

Evaluation spatiale de l'érosion hydrique à Torokoro (Burkina Faso) : application de l'équation universelle des pertes des terres (USLE) par télédétection et système d'information géographique

SérAPHINE KABORE / SAWADOGO¹ et Blaise OUEDRAOGO²

Résumé

L'article présente les résultats d'approche d'intégration de données multi-sources en vue de l'évaluation et de la cartographie des pertes en terres dans une zone de front pionnier agricole au Burkina Faso. L'objectif principal de l'étude est de montrer qu'il est possible d'évaluer spatialement les pertes en terres dans un environnement de données détaillées très limitées.

Le terroir de Torokoro, site de l'étude, est caractérisé par des changements écologiques notables liés entre autres aux mauvaises pratiques agricoles et à l'absence de protection des sols.

L'approche méthodologique s'appuie sur le modèle de Wischmeier et Smith (1978), notamment l'équation universelle des pertes des terres (équation USLE). Cette équation permet de déterminer à long terme un taux annuel moyen d'érosion dans les champs ou les bassins versants, en fonction des caractéristiques des pluies, du type de sol, de la topographie, de l'assolement et des pratiques de gestion des cultures.

Les paramètres de l'équation USLE ont été obtenus à partir de traitements de données satellitaires, des données auxiliaires issues de travaux antérieurs et d'observations *in situ* dans un cadre de système d'information géographique (SIG).

L'étude a permis de faire une estimation des pertes annuelles en terre sur le site et d'établir une carte de l'érosion. Les résultats obtenus varient entre 200 et 1800 kg.ha⁻¹.an⁻¹.

Mots-clés : Érosion hydrique, USLE, Télédétection, SIG, Torokoro.

Spatial assessment of water erosion in Torokoro (Burkina Faso) : universal soils loss equation application using remote sensing and geographic information system

Abstract

This paper presents the results of multi-sources data integration approach for the cartography and the spatial evaluation of the soil losses in an agricultural frontal zone in Burkina Faso. The main objective of the study was to show how it is possible to estimate spatially soil losses in an environment of very limited detailed data.

¹ Ph.D. Attachée de recherches

Cellule de Télédétection et d'Information Géographique INERA - Ouagadougou 04 BP 8645 Ouaga 04
Téléphone : (226) 50 34 02 70 / 70 26 78 40 Email : phinekabore@yahoo.fr

² M.Sc., Ingénieur de recherches

Cellule de Télédétection et d'Information Géographique INERA - Ouagadougou 01 BP 476 Ouagadougou 01
Téléphone : (226) 50 31 92 02/08 / 70278332 Email : blaise32fr@yahoo.fr

In the study area called Torokoro, soils are characterized by considerable ecological changes with poor sustainable agricultural practices and low soils protection techniques.

The methodological approach is based on the model of Wischmeier and Smith (1978) namely the universal equation of the losses of grounds (USLE equation). This equation estimates an annual average rate of long-term erosion, in a field or a basin, according to the characteristics of rainfall, soils type, topography, crop rotation system and crop management practices.

The parameters of the equation USLE are derived from satellite data processing, from auxiliary data from previous studies and from in situ data in a geographical information system (GIS).

The study allowed to make an estimation of the annual soil losses in the study area and to establish an erosion map. The calculated annual soil losses vary between 200 and 1800 kg.ha⁻¹.an⁻¹.

Keywords: Water Erosion, USLE, Remote Sensing, GIS, Torokoro.

Introduction

D'origine hydrique ou éolienne, l'érosion du sol se définit comme l'ablation et le transport de particules solides par l'eau ou le vent qui sont déposées ailleurs. L'érosion hydrique est un indicateur important de la dégradation des terres. Elle se définit comme étant la perte quantitative en sols et la réduction qualitative de leur potentiel de production sous l'action de l'eau et constitue ainsi une menace pour les terres. Les particules arrachées et transportées par l'eau sont en effet, riches en minéraux argileux, en matière organique et en nutriments (ROOSE et LELONG, 1977). Dans les zones agricoles des pays en voie de développement, elle est considérée comme la plus importante forme des dégradations des terres induites par l'homme (OLDEMAN *et al.*, 1991). Au niveau global, l'érosion des sols constitue la première cause de déforestation et contribue aux changements climatiques réduisant ainsi la productivité agricole et environnementale (DURÁN and RODRÍGUEZ, 2008).

L'étude de l'érosion hydrique, notamment l'évaluation des pertes en terre, a intéressé de nombreux spécialistes à travers le monde. Des modèles mathématiques ont été développés pour prédire les pertes en terres. La modélisation vise essentiellement la représentation abstraite des processus naturels et l'amélioration de leur compréhension. Parmi les modèles de perte en terre, on peut citer notamment ceux de STEHLIK (1970), de MORGAN *et al.* (1984) et de WISCHMEIER et SMITH (1978). Le modèle de Stehlik évalue les pertes en terres en terme d'ablation (NAHAL, 1975). Le modèle de MORGAN *et al.* (1984) s'est intéressé à la stabilité de l'érosion en termes de variation de la hauteur du sol dans le temps tandis que le modèle de WISCHMEIER et de SMITH (1978), désigné sous le nom de équation universelle de perte en terres (USLE), fait une estimation globale de l'érosion. Ces modèles, développés pour évaluer l'érosion à l'échelle du champ, mettent en équation les flux de sédiments à l'exutoire du bassin et les variables explicatives des facteurs climatiques et physiques.

La cartographie de l'érosion hydrique implique une représentation spatiale de ces différents paramètres et leur intégration dans un cadre géoréférencé notamment le Système d'Information Géographique (SIG). Dans le SIG, chacun des pixels peut être en effet considéré comme une parcelle de champ permettant de lever certaines conditions du modèle telles que son application à des pentes où l'exploitation agricole est possible (SVORIN, 2003). Cependant, la non disponibilité des données intrants constitue le plus souvent un obstacle à l'utilisation des SIG. Il faut alors exploiter des données multi-sources afin de déterminer et de quantifier les paramètres intrants du modèle. Ainsi, les données de télédétection permettent de définir certains des para-

mètres de l'équation USLE (HEDIA, 1993) et l'extrapolation de résultats d'études dans des zones écologiques similaires peut compléter la base de données nécessaire à la modélisation.

Nous avons utilisé cette approche pour évaluer les pertes en terres à Torokoro où les conditions climatiques, la destruction de la végétation (déforestation), les mauvaises pratiques culturales (cultures sur brûlis) et l'absence de mesures de protection des terres constituent des facteurs de risques de pertes en terre.

Matériels et méthodes

Les données et logiciels utilisés

Les données utilisées pour l'étude comprennent :

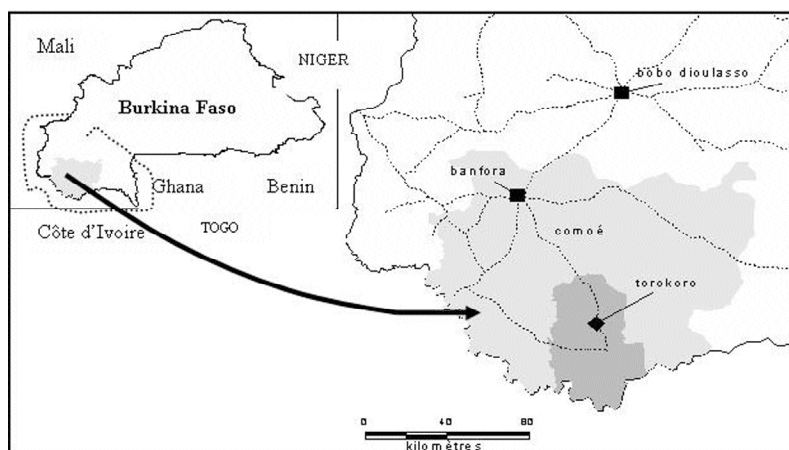
- des données cartographiques composées d'une carte topographique au 1:50 000 de l'IGB et d'une carte pédologique au 1:50 000 du BUNASOLS ;
- des données climatiques (pluviométrie) ;
- des données satellitales (scène 196-053 de l'image Landsat ETM du 7 novembre 2000) ;
- des données terrain sur les pratiques culturales et de conservation de sols ;
- des données auxiliaires issues d'exploitation documentaire sur des études conduites dans des zones similaires.

Les logiciels suivants ont été utilisés dans un environnement Windows XP :

- Envi 4.0 pour les traitements de l'image satellitale,
- Arc View 3.2 et MAP INFO 7.0 pour les SIG.

Le site d'étude

Le site d'étude est le terroir de Torokoro qui se situe entre les méridiens 4°20' et 4°30' ouest et les parallèles 10°00' et 10°05' nord, à une centaine de kilomètres de Banfora, dans l'Ouest du Burkina Faso (carte 1). Le terroir couvre une superficie d'environ 24.000 ha et est représentatif de la modification du paysage par les activités humaines qui entraînent les bouleversements dans la structure de la végétation et des sols (INERA, 1999).



Carte 1. Carte de localisation du site d'étude.

Torokoro appartient au climat de type sud-soudanien délimité par les isohyètes 1000 et 1200 mm. Les pluies sont distribuées de façon uni-modale avec un maximum généralement observé en août. Selon DIALLO *et al.* (1998), les précipitations se concentrent au milieu de la saison humide et sur moins de jours pluvieux par rapport aux dernières décennies. A la réduction des totaux annuels s'ajoute un régime de précipitations plus violentes, avec des allures agressives. Ces caractéristiques climatiques jouent alors un rôle très important dans l'érosion hydrique.

Trois types de sols composent le paysage de la zone d'étude : sols ferrugineux tropicaux, sols hydromorphes et lithosols.

Les sols ferrugineux tropicaux sont de profondeur variable (20 à 100 cm). On distingue : (i) les sols ferrugineux tropicaux lessivés à taches et concrétions (FLTC), assez profonds (Barro et BOTONI, 2003), correspondant aux lexisols eutriques selon la terminologie de la FAO (1990) ; (ii) les sols ferrugineux tropicaux indurés peu profonds (20 à 40 cm) ; (iii) les sols ferrugineux tropicaux lessivés (FLC), moyennement profonds (40 à 100 cm), sableux en surface et progressivement fins en profondeur (argileux) et (iv) les sols ferrugineux lessivés indurés (FLI).

Les sols hydromorphes (HPGS) se rencontrent dans les bas-fonds ou dans les axes de drainage des galeries forestières. Ils sont souvent profonds (>100 cm) de texture limono-argileuse en surface et argileuse en profondeur et de ce fait, sont favorables à des cultures exigeantes comme l'igname. Cependant, la texture sablo-limoneuse de l'horizon supérieur les rend facilement dégradables en cas de pression anthropique (PARÉ, 2003).

Les lithosols sur cuirasse ferrugineuse qui se situent sur les collines et les buttes cuirassées sont des sols sableux et gravillonnaires, rocailleux ou caillouteux, généralement peu profonds (< 40 cm).

Comme partout ailleurs au Burkina Faso, la répartition des types de végétation dépend du climat et en particulier de la hauteur des précipitations annuelles et de la durée de l'unique saison humide (GUINKO, 1983). Le couvert végétal de Torokoro est assez diversifié malgré la forte emprise agricole qui caractérise l'espace et qui se traduit par une dégradation continue de la végétation naturelle (modification de la structure et de la composition floristique). L'influence anthropique se manifeste entre autres par l'appauvrissement des sols, la dégradation des différentes formations et la fragmentation des grands ensembles de paysages (BOTONI, 2003).

Le réseau hydrographique est dominé par le fleuve Comoé et la Léraba, son affluent principal selon un régime de type tropical pur. La saison des crues dure trois mois (mi-juillet à mi-octobre). En saison sèche, aucun écoulement n'est observé et le lit du cours d'eau se trouve alors fractionné en chapelets de mares, dont certains se dessèchent entre mars et mai. De nombreux bas-fonds y sont observés.

Méthodologie

Elle s'appuie sur le modèle de WISCHMEIER et de SMITH (1978) ou équation universelle de pertes en terres (USLE) exprimée par une fonction multiplicative de l'érosivité des pluies (R) correspondant à l'énergie potentielle) et de la résistance du milieu selon la formule suivante : $A = R \times K \times LS \times C \times P$. La résistance du milieu intègre l'érodibilité du sol (K), le facteur topographique (LS), le couvert végétal et les pratiques agricoles (C) et les pratiques anti-érosives (P). Les données intrants du modèle proviennent de sources diverses et ont été géoréférencées et spatialisées pour constituer une base de données relationnelle consistante pour assurer des analyses spatiales pertinentes. La figure 1 décrit le cadre conceptuel de la démarche.

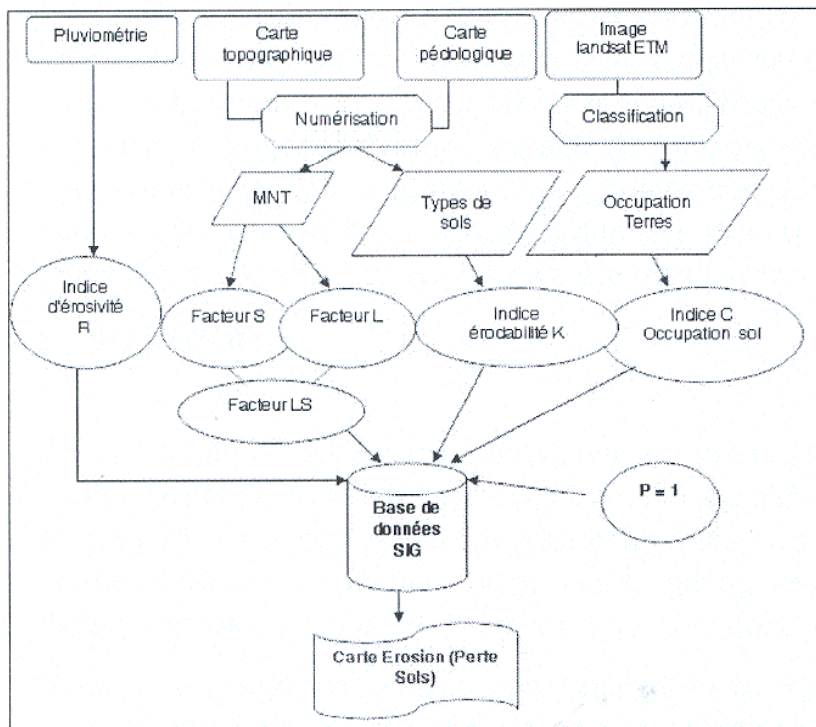


Figure 1. Cadre conceptuel de la méthodologie pour l'élaboration de la carte d'érosion selon le modèle USLE.

Détermination et spatialisation des paramètres de l'USLE

La numérisation des cartes de base (cartes topologique et pédologique) a été réalisée avec le logiciel MAPINFO tandis que les analyses spatiales ont été réalisées sous Arc View 3.2

Les traitements de l'image satellitale à l'aide du logiciel Envi 4.0, ont consisté en des corrections géométriques à partir de la couche hydrographique de la BNDT (Base Nationale de Données sur le Territoire) suivies d'une classification dirigée en utilisant les données observées sur le terrain (occupation des terres géoréférencées par GPS). La classification dirigée, basée sur la connaissance de la zone d'entraînement, a été réalisée par la méthode du maximum de vraisemblance pour déterminer les classes d'occupation des terres. La méthode de maximum de vraisemblance suit la règle de Bayes et se base ainsi sur les lois probabilistes pour, d'une part, effectuer une segmentation du spectre suivant des règles de décision où les risques d'erreur sont minimisés par calcul de probabilités et d'autre part pour classer ainsi les images en fonction de la nature de l'occupation du sol (BONN et ROCHON, 1993). En d'autres termes, il s'agit d'opérations sur les valeurs spectrales permettant de faire correspondre des groupements de valeurs radiométriques dans les différents canaux à une thématique donnée, le but étant de rassembler, en classes, les points qui sont censés représenter les mêmes objets.

Les données climatiques ont été organisées en base de données géoréférencées. L'appréciation des pratiques culturales s'est basée sur l'analyse des résultats d'enquêtes terrain suivant un questionnaire semi structuré.

Indice relatif à l'occupation du sol (C)

L'indice relatif à l'occupation des sols correspond au facteur « couvert végétal et pratiques agricoles » qui tient compte du fait que les pluies agissent plus sur un sol nu que sur un sol couvert. Il caractérise la culture et le niveau de fertilisation du sol et représente le rapport des pertes de sol d'une terre cultivée dans des conditions bien définies, aux pertes en terre d'une jachère continuellement travaillée, toutes les autres conditions étant égales. Il a été déterminé en s'appuyant sur les travaux de ROOSE (1980) en zone soudanienne (Adiopodoumé en Côte d'Ivoire) en fonction de l'influence du couvert végétal sur l'érosion.

L'indice C a été ensuite affecté à chacune des classes d'occupation des terres issues des traitements de l'image Landsat TM, par la création d'une carte d'attributs où les noms de classe de chaque pixel dans la carte initiale sont remplacés par la valeur correspondante de la colonne du tableau d'attribut. En d'autres termes, le numéro de classe est directement récupéré dans un champ grid-code de la table de conversion. Chaque ensemble de pixels de même classe détermine alors un polygone.

Indice relatif au phénomène climatique (R)

Le pouvoir érosif dépend surtout de l'intensité de la pluie. En effet, plus la pluie est intense, plus elle endommage le sol et entraîne sa perte. L'indice d'agressivité des pluies a été calculé en fonction de la pluviosité annuelle selon la formule de GUILLOBEZ (1995) :

$$R = 0,63 P - 57,58$$

où R = Indice d'érosivité des pluies et P = Pluviométrie annuelle moyenne (mm)

Indice relatif à la structure et à la composition du sol (K)

Les sols ne présentent pas la même résistance à l'érosion ; cette résistance varie avec les propriétés chimiques et physiques des types de sols. La résistance à l'érosion est aussi liée à la protection du sol par la végétation, suivant qu'il est travaillé ou laissé en repos, ou suivant les traitements qu'on lui fait subir. Elle est fonction de la teneur en matières organiques, de la texture, de la perméabilité et de la structure du sol (ROOSE *et al.*, 1983).

Les indices d'érodibilité ont été estimés en se basant également sur les résultats des travaux de ROOSE (1980) au nord de la Côte d'Ivoire. A chaque type de sol correspond une valeur de K dont la spatialisation est faite par croisement de la table d'attribut avec la carte des sols. Le format vectoriel a été ensuite transformé en format matriciel à la même résolution que l'image Landsat (30 m) pour permettre les traitements ultérieurs.

Facteur topographique (LS)

Le facteur LS de USLE est le résultat de la combinaison de la longueur de pente et de son degré d'importance. La pente a une incidence importante sur le processus de l'érosion hydrique. En effet, le ruissellement fort et rapide des eaux de pluie sur les pentes raides cause plus de dégâts (forte érosion hydrique). Le facteur LS est calculé selon la relation de WISCHMEIER et SMITH (1978) :

$$LS = (\lambda/22,15)^m (65,41 \sin^2\alpha + 4,56\sin\alpha + 0,065)$$

où,

LS = facteur topographique

λ = longueur de la pente en (m) ;

α = l'angle de pente (%),

m = exposant variant avec la pente tel que :

pour $\alpha \geq 5 \%$, m = 0,5 ;

3,5 % $\leq \alpha < 5 \%$, m = 0,4 ;

1 % $\leq \alpha < 3,5 \%$, m = 0,3 ;

et pour $\alpha < 1\%$, m = 0,2.

La pente S est déterminée par génération d'un modèle numérique de terrain (MNT) à partir des courbes de niveau issues de la numérisation de la carte topographique. Le MNT est une représentation numérique et simplifiée du relief qui est reproduit par le codage des altitudes en chaque point d'une matrice.

La couche des longueurs de pentes (L) a été générée par application du programme en langage Avenue®, développé par F. SCHMIDT et A. PERSON (2002) dans le cadre du projet Agriculture de précision en 2002 (www.preagro.de).

Indice relatif aux activités humaines (P)

L'occupation très récente et très rapide du terroir laisse entrevoir une dynamique dans les activités agropastorales à Torokoro. Mais malheureusement, les méthodes de lutte contre les dégradations des terres telles que l'érosion sont quasi inexistantes. Bien que les paysans constatent eux-mêmes l'appauvrissement des terres de plus en plus prononcé, aucune action n'est amorcée pour limiter cette dégradation. Nous avons donc considéré que l'indice P est constant et égal à 1. Le tableau I décrit les méthodes de détermination des différents paramètres.

Tableau I. Méthodes utilisées pour déterminer les paramètres de l'USLE.

Sources de données	Méthodes	Information obtenue	Paramètre de l'USLE déterminé
Carte topographique	Numérisation des courbes de niveau	MNT	LS
	Wischmeier et Smith (1978)	Longueur des pentes	
Carte pédologique	Numérisation Roose, 1980	Types de sols	K
Image satellitale	Corrections géométriques à l'aide des données vectorielles de référence de la BNDT et points GPS terrain	Classes d'occupation des terres	C
	composition colorée 5/4/3 moyen infrarouge/ proche infrarouge/ rouge classification dirigée par maximum de vraisemblance		
Données climatiques	Base de données pluviométriques	Intensité de pluie Hauteur de pluie	R
Terrain	Modèle de Guillobez (1995) Enquêtes	Nbre de jours de pluie Pratiques de conservation des sols	P

Intégration des données spatiales et validation des résultats

L'intégration des données est réalisée selon le modèle USLE. Les différents indices étant contenus dans la base de données relationnelle de même échelle, l'application du modèle est exécutée à l'aide du logiciel Arc View, par croisement pour obtenir les quantités des pertes en terres. Une classification des valeurs obtenues est ensuite exécutée pour obtenir la carte finale des classes de perte en terres.

Le choix de la méthode de validation des résultats dépend du but de la modélisation (JORGENSEN, 1992). Elle consiste à tester les résultats avec des données indépendantes.

Au niveau de la classification de l'image satellitale, une validation statistique a été réalisée selon le niveau de précision totale par l'estimateur Kappa (CONGALTON, 1991) qui varie de 0 à 1. Le coefficient Kappa (K) traduit la réduction proportionnelle en termes d'erreur réalisée par l'algorithme de classification comparativement à l'erreur qu'aurait engendrée une méthode de classification totalement aléatoire. Il permet d'accepter ou non les résultats de la classification en fonction des erreurs en lignes et en colonnes et dans chaque classe selon le niveau de précision pour l'utilisateur et pour le réalisateur. La précision pour l'utilisateur est le pourcentage d'individus d'un groupe issu de la classification, correctement classés vis-à-vis de la référence de terrain. La précision pour le réalisateur est le pourcentage d'individus d'un groupe de référence correctement classés par la classification de l'image de télédétection.

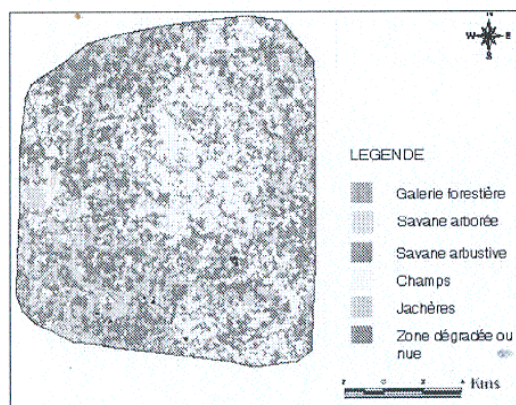
Pour ce qui concerne les quantités de terres érodées, la validation des résultats s'est appuyée essentiellement sur une analyse comparée des résultats d'études similaires réalisées au Burkina Faso. La démarche étant méthodologique, nous ne disposons pas de données mesurées *in situ*. Une validation qualitative a été également réalisée en fonction du niveau d'érodibilité des types sols de la zone d'étude.

Résultats

L'occupation des terres à Torokoro et le facteur C

Six unités différentes d'occupation des terres ont été déterminées en concordance avec la description de l'INERA (2002) à l'issue du traitement de l'image Landsat ETM basée sur les observations *in situ* (carte 2).

Carte 2. Carte d'occupation des terres de Torokoro.



1. Les champs sont des parcs agro forestiers dont la strate arborée est dominée par *Vitellaria paradoxa*, *Parkia biglobosa* et *Tamarindus indica* autour des habitations et par *Diospyros mespiliformis*, *Bombax costatum* et *Parinari curatelifolia* dans les champs de brousse. On note également des arbres fruitiers : *Psidium guajava*, *Manguijera indica* et quelques vergers d'agrumes (*Citrus sinensis*). La strate herbacée est dominée par *Lonchocarpus cyanescens*. et *Hyparhenia* sp. Du point de vue spatial, cette classe est la plus importante : 42,5 % de la superficie de la zone d'étude ;
2. La savane arbustive se compose de ligneux tels que *Vitellaria paradoxa*, *Detarium microcarpum*, *Daniellia oliveri*, *Parinari curatelifolia*, *Maranthes polyandra* et *Combretum crotonoides*. La strate herbacée est dominée par les graminées telles que *Andropogon ascinodis*, *A. gayanus*, *Diheteropogon agerupii*. Elle occupe environ 31,58 % de la zone d'étude ;
3. La savane arborée à *Isobertinia doka*, *I. dalzielii*, *Terminalia glaucescens*, *Terminalia laxiflora*, *Monotes kerstingii*, *Vitellaria paradoxa*, *Pterocarpus erinaceus* et *Daniellia oliveri* est observée sur 10,25% de la zone ;
4. Les galeries forestières et formations ripicoles qui sont formées d'essences hydrophiles telles que *Mitragyna inermis*, *Nauclea latifolia*, *Anogeissus leiocarpus* et *Vetiveria nigriflora* représentent environ de 5 % de la zone d'étude ;
5. Les jachères dispersées dans l'espace cultivable se caractérisent par une strate supérieure composée essentiellement de *Parkia biglobosa* et *Vitellaria paradoxa* et d'une strate moyenne à *Parinari curatelifolia*, *Diospyros mespiliformis*, *Terminalia* spp., *Daniellia oliveri* et *Piliostigma reticulatum*. Elles représentent environ 8 % de la zone d'étude ;
6. Les zones nues occupent à peine 2 % du terroir ;

L'exactitude de classification est de 95,3 % avec un taux très significatif de coefficient Kappa de 0,93. Le tableau II montre la matrice de confusion de la classification.

Tableau II. Matrice de confusion des unités d'occupation des terres de Torokoro.

Réalité terrain (en pourcentage)					
Classe	champs	savane arbustive	forêt galerie	savane arborée	zone dégradée
Non classifiée	0	0	0	0	0
Champs	94.99	4.97	0	0	0
Savane arbustive	4.57	90.46	2.43	0	0
Forêt galerie	0.06	4.57	97.3	0.2	0
Savane arborée	0.32	0	0.27	97.82	0.39
Zone dégradée	0.06	0	0	1.98	99.61
Jachère	0	0	0	0	0
Total	100	100	100	100	100

Les valeurs de l'indice relatif à l'occupation du sol (C) déterminées par extrapolation des résultats des travaux de ROOSE (1977) sur différents couverts végétaux en Afrique de l'Ouest, sont présentées dans le tableau III. Elles varient de 0.001 à 1.

Tableau III. Occupation des terres à Torokoro et C annuel moyen correspondant

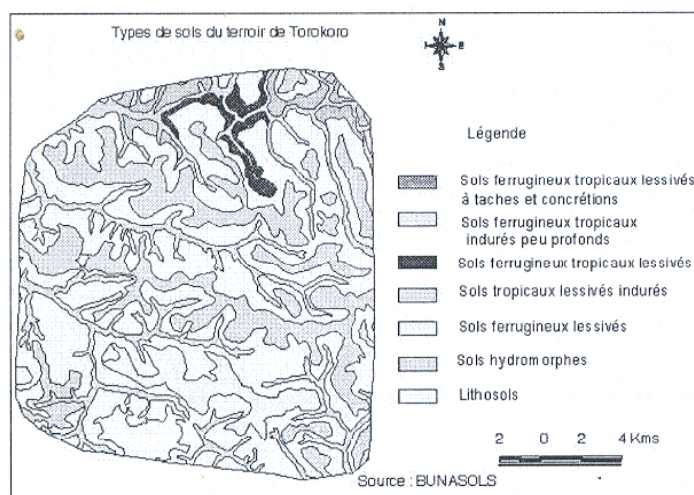
Unité d'occupation des terres	Importance spatiale en %	C annuel moyen
Champs	42.50	0,4
savane arbustive	31.58	0,01
savane arborée	10.25	0,01
Galerie forestière	5.54	0,001
jachères	8.12	0,01
Sol nu ou zone dégradée	2.00	1

La pluviométrie et le facteur climatique R

Le calcul du facteur d'érosivité pluviométrique selon un mode distribué suppose une bonne couverture du site d'étude en données climatiques. Torokoro ne dispose pas de poste pluviométrique. Les données du seul poste pluviométrique le plus proche du site d'étude (Mangodara à 15 km) ont été considérées. L'indice relatif au phénomène climatique R est alors estimé constant soit 635,42 pour une pluviométrie annuelle de 1100 mm.

Les sols de Torokoro, le facteur pente et l'indice K

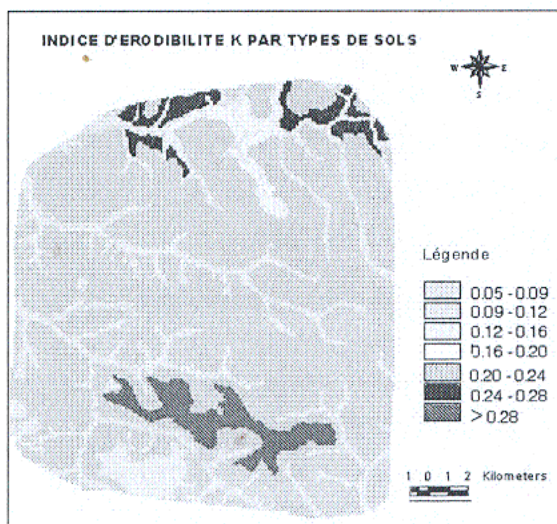
La carte 3 représente les types de sols de Torokoro. Les valeurs de l'indice relatives à la structure et à la composition du sol (K) sont indiquées dans le tableau IV. Plus de 75 % des sols présentent un indice K moyen et correspondent aux sols ferrugineux tropicaux indurés. Pour 17 % des sols, K est faible à très faible. Seulement 8 % des sols ont un indice K élevé supérieur à 0.25. Les résultats de la spatialisation de l'indice K sont représentés en 7 classes par la carte 4.



Carte 3. Carte des sols.

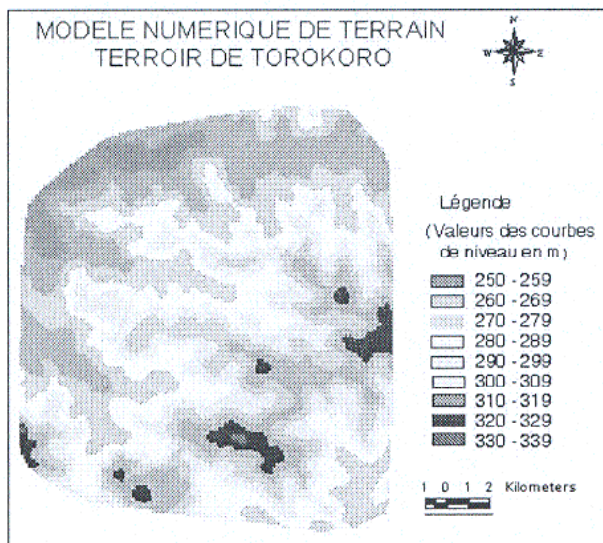
Tableau IV. Indice K par types de sols (adapté de ROOSE (1980)).

Types de sols	Superficie occupée en %	Indice K	Qualité de K
Sols ferrugineux tropicaux lessivés à taches et concrétions	3.05	0.25	Forte
Sols ferrugineux tropicaux indurés peu profonds	51.85	0.20	moyenne
Sols ferrugineux tropicaux lessivés indurés	1.98	0.20	moyenne
Sols tropicaux lessivés indurés	21.37	0.15	moyenne
Sols ferrugineux lessivés	4.52	0.31	Forte
Sols hydromorphes peu humifères à pseudogley de surface	14.16	0.05	très faible
Lithosols	3.07	0.10	faible



Carte 4. Carte des indices d'érodibilité.

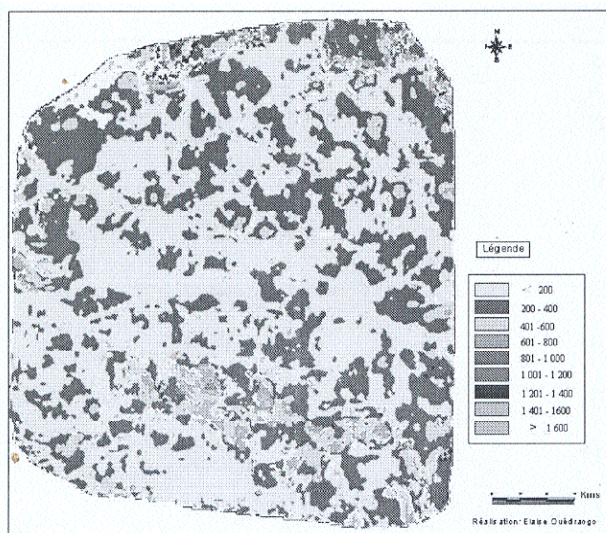
La carte 5 montre le Modèle Numérique de Terrain (MNT) construit à partir de la carte topographique de la zone d'étude. Les pentes dérivées de ce MNT sont en majorité faibles, avec des longueurs moyennes de 15 à 50 m.



Carte 5. Modèle Numérique de Terrain (MNT) de Torokoro.

Les pertes en terre à Torokoro

Le résultat de l'application spatialisée du modèle de Wischmeier (équation USLE) montre neuf classes de perte de sols (carte 5). Les deux premières classes sont les classes les moins exposées à l'érosion. Par contre, les classes 6, 7, 8 et 9 connaissent les plus fortes pertes en terre dues à l'érosion hydrique. Les zones présentant des pertes en terre inférieures à $0,600 \text{ t.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$, sont d'environ 83 % tandis que les pertes en terre de 1 à $2 \text{ t.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$, s'observent sur seulement 10 % de la zone d'étude (tableau V). Les zones à pertes en terre importantes correspondent aux sols dont la structure et la composition induisent un indice K élevé (sols ferrugineux tropicaux lessivés à taches et concrétions).



Carte 6. Classes de pertes en terre à Torokoro en $\text{Kg.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$

Tableau V. Classification des niveaux de perte de sols de Torokoro.

Classe	Perte (t.ha ⁻¹ .an ⁻¹)	Proportion de superficie concernée (%)
1	< 0.20	37
2	0.20 - 0.40	29.32
3	0.40 -0.60	17
4	0.60 - 0.80	6
5	0.80 - 1	4.60
6	1 - 1.20	3
7	1.20 -1.40	2
8	1.40 -1.60	1
9	>1.60	0.08
Total		100

Discussion

Bien que la méthode d'évaluation des paramètres des pertes en terre soit empirique, les résultats obtenus montrent qu'il est possible d'utiliser les données spatiales dans un cadre géoréférencé suivant un modèle de référence, en l'occurrence, l'équation universelle des pertes en terre (USLE), pour la zone soudanienne du Burkina Faso.

En effet, les résultats sont en concordance avec les bases théoriques qui sous tendent le choix des facteurs influençant les quantités de terre perdues par érosion hydrique. Comme l'ont montré WARREN *et al.*, (2001), il s'agit, notamment, des caractéristiques morphopédologiques du milieu (faiblesse des pentes, tortuosité des axes d'écoulement, platitude des zones endoréiques, distribution des matériaux à l'intérieur du bassin) et de l'échelle de l'étude (taille du bassin ou de la zone d'étude). La vulnérabilité des surfaces à l'érosion s'explique en grande partie par leur position sur le versant et par l'organisation du réseau de drainage qui collecte les eaux de l'amont vers l'aval du versant. Le risque est d'autant plus fort que l'on s'éloigne de la ligne de crête et que l'on descend sur le versant. Les zones à forte perte en terre se caractérisent également par une faible couverture végétale (savane arbustive).

L'influence du type de sol est également observée. Les zones à forte érosion sont situées essentiellement dans les sols ferrugineux lessivés et des lithosols avec des indices d'érodibilité supérieurs à 0,25. En effet, plus l'indice d'érodibilité est élevé plus le sol est facilement érodable.

Cependant, trois questions majeures restent posées à l'issue de cette recherche. Elles sont liées principalement au problème d'exactitude des résultats :

1 - Comment disposer de données *in situ* sur les paramètres de l'USLE ? Dans un cadre d'étude à référence spatiale, chaque pixel correspond à une parcelle de mesure et devrait être caractérisé de manière spécifique pour prendre en compte le caractère spatial du phénomène d'érosion. L'intégration de données dans le modèle doit se baser sur des données observées *in situ* pour assurer une bonne qualité des résultats (VICTOR *et al.*, 2003). Par exemple, le facteur K est fonction des matières organiques et de la texture des sols, de la perméabilité et de la structure du

profil. Il dépend ainsi fortement des méthodes de culture et du degré d'encroûtement de la surface du sol et est très difficile à mesurer (LAL, 1988) parce qu'il varie spatialement même à l'intérieur du même type de sol (ROOSE et SARRAIH, 1990). Ainsi, des dispositifs expérimentaux sur le terrain sont nécessaires pour mesurer certains des paramètres, mais également le choix des paramètres à expérimenter peut constituer un autre problème dû aux coûts, à la complexité et à la durée des expérimentations.

2 - Comment évaluer la pertinence et la validité des méthodes de spatialisation et assurer une bonne représentativité des paramètres intrants du modèle ? La spatialisation des données constitue une étape importante dans le processus de modélisation spatiale du phénomène d'érosion des terres. Par exemple, pour la construction du MNT qui permet de garantir une bonne fiabilité géométrique, le pas du MNT (précision planimétrique du MNT en X, Y), est un élément important à considérer pour assurer la fiabilité requise suivant l'échelle de l'étude. Dans notre cas, le pas était de 20 m correspondant à l'échelle de numérisation des courbes de niveau sous forme de points cotés en X, Y, Z à partir de la carte topographique au 1/50 000. Étant donné le relief relativement plat et la superficie de la zone d'étude, une échelle plus fine pourrait être recommandée pour assurer une meilleure représentation de la pente à travers le facteur LS ; la pente du terrain conditionnant la concentration et l'accélération de l'eau, donc son agressivité érosive et sa propension au transport des matières en suspension.

De même, les données d'un seul poste pluviométrique, situé à 15 km du site d'étude, ont été utilisées pour le calcul du facteur R. En d'autres termes, la variabilité spatiale du facteur climatique n'a pas pu être prise en compte, limitant ainsi son influence sur les résultats. L'utilisation de plusieurs données relatives à ce paramètre permettrait une bien meilleure représentation de sa variabilité spatiale en intégrant notamment les effets des distributions temporelles interannuelle et saisonnière (indice de précipitation et indice de distribution) sur le milieu (BÉNIÉ *et al.*, 2005). Pour ce qui est des données satellitaires, la définition des classes d'occupation des terres s'appuie sur des algorithmes de classification bien éprouvés. Les méthodes de validation utilisées sont pertinentes et nous avons pu montrer des niveaux de précision acceptables.

3 - Comment valider les résultats des pertes en terre ? Comme l'ont souligné RANIA *et al.* (2001), on pourrait penser à tester chacune des classes retenues par des expérimentations en se basant sur des observations *in situ*. Mais nous sommes dans un cas d'essai méthodologique et l'expérimentation sur le terrain demande beaucoup de moyens financiers dont nous ne disposons pas. Nous avons choisi de faire une analyse comparée des résultats d'études similaires réalisées au Burkina Faso. On observe que les quantités de terres érodées sont plus ou moins similaires à celles obtenues dans notre site d'étude. Pour Torokoro et pour ces sites d'étude, les propriétés morphologiques du milieu, ainsi que l'échelle de l'étude sont en effet similaires : faible pente, petite échelle, état de surface faiblement dégradé. A Bidi au nord du Burkina Faso sur un petit bassin versant sahélien de faible pente caractérisé par une mosaïque d'unités paysagères (végétation dense, sols en cultures et en jachère), LAMACHÈRE (2000) a évalué des pertes en terre dues à l'érosion variant entre seulement 0,21 à 0,66 t.ha⁻¹. PIOT et MILLOGO (1980) ont montré que pour une parcelle de 0,28 ha, mise en défens, les pertes en terre étaient seulement de 0,2 t.ha⁻¹ comparables aux résultats observés sur notre site de recherche. Ainsi, pour de petites surfaces à faible pente de zones peu dégradées, les niveaux d'érodibilité des sols restent relativement faibles.

Conclusion

Le recours à la géomatique, notamment les outils télédétection et SIG, est nécessaire pour l'évaluation des pertes en terre car la spatialisation des paramètres permet d'élargir les zones d'intérêt qui peuvent dépasser le champ expérimental et considérer des terroirs, régions ou bassins versants tout entiers. L'utilisation de la télédétection a permis de déterminer certains paramètres du modèle USLE notamment l'occupation des terres par classification en unités de paysage pour constituer la base de données spatiale pour la spatialisation du phénomène de l'érosion hydrique. Cette étude a permis ainsi de montrer l'importance de la modélisation spatiale pour des situations de non disponibilité de données quantitatives couvrant les zones d'intérêt.

Les quantités de terre érodées restent relativement faibles pour la grande majorité du terroir (moins de $500 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$). Pour répondre efficacement aux questions discutées plus haut et assurer une bonne évaluation du phénomène en général et au Burkina Faso en particulier, il est indispensable de constituer des bases de données spatiales fiables notamment pour la zone soudanienne. La crédibilité de toute approche de modélisation en dépend. Pour ce faire, des dispositifs expérimentaux permettant de recueillir les données sur les paramètres de l'érosion devront être envisagés afin d'alimenter les bases de données. D'autres modèles pourraient alors être testés ou développés afin d'améliorer les niveaux d'exactitude des résultats car l'intérêt de l'étude de l'érosion des sols n'est plus à démontrer. Le renforcement des moyens d'analyse et de compréhension du phénomène permettrait de mieux combattre la dégradation des sols qui s'impose comme un des plus grands défis à relever dans le contexte des changements climatiques qui conduisent les populations à défricher de plus en plus de terres marginales augmentant ainsi leur sensibilité à l'érosion qui reste une menace pour la productivité du milieu agropastoral et nuit à la qualité de l'air et de l'eau (LEE *et al.*, 1999).

Suite à la présente recherche, les recommandations d'actions et de recherche ci-après sont formulées :

- au niveau des sols, une cartographie plus fine (1:25000) est nécessaire afin de mieux les caractériser au niveau terroir ou bassin versant pour l'évaluation du facteur sol et d'en évaluer les comportements en fonction des utilisations ;
- un suivi dans le long terme des pratiques culturales permettrait de disposer d'une base de données consistante pour mieux apprécier les facteurs C et P. L'apport de la télédétection par l'utilisation de données de haute résolution spatiale permettrait une meilleure identification des classes d'occupation des terres ;
- au niveau climat, un réseau de pluviomètres bien répartis spatialement permettrait la collecte de séries de données pour une meilleure quantification du facteur climatique.

Enfin, une validation des résultats par classe de perte en terre avec des données terrain est nécessaire pour augmenter la crédibilité des résultats car le but de la validation est de montrer que le modèle est acceptable pour l'utilisation envisagée et qu'il répond aux performances requises spécifiées (RYKIEL, 1996).

Références citées

- BARRO S. et BOTONI H., 2003.** *Etude des sols sous formation végétale à Isoberlinia et Deutarium dans le terroir de Torokoro.* INERA, Rapport provisoire de recherche, 22 p.
- BÉNIÉ G.B., KABORÉ S.S., GOITA K., COUREL M.F., 2005.** Remote Sensing-Based Spatio -Temporal Modeling to Predict Biomass in Sahelian Grazing Ecosystem, *Ecological Modelling* 184, 341-354.
- BONN F. et ROCHON G., 1993.** *Précis de Télédétection : Principes et Méthodes*, Volume 1, Presse de l'Université du Québec - AUPELF, Québec, Canada, 485 p.
- BOTONI H., 2003.** *Dynamique des paysages et évolution des pratiques pastorales dans les fronts pionniers du Sud-Ouest du Burkina Faso.* Thèse de Doctorat, Université Paul Valéry, Montpellier III, Montpellier, France, 295 p.
- BUNASOLS, 2000.** Carte morphopédologique de la Comoé et de la Léraba. Echelle 1/50 000.
- CONGALTON R.G., 1991.** A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37, 35-46.
- DIALLO M., DE LA ROCQUE S. et CESAR J., 1998.** *Evolution des formations ligneuses riveraines dans la zone agropastorale de Sidéradouou et recherche des causes anthropiques*, Rapport de recherche, Bobo Dioulasso, CIRDES-CIRAD, 41. p.
- DURÁN ZUAZO, V.H. and C.R. RODRÍGUEZ PLEGUEZUELO, 2008.** Soil-erosion and runoff prevention by plant covers. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 28, 65-86 www.agronomy-journal.org.
- FAO, 1990.** *Directives pour la description des sols, 3^e édition, Division de la mise en valeur des terres et des eaux - SRIC - Centre International de Référence et d'Information Pédologique*, Rome, Italie, 108 p.
- GUILLOBEZ S., 1995.** *Etude des principaux paramètres climatiques influençant le ruissellement et l'érosion des sols au Burkina Faso*, CIRAD-INERA, Ouagadougou, Burkina Faso. 14 p.
- GUINKO S., 1983.** *Végétation de Haute Volta*, Thèse de Doctorat d'Etat, Sciences Naturelles, Bordeaux III, Bordeaux, France, 318 p.
- HÉDIA C., 1993.** *Intégration d'un modèle hydrologique conçu pour la télédétection et d'un modèle de perte de sol dans un Système d'Informations Géographiques.* Mémoire de Maîtrise, Département Géographie et Télédétection, Université de Sherbrooke, Canada, 76 p.
- INERA, 1999.** *Suivi de la dynamique des ressources dans les zones de fronts pionniers de migration du Sud-Ouest du Burkina Faso*, Rapport de recherche, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, 55 p.
- INERA, 2002.** *Approche participative pour l'évaluation des ressources ligneuses dans le terroir de Torokoro*, Rapport de recherche, INERA, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, 56 p.
- LAL R., 1988.** Soil erosion by wind and water: Problems and prospects. In: R. Lal, ed. Ankeny, Iowa *Soil erosion research methods*. Soil and Water Conservation Society, 1-6.
- LAMACHÈRE J.M., 2000.** *Variabilité spatio-temporelle des états de surface en zone sahélienne et soudanienne (Burkina Faso) : Effets sur le ruissellement et sa modélisation.* Actes des journées hydrologiques de l'ORSTOM, 10 -16 novembre, 2000, Montpellier France, p.112-126.
- LEE J.J., PHILLIPS D.L. et BENSON V.W., 1999.** Soil erosion and climate change: assessing potential impacts and adaptation practices, *Journal of Soil and Water Conservation*, 54, (3), 529-536.
- MORGAN R.P.C., MORGAN D.D.V., FINNEY H.J., 1984.** A predictive model for the assessment of soil erosion risk. *Journal of Agricultural Engineering Research* 30, 245-253.
- MORGAN R.C.P., 1985.** Establishment of plant cover parameters for modelling splash detachment. In: *Soil Erosion and Conservation*, ed. S.A. Elswaitfy, C. Moldenhauer and A. Lo., Soc. of Am. of Soil Conservation, p. 377-383.
- NAHAL I., 1975.** *Principes de conservation du sol.* In : Masson et Cie, 140 p.

- OLDEMAN L.Y., HAKKELING R.T.A. and SOMBROEK W.G., 1991.** *World Map of The Status of human-induced soil degradation, An Explanatory note. Global assessment of soil degradation, GLASOD*, Wageninge : International Soil Reference and Information Centre, Programme des Nations Unies pour l'Environnement, Nairobi, Kenya, 34 p.
- PARÉ A., 2003.** *Place de l'anacardier dans la diversification des productions dans la zone du Sud-Ouest du Burkina : Cas du terroir de Torokoro.* Rapport de stage pour le cycle d'ATAS. 50 p.
- PIOT J., MILLOGO E., 1980.** *Rapport de synthèse de six années d'étude du ruissellement et de l'érosion à Linoghin.* CIRAD-CTFT, Nogent sur Marne , 47p.
- RANIA B., MICHEL-CLAUDE G., AMIN S., MOHAMAD K., GHALEB F. et TALAL D. 2001.** Apport de la télédétection pour la modélisation de l'érosion hydrique des sols dans la région côtière du Liban. *Télédétection*, 2(2), 79-90.
- ROOSE E, LELONG F. et COLOMBANI J., 1983.** Influence du bioclimat et de l'aménagement des sols sur les éléments du bilan hydrique en Afrique occidentale. *J. Sciences Hydrologiques*, 28 (2), 283-309.
- ROOSE E., 1980.** *Dynamique actuelle des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale. Etude expérimentale des transferts hydrologiques et biologiques de matières sous végétation naturelles ou cultivées.* Thèse Univ. Orléans, 587 p.
- ROOSE E., SARRAILH J.-M., 1990.** Erodibilité de quelques sols tropicaux : vingt années de mesure en parcelles d'érosion sous pluies naturelles. *ORSTOM Pédol.* 25(1),7-30.
- ROOSE E.J., 1977a.** *Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest : vingt années des mesures en petites parcelles expérimentales*, Travaux et Documents, 78. Office de la Recherche scientifique et technique de l'Outre Mer (ORSTOM), Paris, 108 p.
- ROOSE E.J., 1977b.** Application of the universal soil loss equation of Wischmeier and Smith in West Africa. In : Greenland, D.J., Lal, R. (Eds.) *Soil Conservation and Management in the Humid Tropics*. Wiley, Chichester, 117-187.
- RYKIEL E. J., 1996.** Testing ecological models: the meaning of validation. *Ecological Modelling*, 90(3), 229-244
- STEHLIK O., 1970.** Geographical zones of soil erosion in Czechoslovakia. *Studia geographica*, 13, 1-40.
- SVORIN J., 2003.** A test of three soil erosion models incorporated into a geographical information system. *Hydrol. Process.* 17, 967-977. Published online in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com).
- VAN ROMPAEY A. J.J. and G.GOVERS G., 2002.** Data quality and model complexity for regional scale soil erosion prediction. *International Journal of Geographical Information Science* (GIS) 16(7), 663-680 .
- VICTOR J., GOVERS G. and HESSEL R., 2003.** Erosion models: quality of spatial predictions. *Hydrol. Process.* 17, 887-900 Published online in Wiley InterScience, ww.interscience.wiley.com.
- WARREN A., BATTERBURY S. and OSBAHR H., 2001.** Soil Erosion in the West African Sahel : a review and an application of a local political ecology approach in South West Niger, *Global Environmental Change*, 11, 79-95.
- WISCHMEIER W. H. and SMITH D. D., 1978.** Predicting rainfall erosion. A guide to conservation planning. USDA-ARS, *Agriculture Handbook*, 537, 58 p.