

# Cartographie des dynamiques d'ablation et de dépôt des particules des sols du bassin versant de Bélékoni en zone soudaniennes du Mali

Aboubakar BENGALY<sup>1</sup>; Yacouba DIALLO<sup>1\*</sup>; Bocar AHAMADOU<sup>1</sup>; Drissa DIALLO<sup>1</sup>; Philippe BONTE<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut Polytechnique Rural de Formation et de Recherche Appliquée (IPR/IFRA) de Katibougou-Mali

<sup>2</sup>Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE) Gif sur Yvette CEDEX – France

\* contact : yacdial2005@hotmail.com      téléphone : (+223) 76509538/66167207

**RESUME** : L'établissement de cartes d'érosion longtempes été négligé en zone soudanienne du Mali au profit de l'analyse fine des processus de ruissellement et d'érosion. Dans cette perspective, la production d'informations spatialisées est nécessaire à l'échelle du terroir villageois, de la région agricole et des bassins versants à différentes échelles. C'est dans ce contexte que l'étude est réalisée à partir du bilan du Césium-137(<sup>137</sup>Cs) avec le modèle proportionnel où la perte en sol est directement proportionnelle à la quantité de <sup>137</sup>Cs au sol. L'objectif de l'étude est de spatialiser les dynamiques d'ablation et de dépôt à l'intérieur du bassin versant. La cartographie a permis de mettre en évidence sept (7) unités à l'intérieur du sous bassin versant. Parmi ces unités quatre (4) sont affectées par différents degrés de sévérités de l'érosion. La sédimentation avec différents degrés est notée sur les trois (3) autres unités. L'étude a montré que le bassin versant est fragile. En effet, seulement 19,5 % de l'espace cartographié constituent une zone stable alors que les surfaces érodées représentent 42,8 %. Cette cartographie montre une forte dynamique d'accumulation des sédiments dans les dépressions le long du réseau hydrographique.

**Mots clés** : Mali, zone soudanienne, Césium-137(<sup>137</sup>Cs), sous bassin versant, spatialisation, bilan d'érosion.

**ABSTRACT**: The establishment of erosion maps has long been neglected in the Sudanian zone of Mali in favor of the fine analysis of the processes of runoff and erosion. In this perspective, the production of spatialized information is necessary at the scale of the village landscape, the agricultural region and at different scales of watersheds. In this context the study is carried out from the caesium-137(<sup>137</sup>Cs) balance with the proportional model where the soil loss is directly proportional to the amount of <sup>137</sup>Cs measured in the soil. The objective of the study is to spatialize the dynamics of ablation and deposition within the watershed. The mapping allowed highlighting 7 units inside the sub-watershed. Among these 4 units are affected by different levels of erosion severity. The sedimentation with different degrees is inventoried on other 3 units. The study showed that the watershed is fragile. In fact, only 19.5% of the mapped space constitutes a stable zone while the eroded areas represent 42.8%. This mapping shows a strong dynamic of sediment accumulation in depressions along the hydrologic system.

**Keywords**: Mali, Sudanian zone, Caesium-137(<sup>137</sup>Cs), sub-watershed, spatialization, balance of erosion.

## I. INTRODUCTION

Les recherches sur l'érosion, au-delà de la compréhension des processus, doivent viser aussi la mise au point d'outils d'aide à la décision à des fins multiples : aménagement des terres agricoles, gestion intégrée des ressources en eau et de l'environnement, etc... Dans cette perspective, la production d'informations spatialisées est nécessaire à l'échelle du terroir villageois, de la région agricole et des cartographie de l'érosion dans le bassin versant de Bélékoni, tout en contribuant à la compréhension du fonctionnement hydrosédimentologique actuel du bassin supérieur du Niger, peut permettre :

- d'identifier avec précision les risques de dégradation des sols dans les différents secteurs du petit bassin versant ;
- de synthétiser des informations pour la vulgarisation agricole en direction des villages du bassin versant ;
- de fournir des informations pertinentes exploitables dans la construction des petits barrages et la gestion des ressources en eau.

## I. GENERALITE SUR LA CARTOGRAPHIE DE L'EROSION

La cartographie de l'érosion peut s'appuyer sur des mesures (érosion sur parcelle, bilan érosion-sédimentation des différents secteurs, etc...) ou des calculs à partir de modèles d'érosion. Elle fait actuellement beaucoup recours aux images satellitaires, aux logiciels des systèmes d'informations géographiques SIG. Dans une situation donnée, les choix seront justifiés par la nature des documents de base disponibles et aussi la nature des données sur l'érosion.

### 2.1 Images satellitaires et SIG dans la cartographie de l'érosion

Pour l'étude des phénomènes d'érosion, les images satellitaires et les systèmes d'informations géographiques thématique.

#### La méthode de classification non supervisée ou automatique :

Elle permet de déterminer automatiquement les classes. Les algorithmes des centres mobiles, (nuées dynamiques appliquées au centre de gravité) et des distances adaptatives sont des méthodes itératives qui, à chaque itération calculent respectivement les centres de gravité ou les distances associées aux classes. Les fonctions discriminantes dépendent, soit des paramètres des densités de probabilité, soit d'un jeu de coefficients qui peuvent être évalués théoriquement par des études physiques. Dans ce cas la classification est alors totalement non supervisée. Elle peut être semi-supervisée quand certains paramètres sont fixés par l'utilisateur en fonction du type d'image et de scène, ou que certains objets sont reconnus par l'utilisateur qui peut ainsi initialiser le processus de recherche des classes pour certaines d'entre d'elles.

#### La méthode de classification dirigée ou supervisée :

Les classes sont définies à partir des besoins de l'utilisateur et correspondent à des unités sémantiques de l'image, ce qui nécessite une étape d'apprentissage préalable à la classification. La classification supervisée consiste à déterminer les classes par un apprentissage qui peut être effectué, soit sur chaque scène traitée, soit pour chaque type d'application ou encore à chaque type de capteur utilisé. Lors de l'utilisation d'une méthode de classification

bassins versants à différentes échelles. La spatialisation ou l'établissement de cartes d'érosion à longtermes été négligée au profit de l'analyse fine des processus de ruissellement et d'érosion [1]. Aujourd'hui, les organismes de développement (et ou les collectivités locales dans le cas précis des pays développés) sont demandeurs de tels instruments d'analyse spatialisée des risques de dégradation, d'érosion et de sédimentation [2]; [3]; [4]. La

(SIG) sont de plus en plus utilisés. Les images satellitaires et SIG forment des outils essentiels dans les systèmes interactifs d'aide à la décision et pour des opérations de gestion du risque[5], [6], [7] [8].

Les méthodes de traitement et d'analyse des images comportent principalement trois étapes : le prétraitement des images, les classifications numériques et la mise en évidence des changements du sol [9].

Les prétraitements d'images sont un ensemble d'opérations ayant pour but d'augmenter la lisibilité des données et de faciliter leur interprétation et une meilleure extraction de l'information. Ces opérations s'appliquent au travers des améliorations radiométriques et des recyclages géographiques effectués. Les images satellitaires sont rehaussées pour améliorer le contraste et faciliter ainsi le choix des points pour le redressement et l'interprétation.

#### Classification numérique et la mise en évidence des sites d'érosion

La classification peut être définie de façon générale comme le processus de reconnaissance des formes. Deux types de classification sont utilisés en cartographie : la classification non supervisée ou automatique et la classification supervisée ou dirigée. Le problème de classification peut être interprété comme un problème de données incomplètes. En fait, en chaque site (pixel) s'expriment des données de deux types différents : la donnée observée et l'autre cachée, la classe que l'on cherche à trouver ; de ce fait, la classification vise à attribuer aux pixels des étiquettes dont l'origine est

supervisée, l'utilisateur identifie des échantillons assez homogènes de l'image qui sont représentatifs des différents types de surfaces (classe d'information). Ces échantillons forment un ensemble de données tests. L'analyste supervise donc la classification d'un ensemble spécifique de classes. Les informations numériques pour chacune des bandes et pour chaque pixel de ces ensembles sont utilisées pour que l'ordinateur puisse définir les classes et ensuite reconnaître des régions aux propriétés similaires à chaque classe. Pour cela, l'ordinateur dispose d'un programme spécial afin de déterminer la signature numérique de chacune des classes. En somme, la classification supervisée commence toujours par l'identification des classes d'information qui sont ensuite utilisées pour définir les classes spectrales qui les représentent.

La spécificité de cette méthode réside au fait qu'au lieu d'affecter un vecteur spectral à la classe dont le centre de gravité est le plus proche, elle se base sur une analyse statistique de la distribution des vecteurs spectraux de l'échantillon pour définir des zones de probabilité équivalente autour de ces centres. La probabilité d'appartenance à chacune des classes est calculée pour chaque vecteur spectral et le vecteur est affecté à la classe pour laquelle la probabilité est la plus élevée.

### 2.2. Utilisation des données issues de mesures d'érosion

Les mesures d'érosion fournissent généralement des données relatives à des parcelles (type Wichmeier), à des sites d'évaluation des bilans érosion-sédimentation (utilisation des radio-isotopes) ou à des portions de territoires. Il s'agit le plus souvent d'extrapoler ces données pour la représentation des processus d'érosion ou de leur intensité ou des risques d'érosion sur des espaces plus vastes tels que des régions agricoles, des bassins versants, etc. Pour ces extrapolations, on a le plus souvent recouru à des hypothèses simplificatrices.

### 2.3. Utilisation des modèles d'érosion

Plusieurs modèles sont utilisés pour estimer l'érosion : USLE (Universal SoilLoss Equation), RUSLE (Revised USLE), MUSLE (Modified USLE), DUSLE (Differentiated USLE), MEH-SAFER (Modèle d'Erosion Hydrique en milieu Semi-Aride de Forte Energie de Relief), CREAMS (Chemical Runoff and Erosion from Agricultural management Systems), EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator), ANSWERS (Areal Non Point Source Watershed Environment Response System), EROSION-ED, EROSION 3, EROSION 3D, PEPP (Prozeßorientiertes Erosions Prognose Programm), KINEROS (Kinematic Erosion Simulation), EUROSEM (European Soil Erosion Model), LISEM (Limburg Soil Erosion Model), MEH-SAFER [10]

Le MEH-SAFER est un modèle d'érosion hydrique pour les milieux semi-arides de forte énergie à partir d'images multi sources et de données auxiliaires. Il repose sur la combinaison des potentiels de ruissellement et de la vulnérabilité topographique.

## II. METHODE APPLIQUEE AU BASSIN VERSANT DE BELEKONI

Le bassin versant est une unité spatiale de fonctionnement hydrogéomorphologique. Son fonctionnement est très complexe et est soumis à de multiples processus d'érosion à des degrés différents dans l'espace, mais orientés par les différents éléments du paysage. Cette complexité est corrélée au problème de relai qui interrompt le transfert direct des particules du sol dans les dépressions.

Dans le bassin versant de Bélékoni, la cartographie de l'érosion a été faite à partir de l'utilisation de la carte d'occupation du sol et des bilans érosion-sédimentation.

### Utilisation de la carte d'occupation du sol

La carte d'occupation du sol établie en 2009 par [11] a été utilisée pour bien orienter le choix des sites d'étude et l'échantillonnage des sols, à l'intérieur du bassin versant en vue de la cartographie de l'érosion.

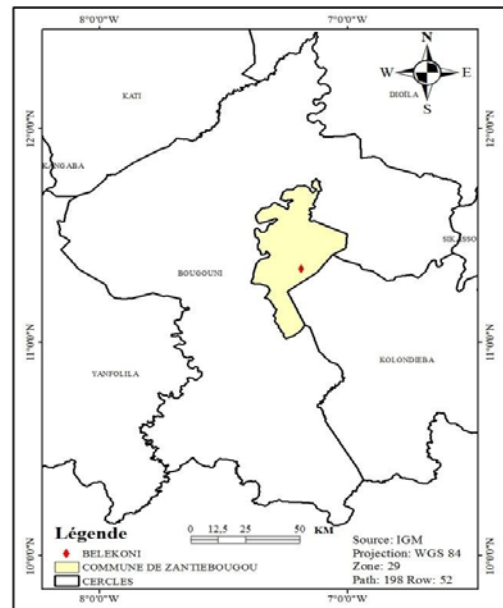


Figure 1 : Carte de localisation du bassin versant de Bélékoni.

### Extrapolation des bilans érosion-sédimentation

Les bilans érosion-sédimentation établis à partir de 80 échantillons de sols repartis entre 24 sites ont été extrapolés à l'ensemble du sous bassin versant. Les échantillons de chaque site permettent d'obtenir des informations plus précises de la distribution du 137Cs. Par la suite, l'utilisation du système d'information géographique (SIG), Arc GIS 9.2 avec l'extension AGWA, permet d'estimer les risques d'érosion.

Cette approche permet d'identifier et de caractériser les relations et les connections entre les différents éléments du paysage (plateau, glacis d'épandage, bas-fond et réseau hydrographique).

Le sous bassin de Bélékonia été réparti en sous ensembles spatiaux fonctionnels. Cette sectorisation s'est fondée essentiellement sur l'occupation actuelle des sols avec la redistribution de 137Cs. De ce fait, nous avons préféré élaborer une classification en degré d'érosion basée sur le croisement des unités morphopédologiques, des courbes de niveaux et la redistribution du 137Cs. Sur les unités morphopédologiques, nous avons associé les bilans correspondants d'érosion.

Unités	Caractéristiques				Superficie (km <sup>2</sup> )	Proportion dans le bassin versant (%)
	gain et/ou perte de <sup>137</sup> Cs dans le sol (%)	Perte et/ou accumulation de terre (t.ha <sup>-1</sup> .an <sup>-1</sup> )	Evolution de l'épaisseur du sol (cm.an <sup>-1</sup> )	Appréciation		
1	< - 80	-7	-0,43	Erosion forte	1,3	10,9
2	-79 à - 46	-5,7	-0,39	Erosion moyenne	2,4	20,5
3	- 45 à -10	-2,8	-0,19	Erosion faible	1,3	11,4
4	- 9 à + 9	-0,2	- 0,02	Erosion trèsfaible	2,3	19,5
5	+ 8 à +50	5,3	+0,31	Accumulation faible	2,1	17,7
6	+50 à + 90	16,4	+1,03	Accumulation moyenne	1,7	14,9
7	> + 90	20,6	+1,38	Accumulation forte	0,6	5,1

Tableau 1: Caractéristiques et proportions des unités cartographiques du sous bassin versant de Bélékoni

### III. RESULTATS

#### 4.1. Carte des risques d'érosion

La cartographie a permis de mettre en évidence 7 unités à l'intérieur du sous bassin versant (figure 5). Parmi ces unités 4 sont affectées par différents degrés de sévérités de l'érosion. La sédimentation avec différents degrés est notée sur les 3 autres unités. L'étude a montré que le bassin versant est fragile. En effet, seulement 19,5 % de l'espace cartographié constituent une zone stable alors que les surfaces érodées représentent 42,8 %. Cette cartographie montre une forte dynamique d'accumulation des sédiments dans les dépressions le long du réseau hydrographique.

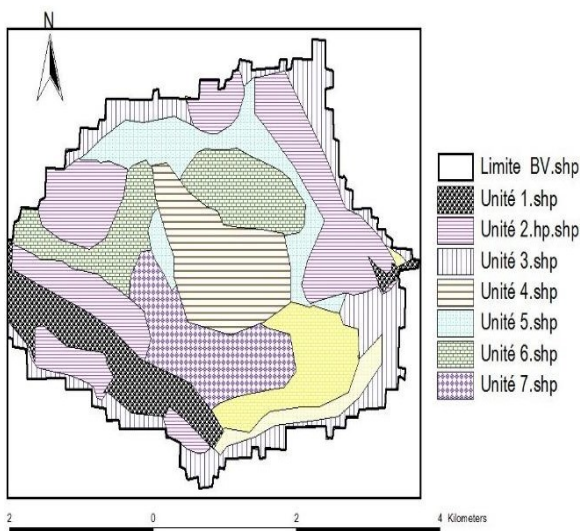


Figure 2 : Carte de risque d'érosion du sous bassin versant de Bélékoni

#### 4.2. Description des unités cartographiques

Le tableau ci-dessous donne les caractéristiques des différentes unités tout en précisant leur proportion dans le sous bassin versant. Les unités cartographiques découlent d'une interaction entre unités morphopédologiques et occupation du sol.

**Unité 1** (érosion forte) : elle s'étend principalement sur la partie amont du glacis d'épandage, au contrebas immédiat des surfaces cuirassées. Cette unité reçoit directement les eaux pluviales ruisselant des cuirasses à perméabilité limitée.

**Unité 2** (érosion moyenne) : elle correspond à la partie amont du glacis d'épandage. Sa résistance à l'érosion, en comparaison avec l'unité précédente s'explique par sa position aval sur le glacis au contact avec la dépression. Dans cette position la pente du glacis est faible et le ruissellement se ralentit.

**Unité 3** (érosion faible) : elle est localisée sur les plateaux cuirassés très faiblement cultivés. Ici, les matériaux pédologiques à forte charge graveleuse ne sont pas sujets à une exportation importante de matières particulaires.

**Unité 4** (érosion très faible) : elle correspond à une vaste surface, appartenant au plateau cuirassé avec une organisation topographique localement plane, mais surtout à la première auréole autour du gros village de Bougoula (plus de 1000 habitants). La gestion actuelle de cet espace est mieux organisée avec apport de matière organique en quantité importante. La combinaison du facteur topographique et de l'usage de la terre semble expliquer la stabilité du milieu par rapport à l'érosion.

**Unités 5, 6 et 7:** ces unités correspondent à des zones d'accumulation de sédiments dont l'ampleur est de plus en plus importante de 5 au 7. Elles correspondent à différents types de biefs du réseau hydrographique. Chaque type de bief a son organisation topographique spécifique peu ou très favorable aux dépôts des particules charriées.

#### IV. CONCLUSION

La cartographie de l'érosion a été conduite ici d'une façon assez rapide à cause du temps disponible, principalement réservé à l'étude du bilan du  $^{137}\text{Cs}$ , mais aussi l'insuffisance des documents de bases (carte topographique détaillée, mauvaise qualité des photographies aériennes disponibles au 1/50000). Cependant la carte établit semble bien traduire les dynamiques de transport et dépôt de particules à l'intérieur du bassin versant.

#### REMERCIEMENT

Cette étude a été réalisée en partie dans le programme de mobilité franco-malienne dans son action d'appui à l'enseignement supérieur et dans le programme CORUS.

Nous tenons à remercier tout le personnel du Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE) à Gif sur Yvette en France pour les analyses, la Direction Nationale de l'Hydraulique du Mali pour le carottier et les populations de Bélékoni pour leur disponibilité et leur soutien.

#### REFERENCES

- [1] De Noni et Viennot, 1996. La cartographie de l'érosion en Equateur : intérêt de l'approche dans un programme de conservation des sols. Bulletin du Réseau Erosion, 16, 310-324
- [2] Gaillard C., Zagolski F., Bonn F. (1998). Modélisation de l'influence anthropique sur les processus d'érosion des sols en milieux agricoles. Bulletin, Réseau Erosion, 431-436.
- [3] Guillobez S., Lompo F., De Noni G. (1998). Le suivi de l'érosion au Burkina Faso. Utilisation d'un modèle cartographique. Bulletin, Réseau Erosion, 450-459.
- [4] Blanchard E., King C., Le Bissonnais Y., Bourguignon A., Souchère V., Desprats J-F., Maurizot P. (1999). Paramétrisation du potentiel de ruissellement des bassins versants au moyen de la télédétection et des systèmes d'information géographique (Application à des bassins versants du Pays de Caux). Etude et gestion du sols, 6,3 , 181-199.
- [5] Wachal, D.J. and Hudak, P.F. (2000) Mapping land slide susceptibility in Travis Country, Texas, USA. GeoJournal, 51, 245-253.
- [6] Shrimalil, S.S., Aggarwal, S.P. and Samra, J.S. (2001).

Prioritizing erosion-prone areas in hills using remote sensing and GIS – a case study of the Sukhna Lake catchment (Northern India). International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 3, 54-60.

[7] Lee, S. (2004) Soil erosion assessment and its verification using the universal soil loss equation and geographic information systems : a case study at Boun Korea. Environmental Geology, 45, 457-465.

[8] Bou K., R., Cerdan, O. et Abdallah, C. (2006) Regional soil erosion risk mapping in Lebanon. Geomorphology, 82, 347-359.

[9] Toborda, G. W., Demaze, M. T., Fotsing, J. M., (2006). L'information spatialisée comme support d'aide à la gestion des aires protégées au Cameroun: application à la Réserve forestière de LafMadjan. Interaction, Nature-Société, analyse et modèles. UMR6554, LETG, la Baule.

[10] Ouattara T, Jean-Marie M.D. et Hugh J.Q. (2002). MEH-SAFER : Un nouveau modèle d'érosion hydrique pour les milieux semi-arides de forte énergie à partir d'images multisurces et de données auxiliaires. Centre d'Applications et de Recherches en Télédétection (CARTEL). Université de Sherbrooke, J1H2R1. Télédétection, 3, 2-3-4, 151-163.

[11] BENGALY Aboubakar, (2009). « Erosion des sols et sédimentation dans le bassin versant de Bélékoni en zone soudanienne du Mali » Thèse doctorat, Institut Supérieur de Formation et de Recherche Appliquée (ISFRA), Université de Bamako 120 p.