proposée par Wischmeier et Smith, (1978) comme repris dans le Tableau 6.

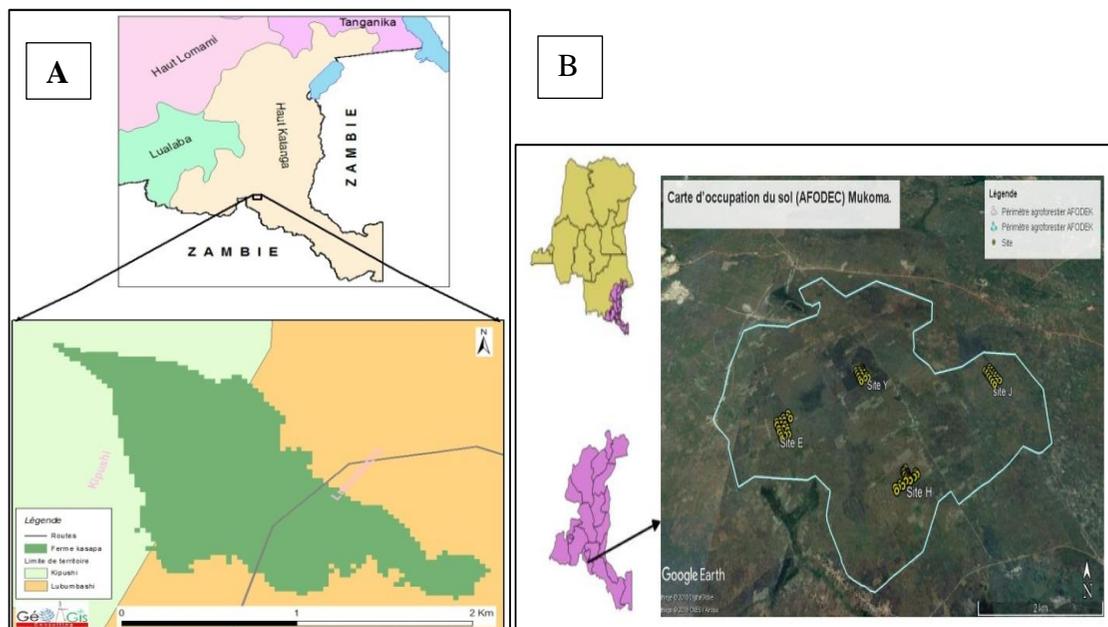


Figure 1 : Localisation des sites d'étude. A : périmètre de la ferme Kasapa et B : périmètre agroforestier de Mukoma.

Tableau 1 : Format et échelle des données utilisées.

Type de données	Facteur associé	Format	Échelle / Taille du Pixel
Modélisation (NASA)	R	Raster (ESRI grids)	5 m et 30 m
Carte pédologique	K	Vecteur (Shape)	1/200 000
SRTM (Converter TXC)	LS	Raster (ESRI grids)	5 m et 30 m
Image Land SAT de 2016	C	Raster (Tiff)	1/1 100 000 (30 m)
Observations du Terrain	P		

Tableau 2 : Classes de l'indice d'Arnoldus.

Classe	Indice d'Arnoldus (1980)	Description
1	< 60	Très faible
2	60-90	Faible
3	90-120	Modérée
4	120-160	Forte
5	> 160	Très forte

Source: CEC (1992)

Tableau 3 : Estimation de la perméabilité (c) à partir de la classe de texture de sol.

Classe de texture	Perméabilité (code c)	Conductivité hydraulique Saturée (mm/h)	Classe de perméabilité
Argile, limono-argileux	6	< 1	Très lente
Argilo-sableux, argilo-limoneux	5	1-2	Lente
Limono-argilo-sableux, Sablo-argileux	4	2-5	Lente à modérée

Limono-sableux, limon	3	5-10	Modérée
Sablo-limoneux, Limono-sableux	2	10-60	Modérée à rapide
Sableux	1	> 60	Rapide

Tableau 4 : Classes de l'érodibilité des sols.

Classes	K
Faible	< 0,09
Faible à moyenne	0,10-0,19
Moyenne	0,20-0,29
Moyenne à forte	0,30-0,39

Source : Wischmeier et Smith (1978)

Tableau 5 : Facteur P selon les pratiques antiérosives.

Pratiques de conservation	Valeurs de Facteur P
Savane	0,1
Culture à contre-pente	0,75
Culture suivant les courbes de niveau	0,50
Culture en bandes, à contre-pente	0,37
Culture en bandes, suivant les courbes de niveau	0,25

Source : Stone et Hilborn (2000)

Tableau 6 : Classes de risque d'érosion du sol par eau.

Classes de risque d'érosion du sol	Perte de terre possible (t /acre/an)	Perte de terre possible (t/ha/an)
Très faible (tolérable)	< 3	< 7
Faible	3-5	7-12
Modéré	5-10	12-24
Élevé	10-15	24-37
Grave	> 15	>37

Source : Wischmeier et Smith (1978)

RESULTATS

Précipitations et Erosivité des pluies : Facteur R

L'analyse des précipitations et de leur érosivité R sur 25 années de relevés pluviométriques de la station de l'INERA/KIPOPO transposables sur les périmètres de la Ferme Kasapa et Mukoma,

illustre l'importance de leurs variations temporelles (Figure 2).

Les valeurs de l'indice d'érosivité les plus élevées correspondent aux pluviométries élevées ($r = 70\%$). Toutes les années de la période retenue pour cette étude, sont caractérisées par une forte précipitation reflétant une très forte érosivité des pluies excepté l'année 2005 où la précipitation est

faible 630,8 mm avec une érosivité forte de 157. La valeur moyenne de l'indice d'érosivité des pluies, pour une période de 25 ans, est de 242 contre une moyenne pluviométrique de 1200 mm.

La précipitation varie de 608,3 mm pour l'année 2005 à 1551,3 mm pour l'année 2009. Cependant, l'érosivité des pluies varie entre 157 pour l'année 2005 et 325 pour l'année 1997. Ces variations interannuelles de précipitations et de leur érosivité demeurent non significatives, étant donné que leur coefficient de variation est inférieur à 30%. Selon les classes de cet indice proposées dans le CEC (1992), le risque d'érosivité des pluies est très fort ($R > 160$) durant presque toute cette période. Cependant la précipitation moyenne annuelle et l'érosivité des pluies moyennes sont spatialement uniformes pour tous les deux sites (Ferme Kasapa et périmètre agroforestier de Mukoma).

Risque potentiel de l'érosion des sols dans le site de la Ferme Kasapa

Erodibilité : Facteur K

La Figure 3.A présente la distribution spatiale de cinq séries de sols présentes sur le périmètre de la Ferme Kasapa. En termes de l'importance de leur couverture, les valeurs de superficies sont comprises entre 5,1 ha soit 6% (Sols de la série Katuba (g) et 74,8 ha soit 44% de tout le périmètre (Lubumbashi (D-6)). L'étendue couverte par les sols de la série Musaonga (Ag-3) représente 47,7 ha soit 28% et celle de la série Baya (A-3) couvre 33,9 ha soit 20% de l'étendue totale (Tableau 7).

Quant à l'indice de dispersion de ces séries de sols, les sols de la série Lubumbashi malgré leur plus grande superficie, ne sont pas dispersés comparativement à ceux de séries Baya et Mutwale (D-5) qui sont très dispersés.

La Figure 3.B présente la répartition spatiale des différentes classes du facteur K sur le périmètre de la Ferme Kasapa. Les valeurs de ce facteur sont comprises entre 0,056 (Sols de la série Lubumbashi (D-6)) et 0,171 t.h/MJ/mm (Sols de la série Musaonga (Ag-3)), réparties sur la zone d'étude selon les différentes unités homogènes. Le périmètre présente deux classes d'érodibilité : une classe

d'érodibilité moyenne (0,06 - 0,171) couvrant presque la moitié (54%) de la superficie totale du périmètre, et une autre classe d'érodibilité faible (0 - 0,056) représentant 46% de la surface, selon Gold- Smith (1977), qui est inférieure à 0,09 t.h/MJ/mm (Tableau 8).

Pente et topographie : Facteur LS

La carte des pentes montre l'existence de cinq classes de pente (Figure 4.A). Le degré de la pente est classé selon des valeurs variantes entre 0 à 80. La classe 0-1 représente 18% de la surface du périmètre. Elle est éparpillée sur toute l'étendue de la Ferme Kasapa. La classe 1-5 est localisée surtout à la partie nord en amont, au centre du périmètre et quelque peu à la périphérie couvrant une superficie de 85,8 ha soit 50% de la surface totale du périmètre. Les pentes dépassant 5% sont localisées de façon isolée sur une superficie de 54,2 ha soit 31% du périmètre (Tableau 9).

Le facteur topographique LS est classé selon des valeurs allant entre 0 à 39. La lecture de la carte (Figure 4.B) reflète la topographie du terrain. Les valeurs minimales (0 - 2) couvrent 74% de la superficie totale de l'étendue et sont quasiment réparties sur tout le périmètre. Les valeurs comprises entre 2 et 5 sont réparties de manière isolée sur le reste du périmètre en couvrant en moyenne de 39,4 ha (23%). Les 3% restants de l'étendue du périmètre correspondent aux valeurs supérieures à 5, dispersées sur toute l'étendue, coïncidant généralement avec des zones à fortes pentes élevées (Tableau 10).

Ferme Kasapa, carte de risque potentiel d'érosion

La superposition multiplicative des trois couches thématiques représentant les facteurs de l'érosion sous format Raster, a permis l'obtention de la carte d'aléa d'érosion, exprimant la une valeur d'érosion potentielle en t/ha/an par unité spatiale. La carte obtenue (Figure 5) montre des taux d'érosion variant entre 1 et plus de 1218 t/ha/an, répartis irrégulièrement sur l'ensemble de l'aire d'étude, avec une moyenne de l'ordre de 30,8 t/ha/an. Le Tableau 11 représente la répartition des classes d'érosion au niveau de tout le

périmètre. Selon Wischmeier et Smith, (1978) une érosion très faible à faible varie entre 0 et 12 t/ha/an, une érosion modérée entre 12 et 24 t/ha/an, alors qu'au-delà de 24, l'érosion est forte (24 à 37 t/ha/an) à très forte (> 37 t/ha/an).

La carte d'érosion montre que seuls 35% de la superficie du périmètre présentent des taux d'érosion inférieurs ou égaux au seuil de tolérance maximale, variant généralement de 1 à 12 t/ha/an en fonction du climat, du type de sols et de l'importance de la pente. 26% de la superficie du périmètre représentent une érosion modérée, alors que les classes d'érosion élevée et grave, représentent respectivement 15% et 24% de la superficie de la Ferme Kasapa (Tableau 11).

Risque d'érosion des sols dans le périmètre agroforestier de Mukoma

Erodibilité : Facteur K

La Figure 6.A présente la distribution spatiale de 10 séries de sols auxquelles s'ajoutent les affleurements rocheux présents sur l'étendue de Mukoma (AFODEK). Les superficies occupées par ces séries des sols sont comprises entre 2,7 ha soit 0,1% (Sols de la série Kamalenga (E-5)) et 685,2 ha soit 29% (Kipushi (B-1)) pour toute l'étendue du périmètre. Les sols de la série Kasonta (C-1) couvrent 519,9 ha (22%), ceux de la série Misowa (C-2) occupent 458,4 ha (19%) tandis que les sols de la série Luano (C-3) ne représentent 15% de l'étendue soit 352,4 ha (Tableau 12). Quant à leur dispersion à travers l'étendue du périmètre, les sols de séries Misowa (C-2), Kasonta (C-1) et Kipushi (B-1) présentent une très grande dispersion vue aussi que leur superficie est grande.

La Figure 6.B présente la répartition spatiale des différentes classes du facteur K à travers le périmètre de Mukoma. Les valeurs du facteur K sont comprises entre 0,034 (Sols de la série Kasonta (C-1)) et 0,175 (Sols de la série Mukombo (Ag-4)) et sont réparties sur la zone d'étude selon les différentes unités homogènes. Le périmètre présente deux classes d'érodibilité des sols : une érodibilité faible (0-0,09) couvrant plus de trois quarts de l'étendue (85%) et une érodibilité faible à moyenne

(0,09-0,19) avec 15% de la superficie totale de Mukoma (Tableau 13).

Pente et Topographie : Facteur LS

La Figure 7.A montre la distribution des pentes topographiques sur le périmètre de Mukoma, on y constate un relief relativement plat (plusieurs pentes < 5%) et une distribution fortement hétérogène, expliquée par la dualité entre : les terrains plats dont les degrés de pentes sont inférieurs à 5% représentant plus de 75% de la superficie contre les puissants reliefs au nord et la partie médiane de ce périmètre Mukoma avec les pentes raides (degré de pentes entre 5 et 35%).

Le facteur topographique LS est classé selon des valeurs allant de 0 à 15. La lecture de la carte (Figure 7.B) reflète la topographie du terrain. Les valeurs minimales (0-2) couvrent plus de 80% de la superficie totale du périmètre Mukoma et sont réparties dans presque toute son étendue. Les valeurs comprises entre 2 et 15 sont réparties en deux groupes : une partie au nord et une autre partie vers le centre du périmètre Mukoma, couvrant la plus petite étendue (15%).

Occupation des sols et conservation : Facteurs C et P

La carte du Facteur C, présentée par la Figure 8.A, montre des valeurs allant entre 0,015 et 0,795.

Pour simplifier la lecture des résultats, les valeurs de Facteur C ont été réparties en 5 classes. D'après la répartition du facteur C sur le périmètre de Mukoma, la végétation joue un rôle protecteur très bon sur la majorité du bassin versant.

Puisque les classes 0,015 - 0,405 dominant sur 80% de la surface du périmètre ; sur cette surface la végétation a permis de diminuer, en moyenne, l'érosion de 75%.

Estimation des Pertes en sol sur le Périmètre de Mukoma/ AFODEK

La superposition multiplicative des cinq couches thématiques représentant les facteurs de l'érosion sous format Raster, a permis l'obtention de la carte d'aléa d'érosion, exprimant la valeur d'érosion potentielle. La carte obtenue (Figure 8.B) montre des taux d'érosion variant entre 0 et plus de 40 t/ha/an,

répartis sur l'ensemble de l'aire d'étude, avec une moyenne de l'ordre de 3,6 t/ha/an.

Dans ce travail, la carte des pertes de sol a été répartie en 4 classes pour une meilleure visualisation spatiale des pertes en sols.

La carte d'érosion montre que plus de 90% de la superficie du périmètre présente des taux d'érosion inférieurs ou égaux au seuil de

tolérance maximale, qui varie généralement de 1 à 12 t/ha/an en fonction du climat, du type de sols et de l'importance de la pente. Moins de 10% de la superficie du périmètre Mukoma représentent une érosion modérée à forte, alors que les classes d'érosion élevée et grave représentent respectivement 3% et 2%.

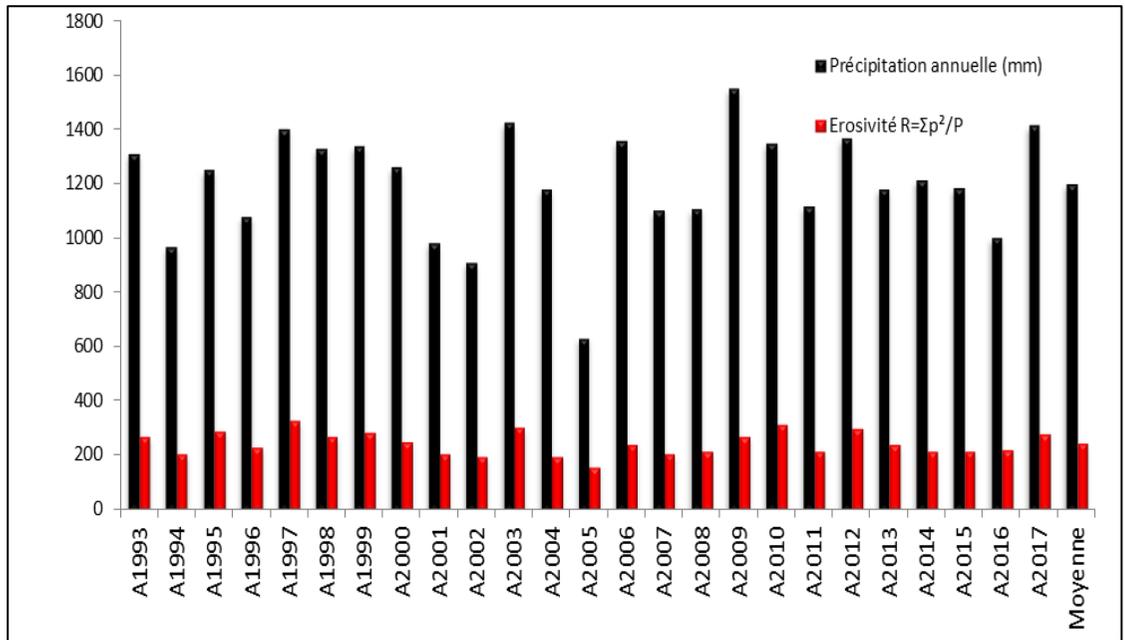


Figure 2 : Précipitations annuelles et érosivités annuelles de pluies au cours de la période de 1993 à 2017(25 ans) (Station INERA / KIPOPO et NASA).

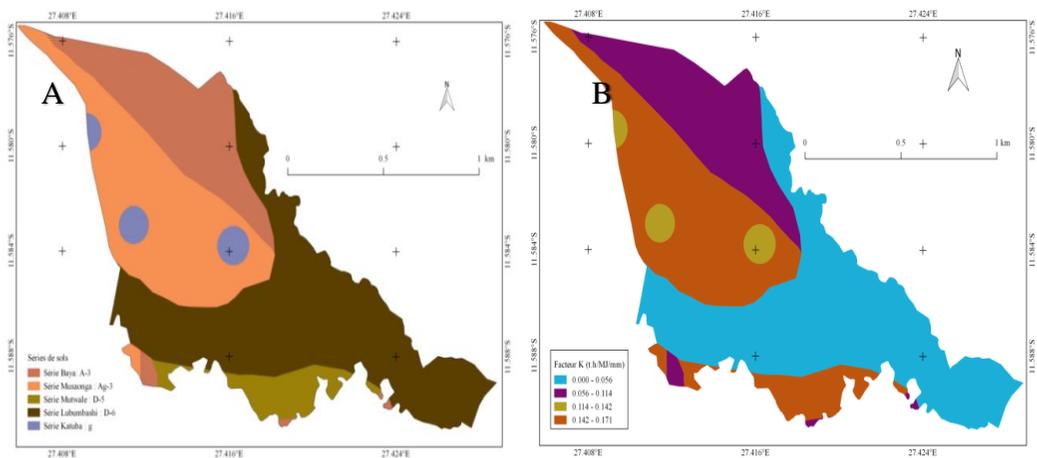


Figure 3. A : Carte de séries de sols adaptée de Sys et Schmitz (1959). B : Répartition des classes du facteur K sur le périmètre de la Ferme Kasapa.

Tableau 7 : Répartition des séries des sols à la Ferme Kasapa.

Série des sols	Effectif	Surface	Surface	Indice de dispersion
	Unités	ha	%	Surface (ha)/Effectif
Baya (A-3)	4	33,9	20	8,5
Katuba (g)	3	5,1	3	1,7
Lubumbashi (D-6)	1	74,8	44	74,8
Musaonga (Ag-3)	2	47,5	28	23,8
Mutwale (D-5)	4	9,9	6	2,5
Total	14	171,2	100	12,2

Tableau 8 : Répartition des classes d'érodibilité à la Ferme Kasapa suivant les séries de sols.

Séries de sols	Érodibilité de sols (t.h/MJ/mm)	Classe d'érodibilité des sols	Surface ha	Surface %
Lubumbashi (D-6)	0 - 0,056	Faible	80,5	46
Baya (A-3)	0,056 - 0,114	Faible à moyenne	33,9	19
Katuba (g)	0,114 - 0,142	Faible à moyenne	3,3	2
Musaonga (Ag-3), Mutwale (D-5)	0,142 - 0,171	Faible à moyenne	58,3	33
Total	-	-	176	100

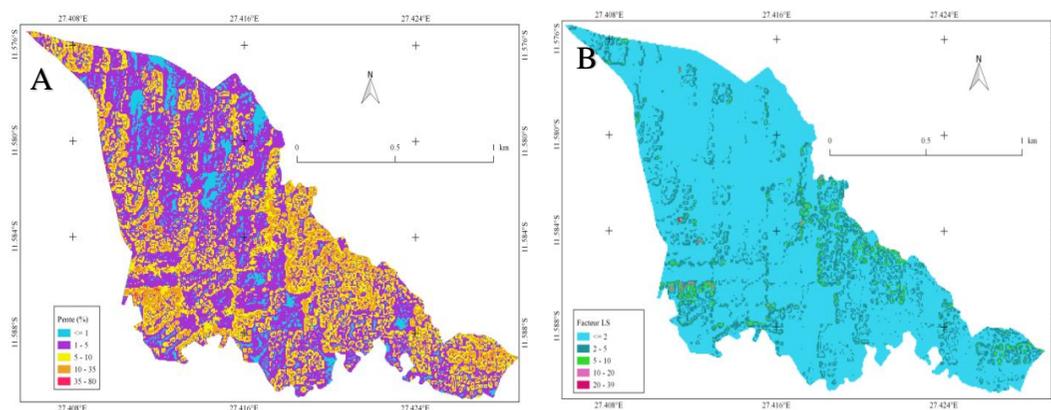


Figure 4. A : Répartition des classes des pentes. **B :** Carte du facteur topographique LS sur le périmètre de la Ferme Kasapa.

Tableau 9 : Répartition des classes de pentes à la Ferme Kasapa.

Classes de pentes (%)	Surface ha	Surface %
≤ 1	31,1	18
1-5	85,8	50
5-10	38,3	22

10-35	15,9	9
35-80	0,08	0,1
Total	171,2	100,0

Tableau 10 : Répartition des classes du facteur LS sur le périmètre de la Ferme Kasapa.

Classes du facteur LS	Surface	Surface
	ha	%
0 – 2	126,72	74,0
2 – 5	39,41	23,0
5 - 10	4,80	2,8
10 - 20	0,29	0,17
20 - 39	0,03	0,02
Total	171,25	100

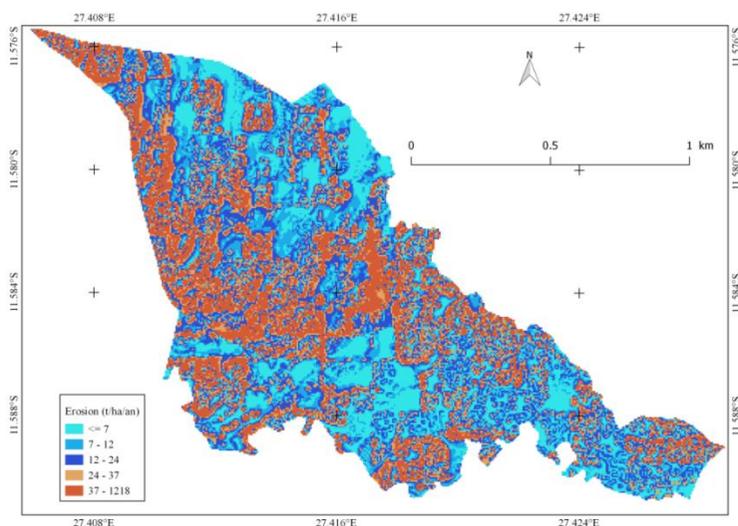


Figure 5 : Carte du risque potentiel d'érosion hydrique sur le périmètre de la Ferme Kasapa.

Tableau 11 : Répartition des classes de Perte en sol sur le périmètre de la Ferme Kasapa.

Classe des pertes en sols t/ha/an	Classe de risque d'érosion du sol	Surface ha	Surface %
< 7	Très faible (tolérable)	29,1	17
7 – 12	Faible	31,5	18
12 – 24	Modéré	44,7	26
24 – 37	Élevé	25,3	15
37 – 1218	Grave	40,7	24
Total	-	171,2	100

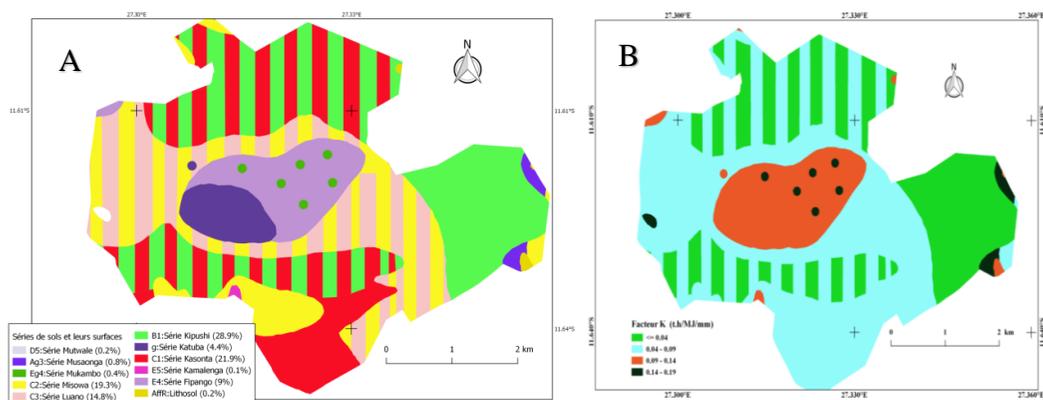


Figure 6. A : Carte de séries de sols et surfaces correspondantes adaptée de Sys et Schmitz (1959). **B :** Répartition spatiale des classes d'érodibilité des sols sur le périmètre de Mukoma.

Tableau 12 : Répartition des séries des sols sur le périmètre de Mukoma (AFODEK).

N°	Série des sols	Effectif	Surface	Surface	Indice de dispersion Surface/ Effectif
		Polygones	ha	%	
01	Fipango (E-4)	3	212,8	9	70,9
02	Kamalenga (E-5)	1	2,7	0,1	2,7
03	Kasonta (C-1)	24	519,9	22	21,7
04	Katuba (g)	4	105,2	4	26,3
05	Kipushi (B-1)	24	685,2	29	28,6
06	Lithosol (AFFR)	3	5,3	0,2	1,8
07	Luano (C-3)	23	352,4	15	15,3
08	Misowa (C-2)	26	458,4	19	17,6
09	Mukambo (Eg-4)	6	100065	0,4	1,7
10	Musaonga (Ag-3)	2	187186	1	9,4
11	Mutwale (D-5)	2	40908	0,2	2,1
Total		118	23748120	100	20,1

Tableau 13 : Classement des indices d'érodibilité K par séries de sols inventoriées et surfaces occupées sur le périmètre de Mukoma (AFODEK).

Série de sols	Facteur K	Classe d'érodibilité	Surface	Surface
	t.h/MJ/mm		ha	%
Kasonta (C-1) ; Kipushi (B-1)	$\leq 0,04$	Faible	675,4	29
Kasonta (C-1) ; Misowa (C-2) ; Luano (C-3)	0,04-0,09	Faible	1311,4	56
Katuba (g) ; Lithosol (Affr) ; Eipango (E-4) ; Kamalenga (E-5)	0,09-0,14	Faible à moyenne	321,4	14
Mutwale (D-5) ; Musaonga (Ag-3) ; Mukambo (Eg-4)	0,14-0,19	Faible à moyenne	32,3	1
Total			2340,5	100

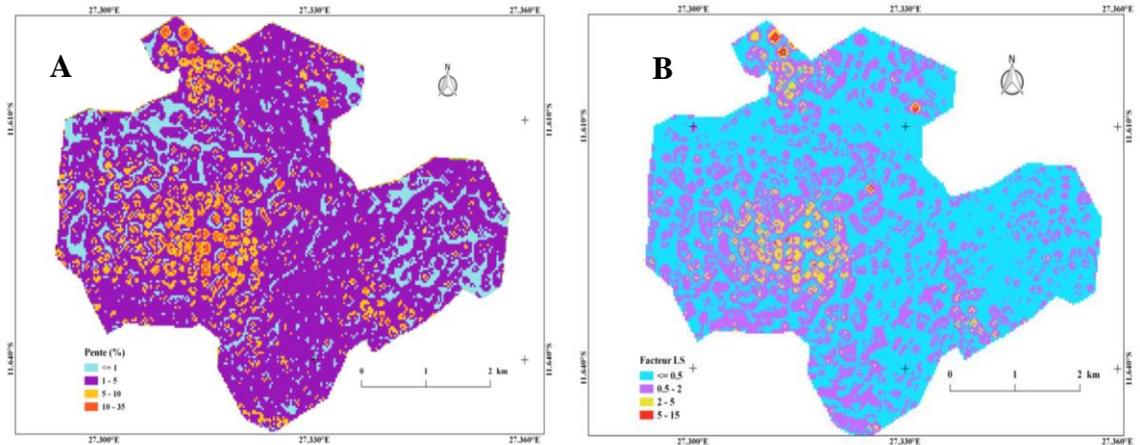


Figure 7. A : Carte de distribution spatiale des valeurs de la pente topographique. **B :** Carte du facteur topographique LS sur le périmètre de Mukoma (AFODEK).

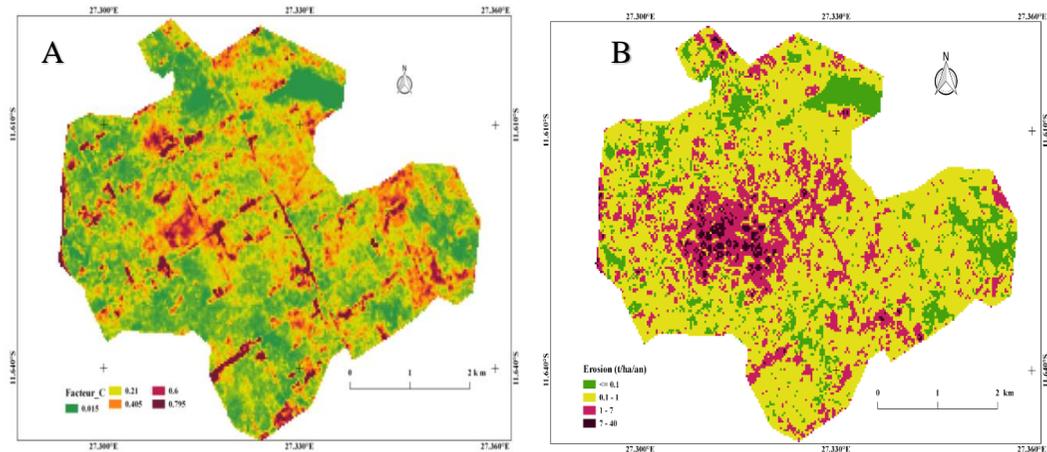


Figure 8. A : Carte de l'indice de couverture du sol, Facteur C, (2016). **B :** Carte du risque actuel d'érosion hydrique sur le Périmètre de Mukoma/AFODEK.

DISCUSSION

La mise en œuvre du modèle USLE apporte une information intéressante sur les processus en cours dans les périmètres étudiés : Ferme Kasapa et Mukoma. Il convient, cependant, de discuter les résultats annoncés dans cette étude au vu de l'échelle d'analyse, des données utilisées et du choix des équations. Les données utilisées dans le cadre de cette étude sont issues de bases de données régionales produites à partir d'anciennes cartes (carte pédologique) et de missions de terrain.

L'échelle de production des facteurs de l'équation est donc différente, par ailleurs une maille de 30 m a été choisie et la modélisation

proposée est valable à l'échelle 1/27000e. L'échelle d'analyse qui est ici celle d'un périmètre de plusieurs milliers de m² ne correspond pas à celle de la modélisation initiale proposée par Wischmeier et Smith, (1978) qui porte sur de petites parcelles (100 m²) ou de petits bassins versants de quelques hectares (El Hage et al., 2013 ; Kaci et al., 2017).

Cependant, dans ce contexte comme dans celui de notre zone d'étude, les pentes sont inférieures à 25% et ce sont les processus d'érosion en nappe qui dominent. Au-delà de cette valeur, le ruissellement et l'érosion linéaire agissent principalement. Les formes

d'érosion de masse ou linéaire, tels que les sakasakas, formes typiques d'érosion à Madagascar ne sont ici pas prises en compte par le modèle (Payet et Dumas, 2011). Celles-ci sont cependant peu représentées sur les deux périmètres étudiés (Ferme Kasapa et Mukoma) où la dégradation du sol se fait sur l'ensemble de leur surface sur la plupart des modelés.

Certaines données, telles que la pédologie et l'occupation du sol ne sont plus représentatives des conditions actuelles. Les cartes pédologiques datent des années 1959 et méritent d'être mises à jour. En effet, en contexte tropical et sous l'impulsion de la déforestation, l'occupation du sol et les états des surfaces du sol ont pu être modifiés. En ce sens, la structure et la perméabilité représentent donc des paramètres qui ont pu changer dans le temps. On considère en effet qu'en fonction de la brutalité/rapidité et du type de défrichement (manuel/mécanisé), les propriétés chimiques et physiques du sol pour les horizons superficiels sont modifiées.

Une fois les sols dénudés, la modification de ces sols est favorisée par l'agressivité du climat, la fragilité des sols et la minéralisation rapide des matières organiques ; l'ensemble de ces processus en action entraîne alors l'accélération des pertes de sols. On estime que le rythme de la dégradation des sols est plus rapide lors des premières années suivant le défrichement, puis qu'il se ralentit pour atteindre un nouvel équilibre au bout de 5 à 15 ans, en fonction du système de production. En parallèle, les phénomènes d'érosion augmentent une fois les sols dénudés et croissent en cas de cultures discontinues les années suivantes (Dossa, 2020). Il serait donc intéressant de disposer de données mises à jour sur la granulométrie en fonction des différents types d'occupation du sol. En ce qui concerne les données d'occupation du sol, au vu de la dynamique importante de reforestation, celles-ci semblent être représentatives des conditions actuelles.

De plus, aucune métadonnée ne renseigne sur leurs conditions de mise à jour rendant ainsi difficile l'interprétation de ces données. Au regard des images satellites de la zone, acquises par télédétection, les savanes

herbeuses semblent être sous-estimées et les surfaces forestières sont en régression, ceci atteste de la nécessité d'une mise à jour de ces documents. L'estimation des pertes de sols donnée dans le cadre de cette étude serait donc représentative de la situation sur le périmètre agroforestier de Mukoma pour les années 2016.

Le modèle USLE a souvent été utilisé hors de son contexte d'application, pour ceci des équations dérivées permettent de le déployer dans des régions climatiques et géologiques différentes. Aujourd'hui, beaucoup d'équations existent dans la littérature afin d'adapter la modélisation USLE aux pays peu renseignés et dont les données sont peu disponibles ou inexistantes tels que les pays en voie de développement ou encore les pays tropicaux. Dans ces milieux, le besoin d'information sur les processus érosifs à échelle régionale est important au vu de la dégradation actuelle sur les bassins versants. En effet, les dynamiques de changement d'occupation du sol et des états de surfaces y sont souvent rapides, sous l'effet de la déforestation pour le commerce du bois, l'alimentation des villes, les besoins de l'agriculture sur brûlis, etc. L'application de ces équations à une zone d'étude donnée est souvent à l'origine de biais ou d'erreurs dans l'évaluation des facteurs de l'équation et donc dans celle des pertes de sol.

Pour le calcul du facteur LS, le recours à l'équation empirique de David (1987) a été utilisée, au lieu de l'équation de référence de Wischmeier et Smith (1978). Celle-ci montre des résultats satisfaisants par rapport à la topographie réelle du bassin versant, dont la pente est en moyenne inférieure à 7% (selon les calculs réalisés à l'aide du MNT à 30 m de résolution spatiale). Selon les travaux de Datta en 2010, le facteur LS calculé à partir du SRTM à 90 m montre une surestimation des valeurs : les longueurs de pentes calculées à partir de MNT (ASTER/SRTM) sont plus importantes, que celles mesurées sur le terrain. Ceci est imputé au lissage des surfaces et à la disparition des microreliefs. En outre, la longueur de pente dépasse parfois 300 m dans la réalité (Payet et al., 2011). En ce qui concerne l'estimation des pentes à partir de

MNT, une tendance à la disparition des pentes les plus importantes est observée avec l'augmentation de la résolution. L'usage du SRTM montre une surestimation des pentes pour les zones aux reliefs peu accentués et une sous-estimation de celles-ci en région montagneuse (Guth, 2010). Les données SRTM produisent donc des pentes de déclivité moins importantes que celles mesurées sur le terrain. Les valeurs extrêmes minimales et maximales sont également plus importantes que celles observées en réalité. Ainsi l'étendue des valeurs des pentes s'étale entre 6% et 41% pour les données acquises sur le terrain et varie entre 0,32% et 45% pour les données SRTM dans l'Himalaya (Datta, 2010). Cependant, selon différents travaux (Guth, 2010 ; Datta, 2010), le SRTM apporte une description plus fidèle de la topographie par rapport à d'autres types de données telles que les données ASTER DEM à 30 m de résolution. En effet, ces données à plus haute résolution spatiale sont produites à partir d'images optiques par stéréoscopie (De Vente *et al.*, 2009 ; Kunta, 2009) et offrent une représentation plus ou moins réaliste de la topographie. Les calculs de pentes qui en découlent montrent une tendance à la surestimation des zones planes à modérément planes.

Le facteur R a été calculé à partir de l'équation de régression proposée par Arnoldus (1980). Cette équation de substitution a été appliquée dans différents travaux impliquant une modélisation USLE (Morschel et Fox, 2004 ; Sadiki *et al.*, 2004 ; El Gouarani *et al.*, 2008) et a montré des résultats satisfaisants. L'équation a été mise en œuvre à partir de nombreuses données provenant de différentes stations sur l'ensemble des États-Unis et permet donc de prendre en compte la variabilité des précipitations. Cette équation a montré des résultats concluants par rapport aux données mesurées *in situ* à Madagascar (Van Hulst, 2011).

Le facteur K a été calculé en fonction de la texture, la teneur du sol en matière organique, et de la perméabilité du sol par application de l'équation développée par Wischmeier et Smith (1978). Les données pour les sites étudiés ont été extraites à partir des

échantillons de sols décrits dans la notice de la carte de sols au 1/200.000e. Les valeurs de K attribuées aux sols des périmètres concernés ne sont pas spécifiques au milieu, étant donné ce facteur varie également dans le temps et dans l'espace en fonction des propriétés dynamiques du sol, de la pente et des techniques culturales (Cheggour, 2008). Dans le cadre de ce travail, les valeurs de K ont été attribuées sans tenir compte de la variabilité de l'érodibilité des sols en fonction de la pente et de l'occupation du sol et de son état de surface. Ce dernier paramètre tend à être pris en compte dans la modélisation USLE au travers le facteur C et P. En effet, hormis les propriétés intrinsèques des sols les paramètres tels que la végétation et la pente contribuent à modifier considérablement l'érodibilité des sols. La végétation protège les sols par son rôle de protection contre les agents érosifs, de fixation des sols et de piégeage de sédiments. Elle contribue également à améliorer l'infiltration des eaux pluviales et favorise un microclimat moins contrasté sous les plantes en raison de l'ombre (Tsewou *et al.*, 2020) et elle enrichit le sol à travers l'apport des éléments minéraux contenus dans sa litière après décomposition (Soulama *et al.*, 2020). Ces conditions génèrent alors, une faune et une flore, plus actives et modifient les propriétés des sols (Rey, 2002). De même, la sensibilité à l'érosion d'un sol caillouteux est plus faible que celle d'un sol composé des matériaux fins ou sableux (Bouguerra et Bouanani, 2016). La pente conditionne également la propriété et la structure des sols. En effet, les sols au sommet et au bas des versants sont souvent interdépendants et les variations de modèles accompagnent donc souvent des variations de propriétés structurales des sols. Ainsi sur terrains plats, les sols sont souvent plus épais que sur les terrains pentus où les sols seront en général plus minces, ceci est expliqué par l'entraînement des produits de l'altération, de l'humification ou de la minéralisation (Duchaufour, 2001). Sur les pentes, les sols sont alors peu évolués et rajeunis.

Malgré les réserves émises sur la mise en œuvre du modèle USLE hors de son cadre d'origine d'application, diverses études (s'appuyant sur les modèles USLE et adaptées

aux zones d'études par des sous équations différentes) menées à des échelles régionales sur de grandes étendues, comme dans les études réalisées par plusieurs auteurs (Mati et al., 2000 ; Van Der Knijff et al., 2000 ; Dabral et al., 2008 ; Dumas et Fossey, 2009 ; Dumas et al., 2010 ; Dumas et Printemps, 2010 ; Dumas et al., 2010) ont apporté des résultats concluants.

Conclusion

Le problème de l'érosion des sols abordé au travers de l'équation de Wischmeier et Smith (1978) s'applique aisément aux Systèmes d'Information Géographique par la compatibilité entre l'USLE et l'algèbre de carte. Le SIG permet de gérer d'une façon rationnelle, une multitude de données, à référence spatiale, relatives aux différents facteurs de la dégradation des sols, ce qui nous a permis de conclure que ces facteurs principaux influencent l'érosion hydrique. L'application du modèle USLE donne des résultats relativement très fiables qui peuvent apporter une aide précieuse, à coûts très bas, aux décideurs et aménageurs du territoire dans le but de simuler des scénarios d'évolution et par la suite cibler les zones prioritaires qui nécessitent des actions de conservation et de lutte contre l'érosion. Les résultats obtenus, sous forme de carte de risque d'érosion potentiel, montrent que le périmètre de la Ferme Kasapa présente des pertes en sols qui varient de 1 et plus de 1218 t/ha/an avec une perte moyenne annuelle relativement forte de 30,8 t/ha/an. Plus de 39% de la superficie totale de la Ferme Kasapa présente des valeurs supérieures à 24 t/ha/an. Cette perte résulte de l'interaction des plusieurs facteurs qui se conjuguent aussi pour accélérer l'érosion. En plus de la présence des formations.

lithologiques à érodibilité moyenne (séries de sols : Baya, Musaonga, Katuba et Mutwale.), le périmètre a été assimilé à une couverture végétale complètement dégradée (Facteur C=1) et des pentes fortes (31% de la surface totale du périmètre présente des pentes supérieures à 5%). L'utilisation des terres est clairement le contrôle le plus important sur les taux d'érosion, celle-ci a été évaluée à sa valeur

maximale se rapportant à la non-utilisation des pratiques antiérosives. Il a été observé un faible risque du sol à l'érosion sur le périmètre de Mukoma (AFODEK), où la valeur en perte en terre est en moyenne 3,6 t/ha/an, justifiée par la bonne couverture du sol et l'utilisation des pratiques culturales antiérosives.

Le modèle appliqué dans cette étude est assez fiable et il peut être, avec mises à jour continue et une amélioration des données sources et des méthodes appliquées, un outil important pour l'évaluation spatiotemporelle des risques d'érosion. Les résultats obtenus, sous format cartographique, permettent de cibler les zones qui nécessitent une action prioritaire pour une analyse à plus grande échelle, en vue de trouver les solutions appropriées pour lutter contre l'érosion et protéger le milieu naturel.

En perspective, il serait possible d'envisager un suivi des dynamiques d'occupation du sol, et d'apporter une meilleure description des facteurs C, K et LS afin d'affiner l'estimation des pertes de sols.

CONFLIT D'INTERETS

Les auteurs déclarent qu'ils n'ont aucun conflit d'intérêts pour cet article.

CONTRIBUTIONS DES AUTEURS

Les auteurs ci-dessous ont participé des diverses manières à la préparation de ce papier. FMKB et JBM ont participé à la collecte des données, au laboratoire, à la conception, à la rédaction et à la publication de l'article ; FKN, FKM, MMK et GMM ont participé à la collecte des données et à la rédaction ; JNM et EKLM étant les superviseurs à la réalisation de toutes les étapes de cette étude.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Professeur Yannick USENI SIKUZANI, pour les remarques et suggestions ; les autorités administratives de la ferme Kasapa/FSA-UNILU et de Mukoma/AFODEK, pour le cadre de recherche ainsi que la station INIRA/KIPOPO, pour les données climatiques.

RÉFÉRENCES

- Arnoldus HMJ. 1977. Methodology used to determine the maximum potential average soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco Assessing Soil Degradation. *FAO Soils Bulletin*, **34**: 8-9.
- Benchettouh A, Kouri L, Jebari S. 2017. Spatial estimation of soil erosion risk using RUSLE/GIS techniques and practices conservation suggested for reducing soil erosion in Wadi Mina watershed (Northwest, Algeria). *Arab J Geosci.*, **10** : p79.
- Bouguerra S, Bouanani A. 2016. Cartographie qualitative de la sensibilité du sol à l'érosion hydrique : Cas du bassin versant oued Boukiou (Nord-ouest de l'Algérie). *Étude et Gestion des Sols.*, **23** : 91-100.
- Brooks RR, Baker AJM, Malaisse F. 1992. Copper Flowers. National Geographic CEC (Commission of the European Community). 1992. Corine Soil erosion risk and important land resources in the southern regions of the European Community Brussels, Commission of the European Community EUR 13233 EN, Luxemburg, Office for official Publications of the European Community, p.97.
- Cheggour. 2008. Mesures de l'érosion hydrique à différentes échelles spatiales dans un bassin versant montagneux semi-aride et spatialisation par des S.I.G. : Application au bassin versant de la Rhéray a, Haut Atlas, Maroc, p.4.
- Dabral PP, Baithuri N, Pandey A. 2008. Soil erosion assessment in a hilly catchment of North Eastern India using USLE, GIS and remote sensing. *Water Resources Management.*, **22**: 1783-1798.
- Datta PS, Schack KH. 2010. Erosion Relevant Topographical Parameters Derived from Different DEMs. A Comparative Study from the Indian Lesser Himalayas. *Remote Sensing*, **2**: 1941-1961.
- David WP. 1987. Soil and water conservation planning. Policies, Issues and recommendations. DENR Quezon City.
- De Vente J, Poesen J, Govers G, Boix-Fayos C. 2009. The implications of data selection for regional erosion and sediment yield modeling. *Earth Surface Processes and Landforms.*, **34** : 1994-2007.
- Dossa BKA. 2020. Lutte contre la dégradation des terres agricoles dans le département du Couffo au Bénin. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **14**(6) : 2147-2159.
- Duchaufour P. 2001. *Introduction à la Science du Sol, Végétation, Environnement* : Dunod ; p.331.
- Dumas P, Fossey M. 2009. Mapping Potential Soil Erosion in the Pacific Islands. A case study of Efate Island (Vanuatu). Proceedings 11th Pacific Science Inter Congress, Pacific Countries and their ocean, facing local and global changes, Tahiti French Polynesia, p.5. http://cnep.univ-nc.nc/IMG/pdf/Article_PSI_Mapping_Potential_Soil_Erosion_in_the_Pacific_Island_DUMAS_Pascal_2010.pdf
- Dumas P, Printemps J, Mangeas M, Luneau GG. 2010. Developing Erosion Models for Integrated Coastal Zone Management. A Case Study of New Caledonia West Coast ». *Marine Pollution Bulletin.*, N°161: 519-529.
- Dumas P, Printemps J. 2010. Assessment of Soil Erosion Using USLE Model and GIS for Integrated Watershed and Coastal Zone Management in the South Pacific Islands. *Proceedings Interpraevent, International Symposium in Pacific Rim, Taipei, Taiwan*, pp. 856-866. http://cnep.univ-nc.nc/IMG/pdf/Article_Interpraevent_Assessment_of_Soil_Erosion_Using_USLE_Model_Dumas_Pascal_2010.pdf
- El Garouani A, Chen H, Lewis L, Tribak A, Abahrour EM. 2008. Cartographie de l'utilisation du sol et de l'érosion nette à partir d'images satellitaires et du SIG idrisi au Nord-est du Maroc. *Teledetection, Editions des Archives Scientific Publishers.*, **8** (3): 193-201. hal-00434258f

- El Hage HH, Tauchat L, Faour G. 2013. La sensibilité potentielle du sol à l'érosion hydrique dans l'ouest de la Bekka au Liban. *Mappemonde*, p.17p
- Elbouqdaoui K, Ezzine H, Badrahoui M, Rouchdi M, Zahraoui M, Ozer A. 2005. Approche méthodologique par télédétection et SIG de l'évaluation du risque potentiel d'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued Srou (Moyen Atlas, Maroc). *Geo-Eco-Trop.*, **29**: 25-36.
- Guillobez S, Lompo F, De Noni G. 2000. Le suivi de l'érosion pluviale et hydrique au Burkina Faso. Utilisation d'un modèle cartographique. *Sécheresse.*, **11**(3) :163-169.
- Guth PL. 2010. Geomorphometric comparison of ASTER GDEM and SRTM. Symposium of ISPRS Technical Commission IV et Auto Carto, Orlando, Florida., November 11 : 15-19, 2010 Orlando, Florida pp. 15-19, [En ligne] URL: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/part4/files/Guth.pdf>.
- Hudson NW. 1973. *Soil Conservation*. Batsford : London ; p.320.
- Ilunga L. 2006. Étude des sites majeurs d'érosion à Uvira (RDC). *Geo-Eco-Trop.*, **30**(2) : 1-12.
- Ioannis ZG, Kostas D, Chara M, George NS, Christos GK. 2002. Multi-Temporal Soil Erosion Risk Assessment in N. Chalkidiki Using a Modified USLE Raster Model. *EARSeL eProceedings*, p.8.
- Jensen JR. 2000. *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective* (published as 1st edn). Upper Saddle River. Prentice Hall Inc.: New Jersey.
- Kaci M, Habi M, Morsli B. 2017. Estimation de l'érosion hydrique par l'application de l'équation universelle de pertes en sol (USLE). Cas du bassin versant non jaugé de l'oued Rhiou, (Bassin de Cheliff) Algérie *Geo-Eco-Trop.*, **41** (3) : 503-518.
- Kalman R. 1970. Ruissellement et érosion en nappe (Expérimentation au simulateur de pluie). *Annales de la Recherche Forestière au Maroc.*, **12** : 177-287.
- Khali IL, Ben Hamman LK, Raissouni A, El Arriml A. 2016. Cartographie Quantitative du Risque d'Erosion des Sols par Approche SIG/USLE au Niveau du Bassin Versant Kalaya (Maroc Nord Occidental). *J. Mater. Environ. Sci.*, **7** (8) : 2778-2795.
- Khaoula K. Sihem J. 2021. Évaluation de l'érosion hydrique dans des bassins versants de la zone semi-aride tunisienne avec les modèles RUSLE et MUSLE couplés à un Système d'information géographique. *Cah. Agric.*, **30** : p.7. DOI : <https://doi.org/10.1051/cagri/2020048>
- Kouli M, Soupious P, Vallianatos F. 2009. Soil erosion prediction using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in a GIS framework, Chania, Northwestern Crete, Greece. *Environmental Geology.*, **57** : 483-497.
- Koussa M, Bouziane M-T. 2018. Apport de SIG a la cartographie des zones à risque d'érosion hydrique dans le bassin versant de Beni Haroun, Mila, Algérie. *Geo-Eco-Trop.*, **42**(1): 43-56.
- Kunta K. 2009. Effects of Geographic Information Quality on Soil Erosion Prediction. Thesis, Institute of Geodesy and Photogrammetry Swiss Federal Institute of Technology Zurich, p.155.
- Le Bissonnais Y, Thorette J, Bardet C, Daroussin J. 2002. *L'Erosion Hydrique des Sols en France*. INRA, IFEN ; p.106.
- Mati BM, Morgan RPC, Gichuki FN, Quinton JN, Brewer TR, Liniger HP. 2000. Assessment of erosion hazard with the USLE and GIS: A case study of the Upper EwasoNg'iro North basin of Kenya. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **2**(2): 78-86.
- Meliho M, Khattabi A, Mhammdi N, Hongming Z. 2016. Cartographie des risques de l'érosion hydrique par l'équation universelle révisée des pertes en sols, la télédétection et les sig dans le bassin versant de l'Ourika (Haut Atlas, Maroc). *European Scientific Journal.*, **12**(32): 1857 -7881.

- Mohamed Y, Rachid B, Abdellah EH, Ali E, Mourad EA. 2014. Modélisation de l'érosion hydrique via les SIG et l'équation universelle des pertes en sol au niveau du bassin versant de l'Oum Er-Rbia. *International Journal of Engineering and Science.*, **3**(8): 83-91.
- Morschel J, Fox D. 2004. Une méthode de cartographie du risque érosif : application aux collines du Terrefort Lauragais, M@ppemonde, N° 76, p.11, [En ligne] URL : <http://mappemonde.mgm.fr/num4/articles/art04404.pdf>
- Nafu II. 2006. Conservation des sols avec l'aide du SIG et de la télédétection – Exemple d'utilisation d'un SIG et de la Télédétection pour l'estimation des pertes en terre dans un petit bassin à l'Ouest du Mali. *Symposium Malien sur les Sciences Appliquées*, Bamako., **30** : 142-151.
- Ngongo L, Van Ranst E, Baert G, Kasongo EL, Verdoodt A, Mujinya BB, Mukalay JM. 2009. *Guide des Sols en R.D. Congo*. Tome I : Guide de gestion. UNILU : Lubumbashi ; p.262.
- Ouedraogo B, Kabore O, Kabore M. 2019. Cartographie quantitative de l'érosion des sols par approche SIG/RUSLE dans la Commune de Karangasso vigué (Burkina Faso). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **13**(3): 1638-1653.
- Payet E, Dumas P, Pennober G, 2011. Modélisation de l'érosion hydrique des sols sur un bassin versant du sud-ouest de Madagascar, le Fiherenana. *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement.*, **11**(3) : 29.
- Renard KG, Freimund JR. 1994. Using monthly precipitation data to estimate the R factor in the revised USLE. *Journal of Hydrology*, (157): 287-306.
- Rey A, Pegorano E, Tedeshi V, DeParri I, Paul G. 2002. Variation annuelle de la respiration du sol et de ses composantes dans une forêt de chênes taillis du centre de l'Italie. *Global Change Biology*, **8**(9) : 851-866.
- Roose E, Sarrailh JM. 1990. Érodibilité de quelques sols tropicaux, vingt années de mesure en parcelles d'érosion sous pluies naturelles. *Cahiers de l'ORSTOM, Série Pédologique*, **25**(12) : 24.
- Roose E. 1985. Impact du défrichement sur la dégradation des sols tropicaux. *Machinisme Agricole Tropical*, (98) : p.14.
- Roose E. 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Par Directeur de recherche en pédologie. Bulletin Pédologique de la FAO 70 France. <http://www.fao.org/docrep/T1765F/t1765f00.htm> (visité septembre 2006).
- Roose E. 1994. Méthodes de mesure des états de surface du sol, de la rugosité et des autres caractéristiques qui peuvent aider au diagnostic de terrain des risques de ruissellement et d'érosion, en particulier sur les versants cultivés des montagnes. ORSTOM ; Laboratoire d'étude du Comportement des Sols Cultivés, BP 5045, Montpellier.
- Sadiki A, Bouhlassa S, Saïdati, Auajjar J, Faleh A, Macaire JJ. 2004. Utilisation d'un SIG pour l'évaluation et la cartographie des risques d'érosion par l'Équation 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.*, (26) : 69-79.
- Samir T, Mohamed M, Gil M, Yao TB. 2013. Cartographie de l'érosion dans le bassin versant de l'Oued Mina en Algérie par télédétection et SIG. *Hydrological Sciences Journal*, **58**(7) : 1542-1558. DOI: 10.1080/02626667.2013.824088
- Stone RP, Hillborn D. 2000. Universal Soil Loss Equation. Ontario, Canada, Ontario Ministry of Agriculture and Food (OMAFRA). [En ligne] URL: [http://www.giser.be/wp-content/uploads/2017/05/USLE-infos Canada. pdf](http://www.giser.be/wp-content/uploads/2017/05/USLE-infos%20Canada.pdf).
- Soulama S, Kabore Wb, Bambara D, Bembamba M, Hien E. 2020. Évaluation de la qualité de composts à base de biomasses feuillées de deux espèces agroforestières à Cassou, Centre-Ouest,

- Burkina Faso. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **14**(9): 3297-3307.
- Sys, Schmitz. 1959. Notes explicatives des cartes des sols et de la végétation du Congo Belge et Rwanda Urundi, région d'Élisabethville. N° 9 A, B, et C. INEAC, Bruxelles.
- Tsewoue MR, Tchamba M, Avana ML, Tanougong AD. 2020. Dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol dans le Moungo, Région du Littoral, Cameroun : influence sur l'expansion des systèmes agroforestiers à base de bananiers. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **14**(2): 486-500.
- Van der Knijff JM, Jones RJA, Montanarella L. 2000. Soil erosion risk assessment in Italy, European Commission, Erosion Soil Bureau, p.52.
- Van Hulst F. 2011. Soil erosion using RUSLE for rain fed crops under Conservation Agriculture practices en the lake Alaotra region in Madagascar. Master thesis, Wageningen University, p.55.
- Williams JR, Potter KN. 1985. The new EPIC wind erosion modal. *Hydraulic Eng.*, **111**: 970-986.
- Wischmeier WH, Smith DD. 1978. Prediction rainfall erosion losses, a guide to conservation planning Science. U.S. Dept. Agriculture. Agric. Handbook 537, p.60.
- Zhou P, Luukkanen O, Tokola T, Nieminen J. 2008. Effect of vegetation cover on soil erosion in a mountainous watershed. *CATENA.*, **75** (3): 319-325.
- Zingg AW. 1940. Degree and Length of Land Slope as it Affects Soil Loss in Runoff. *Agricultural Engineer*, (21) : 59-64.