

THESE

présentée par

Drissa DIALLO

pour obtenir le titre de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITE JOSEPH FOURIER
GRENOBLE I
SCIENCES, TECHNIQUES ET MEDECINE**

(arrêtés ministériels du 5 juillet 1984 et du 30 mars 1992)

Spécialité : Géographie physique

**EROSION DES SOLS EN ZONE SOUDANIENNE DU MALI
TRANSFERT DES MATERIAUX ERODES DANS LE BASSIN
VERSANT DE DJITIKO (HAUT NIGER)**

Soutenue publiquement le 19/10/2000 devant le jury composé de :

M. CHARDON M. (Professeur émérite, UJF Grenoble I)	Président
M. MOREL A. (Professeur UJF Grenoble I)	Directeur
M. ROOSE E. (Directeur de Recherche, IRD, Montpellier)	Co-directeur
M. RISER J. (Professeur Université d'Avignon)	Rapporteur
M. OLIVRY J.C. (Directeur de Recherche, IRD, Montpellier)	Rapporteur
M. ORANGE D. (Chargé de Recherche, IRD, Bamako)	Examineur

Thèse préparée au sein du Laboratoire Territoire Environnement Organisation (UMR 5038-UJF/CNRS), du Laboratoire d'Etude du Comportement des Sols cultivés (IRD, ex- ORSTOM, Montpellier) et du Laboratoire des Eaux Continentales (IRD, ex- ORSTOM, Bamako)

THESE

présentée par

Drissa DIALLO

pour obtenir le titre de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITE JOSEPH FOURIER
GRENOBLE I
SCIENCES, TECHNIQUES ET MEDECINE**

(arrêtés ministériels du 5 juillet 1984 et du 30 mars 1992)

Spécialité : Géographie physique

**EROSION DES SOLS EN ZONE SOUDANIENNE DU MALI
TRANSFERT DES MATERIAUX ERODES DANS LE BASSIN
VERSANT DE DJITIKO (HAUT NIGER)**

Soutenue publiquement le 19/10/2000 devant le jury composé de :

M. CHARDON M. (Professeur émérite, UJF Grenoble I)	Président
M. MOREL A. (Professeur UJF Grenoble I)	Directeur
M. ROOSE E. (Directeur de Recherche, IRD, Montpellier)	Co-directeur
M. RISER J. (Professeur Université d'Avignon)	Rapporteur
M. OLIVRY J.C. (Directeur de Recherche, IRD, Montpellier)	Rapporteur
M. ORANGE D. (Chargé de Recherche, IRD, Bamako)	Examineur

Thèse préparée au sein du Laboratoire Territoire Environnement Organisation (UMR 5038-UJF/CNRS), du Laboratoire d'Etude du Comportement des Sols cultivés (IRD, ex- ORSTOM, Montpellier) et du Laboratoire des Eaux Continentales (IRD, ex- ORSTOM, Bamako)

Remerciements

Le travail présenté ici est l'aboutissement des efforts consentis par de nombreuses personnes, sous des formes très variées mais complémentaires.

En premier lieu, j'ai bénéficié d'un soutien administratif à l'IPR de Katibougou, alors dirigé par Mamadou Kassa TRAORE et Fafré SAMAKE. Cela m'a permis d'avoir une bourse dans le cadre de la coopération franco-malienne pour compléter, dans les universités françaises, ma formation initiale d'ingénieur et me permettre les recherches présentées dans le présent mémoire. Tout au long des recherches sur le terrain, le professeur Tahirou TRAORE, devenu directeur de l'IPR, a continué de m'assurer le soutien administratif. J'en suis reconnaissant. Ma reconnaissance va également aux coopérants français qui, en poste à Bamako, ont organisé la mise en place de la bourse et son suivi. Il s'agit en particulier de MM Hubert DE MILLY et Laurent BEDU.

La mise à profit de cette bourse a été organisée par MM. Jean Claude OLIVRY, Eric ROOSE et Didier ORANGE dans les centres IRD de Montpellier et de Bamako.

Le sujet de recherche a été proposé par M. OLIVRY, alors représentant au Mali et président de la Commission Scientifique Hydrologie - Pédologie de l'IRD. Sa proposition a témoigné, une fois de plus, son intérêt à la recherche scientifique au service du développement dont il a toujours fait preuve au Mali. Il également a accepté de porter un jugement sur le présent mémoire. Je me souviendrais toujours de lui.

Au centre IRD de Montpellier, l'encadrement des travaux a été confié à M. ROOSE à juste titre. Sa disponibilité est totale pour partager avec les cadres africains, sa grande connaissance des problèmes d'érosion et de développement rural en milieu tropical. Il a veillé, avec rigueur, au bon déroulement scientifique des travaux et à leur adaptation aux besoins de développement des populations locales. Ses missions sur le terrain, à toutes les étapes m'ont permis de bénéficier de sa grande expérience dans l'analyse des problèmes d'érosion et de ruissellement. Au delà de cet encadrement scientifique, il a consenti d'énormes efforts pour que les expérimentations de terrain et de laboratoire se réalisent dans de bonnes conditions matérielles. A la phase de rédaction, il a continué d'être attentif et a fait de nombreuses corrections, malgré ses multiples occupations.

Mon souhait est de pouvoir valoriser la somme de connaissance qu'il a bien voulu me transmettre.

Didier ORANGE est arrivé à Bamako, tout juste avant le démarrage des travaux. Il a accepté d'assurer l'encadrement rapproché malgré son programme chargé et a consacré beaucoup de son temps à ce travail. Ses interventions dans la réflexion scientifique sur les problèmes d'érosion, de transport d'éléments chimiques et de modélisation ont été très utiles. D'autre part, il a consenti d'énormes sacrifices pour la bonne organisation des campagnes et l'acquisition de données de terrain sur un bassin versant d'accès difficile en saison des pluies. Enfin, il a accepté de participer au jury de soutenance.

Je remercie vivement M. Alain MOREL. Il a accepté la direction de cette thèse et m'a accueillie à l'IGA, Université de Grenoble. Il m'a permis de m'inscrire dans une école doctorale où sciences de la nature et sciences de l'homme ne s'excluent pas. Malgré son programme très chargé, il a visité le bassin versant expérimental et consacré du temps à la correction de ce mémoire. Ces encouragements rassurants m'ont permis de ne pas trop prolonger la phase de rédaction.

Je suis très reconnaissant à M. CHARDON et J. RISER qui ont bien voulu accepté de juger ce travail.

Je remercie MM. Rachid NEDJAI et Cyril ZANARDI pour l'aide apporté à la réalisation des cartes à l'IGA.

Je remercie Christophe et Samy à l'IGA qui m'ont toujours facilité l'utilisation du matériel informatique. Cela a été fait avec beaucoup de sympathie.

Je remercie M. Georges DE NONI, responsable du Laboratoire d'Etude du Comportement des Sols Cultivés (LCSC) à Montpellier pour m'avoir accueilli dans le cadre de ce travail.

Je remercie tout le personnel du LCSC, en particulier :

- Jean ASSELINE pour m'avoir initié à la simulation de pluies,

- Bernard BARTHES . Il m'a initié au test de stabilité des agrégats. Il m'a toujours donné l'occasion d'échanges fructueux et m'a fait bénéficier de sa base bibliographique. Sa présence a été rassurant.
- Didier BLAVET, pour ses conseils, ses encouragements et sa disponibilité.
- Régine CHAUME pour ses conseils et son aide pour l'utilisation du matériel informatique.
- Jean Yves LAURENT pour les analyses de carbone et d'azote sur les échantillons d'eau de ruissellement.
- Christine LARRE LARROUY pour les analyses de carbone sur les échantillons d'eau de ruissellement.
- Roland MOREAU. J'ai plusieurs fois bénéficié de ses expériences sur les sols africains.
- Marc PANSU. Il a accepté de partager son bureau avec moi pendant la rédaction. Il m'a toujours encouragé à l'analyse approfondie des données.
- Anne Lise VIALA . Elle a toujours facilité l'accès aux fournitures de bureau , à la documentation scientifique du laboratoire et aux services sur le centre IRD.

Dans le cadre du DEA puis de la thèse, j'ai bénéficié de l'assistance des hydrologues de l'IRD. Je remercie, en particulier:

- Paul CARRE, IRD- MSE de Montpellier qui m'a toujours donné des conseils utiles. IL a fait les dernières mises en forme des cartes présentées et accepter de discuter de nombreux aspects de cette thèse.
- Jean Marie LAMACHERE, IRD- MSE Montpellier qui m'a initié en 1995 au traitement des données d'état de surface en rapport avec l'hydrodynamique des sols. Il a fait des observations pertinentes sur le présent travail.
- Bertrand MARIEU, LECOM Bamako, puis IRD-MSE Montpellier. IL a participé aux travaux de terrain et au dépouillement des données hydrologiques.

Au centre IRD de Bamako, j'ai été sensible à l'accueil des représentants successifs, Jean François DUPON et feu Claude MONNET. Je remercie tout le personnel du centre, en particulier,

- Marcel KUPPER et Vincent BENECH pour les conseils donnés.
- Harber DICKO, Michel GREARD et André MAHIEUX pour le suivi du dispositif expérimental et les mesures hydrologiques sur le terrain.

- Bréhima SIDIBE et Yacouba TRAORE, tous chauffeurs qui ont conduit sur le terrain dans des conditions souvent très difficiles.

- DIAKITE Kankou KANOUTE, secrétaire au LECOM pour sa disponibilité.

Je remercie Fatogoma BAMBA, Jean Pierre BRICQUET et Gil MAHE qui étaient en poste au laboratoire d'hydrologie, IRD Bamako au début de cette thèse. J'ai benficié de leurs conseils

Je remercie la DNH (Direction Nationale de l'Hydraulique), en particulier Sidi TOURE et Navon CISSE pour les prêts d'appareils de mesure hydropluviométrique.

Je remercie tous les stagiaires maliens et français qui ont activement pris part aux mesures de terrain, sous la pluie et dans la boue, et en particulier Bréhima SAWADOGO et Djibril KEITA qui continuer avec moi au delà de leur stage d'élève ingénieur.

Je remercie Cécile et Benoît, Appoline qui ont été des camarades, bien au delà de la période du DEA à Montpellier. Je remercie David, Mohamed, Lakdar, en même temps, doctorants de l'IGA pour les temps passés ensemble. J'ai bien profité des talents de Lakdar dans la recherche bibliographique sur Internet.

J'ai beaucoup privé ma famille et mes proches pour ces travaux et les longs séjours en France. Qu'Allah nous guide et nous récompense.

SOMMAIRE

AVANT PROPOS

INTRODUCTION 1

CHAPITRE I: LE SITE DE L'ETUDE (BASSIN VERSANT DE DJITIKO) 5

CHAPITRE II : CARACTERISATION DES UNITES MORPHOPEDOLOGIQUES
ET DES ETATS DE SURFACE DU BASSIN VERSANT DE DJITIKO 28

CHAPITRE III: ETUDE EXPERIMENTALE DE L'EROSION
ET DU RUISSELLEMENT SUR PARCELLES 64

CHAPITRE IV : RECHERCHE D'INDICATEURS D'ERODIBILITE DES SOLS
EN LABORATOIRE 99

CHAPITRE V: SPATIALISATION DU COMPORTEMENT HYDRODYNAMIQUE
ET LA SUSCEPTIBILITE DES SOLS A L'EROSION 118

CHAPITRE VI : REFLEXION SUR L'AMENAGEMENT DU MILIEU
SOUDANIEN 134

C'ONCLUSION GENERALE 144

BIBLIOGRAPHIE 157

LISTE DES FIGURES 165

LISTE DES TABLEAUX 170

ANNEXES 171

INTRODUCTION

1.1 Contexte de l'étude et problématique

Depuis les années 1950, le Laboratoire d'Hydrologie de l'IRD (ex ORSTOM), a entrepris des études de petits bassins versants en Afrique tropicale (Dubreuil, 1972 ; Nouvelot, 1989; Chevalier, 1996), en plus du suivi hydropluviométrique des grands hydrosystèmes (par exemple, Niger et Sénégal), démarré plus tôt. Dans une analyse historique, Chevalier (1996) montre l'évolution des recherches sur les petits bassins versants tropicaux. Il s'agit de recherches qui, au départ, prenaient seulement en compte les préoccupations immédiates de développement (ex : aménagement hydroagricole). Elles s'intéressent aujourd'hui aux grandes questions posées aux géosciences (ex : la paramétrisation de la contribution hydrique tropicale dans les modèles planétaires de circulation atmosphérique).

A l'échelle africaine, dès le début, les études d'hydrologie tropicale de l'IRD ont le plus souvent conduit à l'établissement de paramètres hydrologiques classiques (hydrogramme de crues, lame ruisselée, coefficient d'écoulement) mais aussi de bilans de matières solubles et solides, donc de l'érosion (Olivry, 1989; Roche, 1989). Les mesures poursuivies pendant longtemps ont permis de produire des données importantes sur les transports solides et les matières dissoutes par les cours d'eau en Afrique : par exemple les cours d'eau du Cameroun (Nouvelot, 1972 ; Olivry, 1977) le lac Tchad (Carré, 1972; Gac, 1980), le fleuve Congo (Censier et Olivry, 1995; Laraque et al, 1995), le fleuve Niger (Gourcy, 1994; Censier et al, 1995; Gallaire, 1995; Olivry et al, 1995a Olivry et al, 1995b; Picouet, 1999), l'Oubangui (Feizouré et al, 1995; Orange et al, 1995).

A l'échelle du Mali, de nombreuses stations de jaugeage, en particulier sur le fleuve Niger, ont permis d'établir des bilans hydrologiques exhaustifs : débits liquides (Olivry, 1995; Olivry et al, 1995a) débits liquides et transport de matière (Gourcy, 1994; Censier et al, 1995; Olivry et al, 1995b; Picouet, 1999). Cependant, les données obtenues sur petits bassins versants (Droux et al, 1997 ; Droux, 1999) restent limitées en nombre. Elles sont relatives à trois bassins versants du haut Niger (Bélékoni, Djitiko et Dounfing), en domaine soudanien. Il s'agit de petits bassins versants de 100 km² pour les deux premiers et d'environ 10 km² pour le troisième, tous suivis par l'IRD depuis les années 1960 (Pourrut et Dubee 1962 ; Molinier, 1969). Notons que l'étude hydrologique de petits bassins versants au Mali, n'a pas inclue de mesures d'érosion avant 1994. Les efforts avaient été plutôt axés sur l'établissement des bilans liquides. L'étude des transports solides sur petit bassin versant, demandée par Jean Claude Olivry (alors, représentant de l'IRD au Mali) a commencé avec la thèse de Jean Philippe Droux en 1994 pour une comparaison avec les mesures faites à l'aval sur le fleuve Niger et son principal affluent le Bani (Gourcy, 1994). Il faut préciser que ces études ont été

entreprises dans le cadre de l'opération "Grands Bassins Fluviaux", partie intégrante du Programme sur l'Environnement de la Géosphère Intertropicale (PEGI), lancé conjointement par l'IRD, l'INSU et le CNRS au début des années 1990. L'opération "Grands Bassins Fluviaux" a été chargée, dans le domaine continental périatlantique (Boulègue et Olivry, 1995):

- d'approcher les cycles paléo-climatiques et les bilans érosion -sédimentation passés;
- d'établir le bilan global et les fluctuations interannuelles des éléments et matériaux exportés des continents par les grands hydrosystèmes péri-atlantiques (Amazonie, Congo et Niger) vers l'Océan Atlantique et de connaître la dynamique des grands écosystèmes intertropicaux.

L'étude de Droux (transport de matières des petits bassins versants au fleuve Niger) s'inscrit dans une problématique de changement d'échelle, actuellement indispensable pour une meilleure compréhension du fonctionnement des hydrosystèmes et des problèmes d'exploitation et de gestion de leur environnement.

Au laboratoire d'hydrologie, la nécessité d'élargir ces études de changement d'échelle a été ressentie en vue de prendre en compte, une autre échelle : **le transfert du ruissellement et des matériaux érodés de la parcelle plus ou moins anthropisée à l'exutoire du petit bassin versant**. L'étude à cette échelle prend beaucoup en compte et de façon fine les activités humaines sur le bassin versant, en analysant leurs incidences sur les dynamiques en place. L'étude de ce deuxième aspect du transfert d'échelle nous a été confié en 1996 par M. Jean Claude Olivry, alors président de la commission scientifique hydrologie et pédologie de l'IRD.

Cette problématique n'est pas seulement conforme à des besoins purement scientifiques mais revêt aussi des aspects touchant directement les questions pratiques de gestion des ressources eaux et sols à différentes échelles spatiales (parcelle de quelques mètres carrés, champ paysan, bassin versant de 10 à 100 km²). Elle s'inscrit donc directement dans les préoccupations du Mali, en matière de développement rural durable et de gestion de l'environnement.

1.2 Objectifs de l'étude et démarche suivie

Les objectifs de nos travaux sont :

- l'établissement du rapport entre production de sédiment à l'intérieur du bassin versant et la sortie de matières solides à l'exutoire ;
- la compréhension du comportement hydrodynamique et la susceptibilité à l'érosion des différents types de sols ou des différentes zones homogènes du bassin versant ;
- la quantification de l'influence de la mise en culture et des pratiques culturales sur le ruissellement et l'érosion des principaux sols du bassin versant de Djitiko.

Les objectifs ont exigé l'adoption d'une démarche complexe comprenant en particulier :

- 1) **L'étude quantitative et qualitative** des eaux de ruissellement et des matériaux érodés en fonction des types de sol et des pratiques culturales sur parcelles expérimentales.
- 2) **Les études de comportement en laboratoire**, en complément des mesures sur parcelles, pour mieux comprendre et comparer les diverses composantes physiographiques du bassin versant de 100 km² dans une perspective d'étude spatiale.
- 3) **La spatialisation des informations relatives à l'érosion des sols, à partir de données stationnaires**, qui exige l'utilisation appropriée de l'outil informatique (SIG). Les données acquises en parcelles expérimentales et au laboratoire peuvent alors servir à la production d'outils spatialisés exploitables, par exemple, pour l'aménagement aux échelles régionale et locale.

Cette démarche complexe a pu être mise en application, grâce au concours précieux des partenaires suivants :

- Laboratoire d'Hydrologie (IRD, Bamako et Montpellier) ;
- Laboratoire d'Etude du Comportement des Sols Cultivés (LCSC) du Centre IRD de Montpellier ;
- Institut de Géographie Alpine (IGA), Université Joseph Fourier –Grenoble I

Ce présent mémoire est présenté en 6 chapitres :

Chapitre 1. Les caractéristiques géographiques de la zone soudanienne et du secteur étudié

Chapitre 2. Les unités morphopédologiques et états de surface du bassin versant de Djitiko qui sont caractérisées de façon à donner une idée nette du contexte physique dans lequel les problèmes d'érosion ont été abordés.

Chapitre 3. L'étude expérimentale du ruissellement et de l'érosion in situ.

Chapitre 4. Les recherches d'indicateurs d'érodibilité des sols en laboratoire.

Chapitre 5. La spatialisation du comportement hydrodynamique et de la susceptibilité des sols à l'érosion hydrique.

Il s'achève avec le chapitre 6, une réflexion concernant l'aménagement du milieu soudanien.

La conclusion générale réalise une synthèse des principaux résultats obtenus et montre les perspectives d'avenir.

CHAPITRE I
LE SITE DE L'ETUDE (BASSIN VERSANT DE DJITIKO)

1.1 Introduction

Dans les recherches sur l'érosion, comme dans les autres domaines relatifs à l'environnement, le chercheur doit répondre à une interrogation importante : quelles sont les limites spatiales pour lesquelles, la validité des résultats obtenus est acceptable ? Le plus souvent, les sites expérimentaux sont choisis en fonction de cette question.

En ce qui nous concerne, les études ont été conduites dans un bassin versant de 103 km², en zone soudanienne du Mali : le bassin versant de Djitiko. Il s'agit aussi d'un bassin versant représentatif du haut Niger au Mali.

Dans ce premier chapitre, nous présentons, à partir des données bibliographiques les caractéristiques générales du bassin versant de Djitiko. Elles seront complétées par la suite, en particulier les aspects physiques, par nos caractérisations (relatives aux sols et aux états de surface) faites dans le cadre de cette étude et faisant l'objet du chapitre II.

1.2 Localisation géographique et étendue du bassin versant de Djitiko

Le bassin versant de Djitiko, situé sur la rive gauche du fleuve Niger, est entièrement inscrit entre les latitudes 12° 03' et 12° 11' et les longitudes 8° 22' et 8° 27' (fig. 1.1). Son exutoire, au pont de Madina, est situé à 80 Km au sud de Bamako, et à 20 km de Kangaba sur la route Bamako- Kangaba- République de Guinée. Après un parcours de 2 km de l'exutoire, les eaux du bassin versant se jettent dans la Koba pour rejoindre le Niger, 5 km plus loin.

Le bassin versant de Djitiko est caractérisé par :

Superficie :	103 Km²
Périmètre :	43 km
Coefficient de forme:	1,20
Longueur du rectangle équivalent :	14,7 km
Largeur du rectangle équivalent :	7,0 km

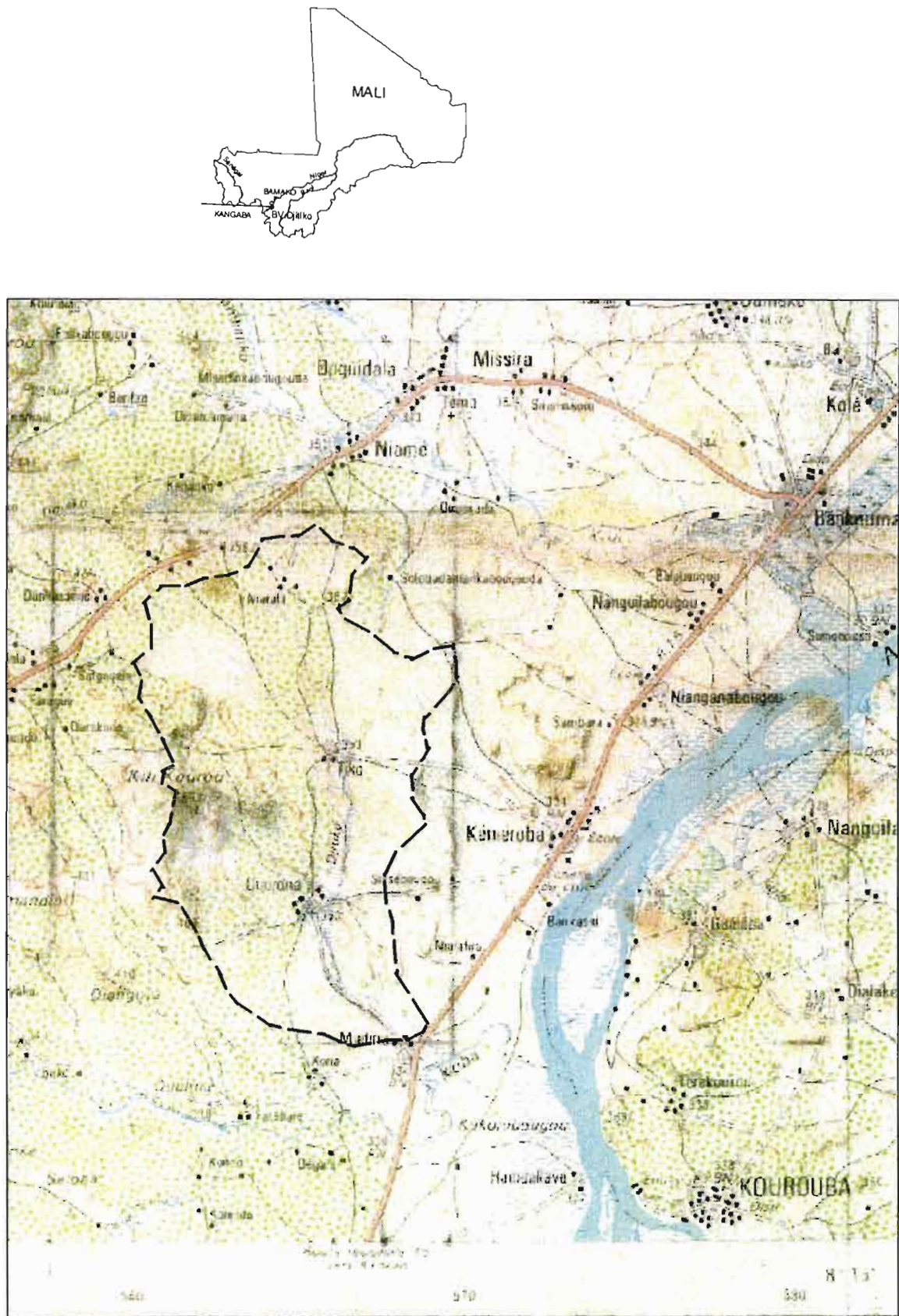


Figure 1.1 : Situation géographique du bassin de Djitiko
NB : Les limites du bassin versant sont indiquées
par les traits en pointillé.

1.3 Environnement physique du bassin versant de Djitiko

13.1 Le climat

13.1.1 La zone soudanienne dans le découpage bioclimatique des zones à saisons contrastées d'Afrique de l'ouest

Le bassin versant de Djitiko est situé en zone bioclimatique soudanienne dont les limites avec celles des zones voisines, notamment le domaine sahélien a très souvent fait l'objet de controverses. Le tableau 1.1 donne un aperçu des multiples découpages climatiques proposées pour ces zones à saisons contrastées d'Afrique de l'ouest.

La majeure partie des zonages climatiques établis pour cette région ont retenu deux critères : la pluviométrie moyenne annuelle et le type de végétation (Sivakumar, 1989). Les termes de zones "sahélienne", soudanienne" et "guinéenne" ont été utilisés par Chevalier en 1933. Par la suite, en 1949, Aubreville a reconnu la nature transitoire des zones climatiques et a proposé les termes de "sahelo-saharien", "sahelo-soudanien", et "soudano-guinéen.

Sivakumar (1986) a proposé pour cette région Ouest africaine, un zonage sur la base d'une saison de croissance des cultures. La durée de cette saison, calculée à partir de la pluviométrie et de l'évapotranspiration potentielle, a permis de distinguer :

- une zone sud sahélienne avec 60 à 100j de période de végétation;
- une zone soudanienne avec 100 à 150j de période de végétation.

Dans le présent mémoire, nous parlons de zone soudanienne en faisant allusion à une zone dont les limites pluviométriques sont 700 et 1 300 mm correspondant au Soudanien I de Rodier (1959). Elle correspond, par ailleurs, à la zone soudanienne de Sivakumar .

Dans l'espace ainsi délimité, en ce qui concerne le Mali :

- les paysans adoptent les mêmes cultures principales et des stratégies de production assez apparentées.
- les propositions d'améliorations techniques et de plan de développement rural sont les mêmes dans les aspects essentiels.

La zone soudanienne, couvre environ 250.000 km² au Mali. Elle forme, à l'échelle Ouest africaine, une bande W-E s'étalant du Sénégal au Nigeria, avec une largeur d'environ 300 km et occupant une partie de tous les états (figure 1.2). Elle est encadrée par les zones guinéenne au sud du 11° N, et sahélienne, au nord du 14° N.

Tableau 1.1 : Revue des définitions des zones climatiques sahéliennes et soudaniennes en Afrique de l'Ouest d'après Sivakumar (1989)

Zones proposées (limites pluviométriques en mm)				Référence
Sahélien (300-750)		Soudanien (750-1250)		Chevallier (1933)
Sahélo-soudanien (500- 950)				Aubreville (1949)
Sahélo--soudanien (500-750)		Soudano-sahélien (750-1000)		Trochain (1952)
Sub-saharien (100-600)		Soudanien (600-1250)		Keay (1959)
Nord sahélien (100-300)	Sud sahélien (300-700)	Soudanien I (700- 1300)	Soudanien II et III (1300- 1800)	Rodier (1959)
Sahélien (100-400)	Sahélo- Soudanien (400-600)	Soudanien (600-1200)		Le Houerou (1976)
Sahélien (100-700)		Soudanien (700-1100)		Davy et al. (1976)
Sahélien (100-400)		Soudanien (400-1200)		Nicholson (1980)
Sahélien (200-400)		Soudano- sahélien (400-600)	Nod soudanien (600-800)	Sud soudanien (800-1200)
		Le Houerou et Popov (1981)		

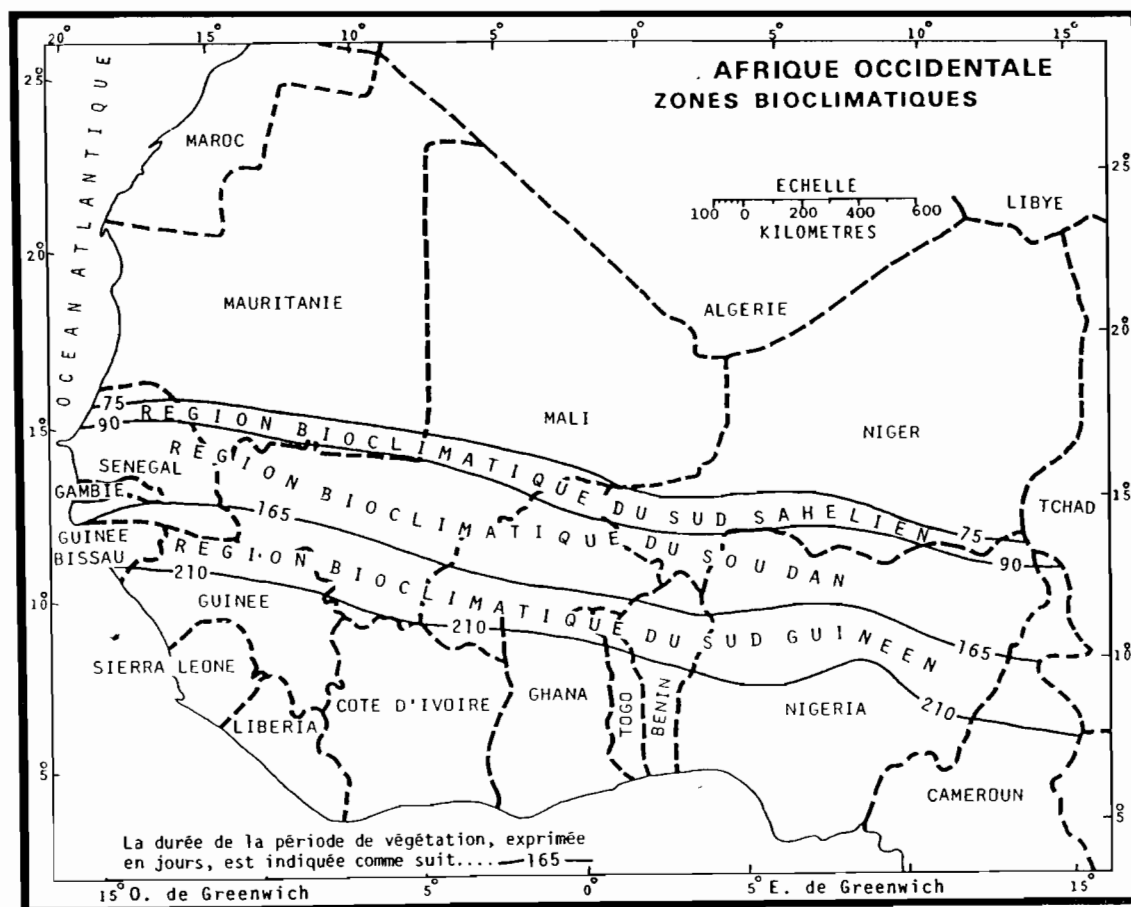


Figure 1.2 : Les zones bioclimatiques de l'Afrique Occidentale d'après Virmani et al (1980)

13.1.2 Généralités sur le climat

Dans le bassin versant de Djitiko comme dans le reste du Mali et dans l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest, le climat est sous l'influence des mouvements de l'anticyclone des Açores, au nord de l'Equateur, et celui de Sainte Hélène au sud. La masse d'air tropical sec, poussée par l'anticyclone des Açores, relayé par l'anticyclone du Sahara, se déplace vers le sud et rencontre la masse d'air humide provenant de l'Atlantique Sud sous la poussée des anticyclones de Sainte Hélène et du Kalahari. **Le plan de rencontre de ces deux masses d'air est le Front Inter Tropical (FIT) ou Zone Intertropicale de Convergence (ZITC).**

Ces mouvements de masses d'air déterminent l'alternance d'une saison sèche et d'une saison pluvieuse au cours de l'année.

La saison sèche (novembre à mai) correspond à une période où l'anticyclone de Sainte Hélène est affaibli et le FIT retiré vers le sud au dessus de l'Atlantique, près de l'Equateur vers 5° N. L'harmattan, vent sec N-E, souffle en zone soudanienne.

La saison pluvieuse (juin à octobre) correspond en zone soudanienne à une période caractérisée par :

- d'une part, l'affaiblissement de l'anticyclone des Açores ;
- et d'autre part, l'établissement d'une dépression (d'origine thermique) sur le Sahara, vers 20°N où le FIT s'établit.

Dans ces conditions, le continent est balayé par de l'air humide ou flux de mousson en provenance de l'Atlantique, ce qui provoque la formation des systèmes de précipitation.

13.1.3 Paramètres climatiques dans le bassin versant de Djitiko

Le bassin versant de Djitiko n'a pas fait l'objet de suivi climatique de longue durée. Les hydrologues de l'IRD y ont fait des mesures de pluies en 1960 et 1968 (Molinier, 1969) dans le cadre de campagnes hydrologiques. Plus récemment, Droux, dans le cadre de sa thèse avec l'IRD (deux campagnes hydrologiques), a fait deux campagnes de mesures (1994 et 1995). Notons enfin que des mesures sont faites par les paysans depuis au moins 10 ans à trois postes installées dans les villages par les services techniques de l'agriculture. Certaines de ces mesures ont beaucoup souffert du manque de rigueur si bien que nous discuterons seulement des mesures faites au cours des campagnes hydrologiques.

Les stations climatiques avec une longue période de mesures et plus proches du bassin versant de Djitiko sont celles de Bamako à 80 km et de Kangaba à 20 km. Elles servent ici de références en ce qui concerne les informations découlant d'une longue observation et d'analyses statistiques. Précisons que les données présentées résultent de mesures commencées en 1922 à Bamako et en 1940 à Kangaba.

*** Les précipitations**

Les pluies mensuelles deviennent importantes à partir de mai et présentent la plus forte valeur en août (300 mm environ) comme le montre la figure 1.3

Les pluies annuelles enregistrées sur le bassin versant de Djitiko au cours des 4 campagnes hydrologiques signalées sont de 1018,2 mm en moyenne (tab.1.2)

Une analyse fréquentielle des pluies annuelles aux stations de Bamako et Kangaba (Joignerez et Guiguen, 1992) est donnée au tableau 1.3. Elle montre :

- une variabilité assez importante des hauteurs annuelles de pluie;
 - une hauteur annuelle moyenne légèrement supérieure à 1000 mm à Bamako et à Kangaba.
- Ces valeurs pluviométriques sont bien caractéristiques du bioclimat soudanien, en particulier sa partie sud.

Tableau 1.2 : Pluviométrie annuelle dans le bassin versant de Djitiko

	1960	1968	1994	1995	Moyenne
Pluviométrie annuelle (mm)	1166	805	1087,5	1014,4	1018,2

Tableau 1.3 : Analyse fréquentielle des précipitations annuelles (en mm) aux stations de Bamako et Kangaba d'après Joignerez et Guiguen, 1992

Stations	Situation	Période	Lois	Années humides			Médiane	Années sèches			Moyenne
				100	50	10		10	50	100	
Bamako	12°32' N- 7°57' W	1922-1991	Goodrich	1538	1476	1303	1031	808	717	695	1049
Kangaba	11°56'N-8°25'W	1940-1991	Pearson3	1595	1519	1325	1064	872	786	761	1076

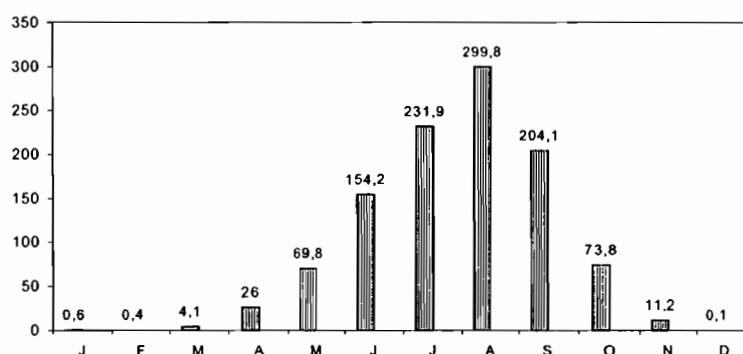


Figure 1.3 : Précipitations mensuelles à Kangaba (1939-1995)

*** Autres paramètres climatiques :** température, humidité relative et évapotranspiration

Des mesures de paramètres climatiques faites à la station de Bamako font l'objet du tableau 1.4 : température moyenne maximale (Tx), température moyenne minimale (TN), humidité relative (U) de l'air et évapotranspiration potentielle (ETP).

Température

Sous ce climat tropical chaud, les plus faibles valeurs de température maximale moyenne (30 à 32°C) sont relevées en pleine saison de pluie (juillet, août, septembre). En ce qui concerne les plus faibles températures minimales moyennes (moins de 20°C), elles sont enregistrées de novembre à janvier : c'est la saison dite "fraîche" par les populations locales.

Humidité relative de l'air

L'humidité relative la plus forte, mesurée en saison pluvieuse, est voisine de 80%. A l'opposé, la siccité de l'air est nette (moins de 30% d'humidité) en février et mars où souffle l'harmattan, vent très desséchant.

L'évapotranspiration potentielle

L'ETP mensuelle est supérieure à 100 mm pendant toute l'année avec des valeurs supérieures à 200 mm de janvier à avril.

Tableau 1.4 : Paramètres climatiques à la station de Bamako
d'après Droux (1999)

Mois	TX (°c) moy. 1950-1993	TN (°c) moy. 1950-1993	U (%) moy. 1950-1993	ETP (mm) moy. 1980-1993
janvier	33,3	17,0	31	202
février	36,6	19,8	26	209
mars	38,4	22,8	27	228
avril	39,4	25,0	38	205
mai	38,3	25,4	53	189
juin	35,0	23,4	67	145
juillet	31,8	22,0	77	123
août	30,9	21,7	82	109
septembre	32,0	21,5	79	114
octobre	34,3	21,2	69	138
novembre	35,0	18,6	49	163
décembre	33,0	16,9	37	190
Année	34,8	21,3	53	2015

13.2 Géologie

13.2.1 Cadre régional

Dans la géologie de la zone soudanienne du Mali, trois étages stratigraphiques sont distingué : le socle précambrien, l'Infracambrien tabulaire et le Continental terminal (DNHE, 1990). Le résumé de leurs caractéristiques lithologiques est donné au tableau 1.5. Il s'agit d'étages stratigraphiques largement représentés en Afrique occidentale (Michel, 1973)

* Le socle précambrien

Il est recouvert par d'importants dépôts sédimentaires et n'apparaît en surface que par endroits. Selon Dars, (1961) on distingue :

- des schistes et des arkoses métamorphiques considérés comme birrimiens, redressés le plus souvent à la verticale et de direction sensiblement nord-sud.
- des granites, comprenant 2 types. D'une part il existe des granites hétérogènes, fréquemment migmatites, souvent orientés, accompagnés de migmatites intrabatholiques. Il s'agit de granites syntectoniques du type Baoulé, occupant de vastes superficies. D'autre part, on note

des granites homogènes, plus sodiques que les précédents, probablement intrusifs et discordants. Suite au dynamométamorphisme intense, le granite est écrasé en général et a été souvent recristallisé, d'où l'aspect de gneiss dans de nombreux cas (Michel, 1973). Les affleurements observés montrent un granite décomposé en boule.

* L'Infracambrien tabulaire

Dans l'histoire géologique de l'Afrique occidentale, on retient que pendant l'Infracambrien, le Cambrien et l'Ordovicien, des séries sédimentaires épaisses, en particulier gréseuses, se sont déposées. Elles ont été, par endroits, traversées par des venues doléritiques.

* Le Continental terminal

Il est essentiellement formé d'un ensemble de sédiments argileux et argilo- sableux bariolés. Les couches d'argile sont souvent intercalées avec des couches ou des lentilles de sables et de graviers.

Tableau 1.5 : Caractéristiques lithologiques des formations géologiques de la zone soudanienne du Mali.

Etage stratigraphique	Continental terminal	Infracambrien tabulaire	Socle
Caractéristiques lithologiques	Argiles, argiles sableuses, sables, latérites	Grès, grès schisteux, schistes, filons doléritiques	Granites, grauwackes, micaschistes, schistes

13.2.2. Les roches du bassin versant de Djitiko

* Origine des données

Les premières publications (Dubreuil, 1972) indiquent un environnement gréseux à 100 % pour le bassin versant de Djitiko, tout en précisant son appartenance à l'Ordovicien. Par la suite, la présence de schiste et de granite a été signalée (Diallo, 1995 ; Droux, 1999).

Pour mieux caractériser l'environnement géologique à l'occasion du présent travail, nous avons eu recours à diverses sources d'informations, notamment les informations découlant d'études hydrogéologiques et métallogéniques. Les schémas d'une quinzaine de coupes de forage d'eau (DNHE, 1992) ont été interprétés. Il s'agit de coupes situées dans un rayon de 20 km incluant le bassin versant (fig1.3). Trois d'entre elles sont localisées à l'intérieur même du bassin versant. Notons enfin que nous avons fait des observations sur le terrain de 1995 à 2000 : trois semaines de prospection en 1995, deux semaines en 1997 et les sorties routinières pour suivre parcelles et ravines dispersées dans la partie aval du bassin versant.

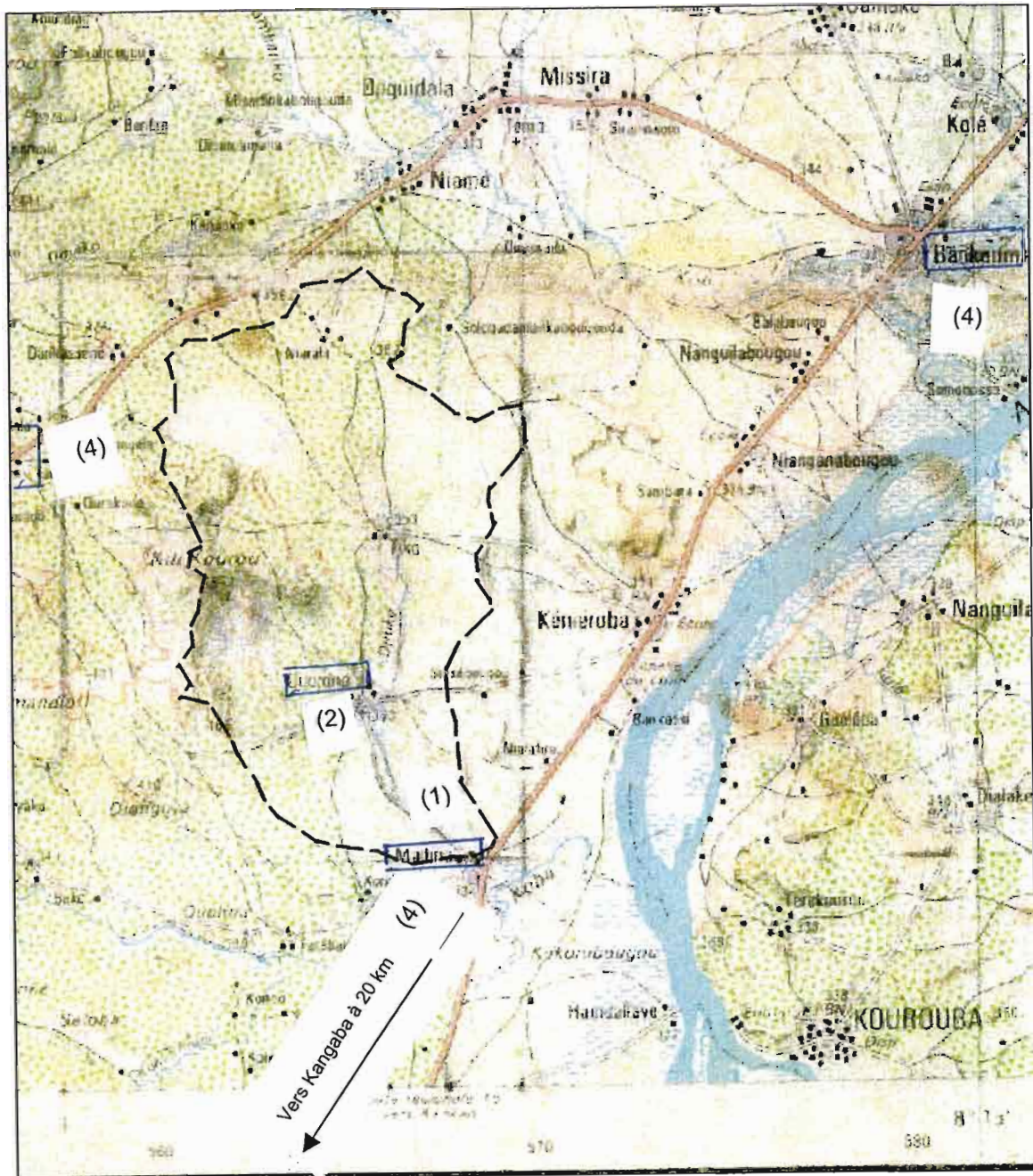


Figure 1.3: Localisation des coupes géologiques interprétées

NB : Les sites des coupes sont encadrés et leur nombre est indiqué entre parenthèses

*** Caractéristiques stratigraphiques et lithologiques**

Nos propres examens sur le terrain et strictement à l'intérieur du bassin versant nous ont permis de noter la présence de micaschiste et de dolérite en surface. Il faut noter que ces affleurements sont assez rares du fait de la forte altération connue dans la région. Le micaschiste est seulement observé sur des reliefs résiduels d'altitude variable de 400 à plus de 500 m. Quant à la dolérite, elle est non seulement observée sur les versants des collines birrimiennes mais aussi dans des talwegs.

Les données relatives aux 15 forages permettent de distinguer en profondeur du granite et du schiste (substratum) recouverts d'altérites indurées ou non.

Le substratum

Le granite, observé dans 73% des coupes, est selon le cas, altéré, fracturé ou sain. Quant au schiste (27 % des coupes), il est altéré ou fracturé. A cette dernière formation se trouvent souvent associés des filons de quartz.

Les formations superficielles (les altérites)

L'épaisseur de ces formations est très variable : 20 m dans 34 % des coupes et trois autres épaisseurs (15 m, 30 m et 35 m) dans la même proportion (22 %). A l'intérieur même du bassin versant, les altérites sont respectivement épaisses de 20 et 30 m dans les 2 coupes de Ouronina et de 15 m dans celle de Madina. Notons que l'altérite est plus épaisse si elle repose sur le schiste : 30 à 35 m contre 15 à 20 m dans le cas où elle repose sur du granite.

En ce qui concerne leur lithologie, les matériaux superficiels sont formés par la cuirasse ferrugineuse, les altérites faiblement indurées et les argiles. Altérites faiblement indurées et argiles sont souvent associées. Dans certaines coupes c'est une argile sableuse qui est observée. L'extension des cuirasses en surface est particulièrement importante dans le bassin versant (40 % de la surface) comme le montre la carte des affleurements (fig.1.4)

Les cuirasses ferrugineuses du bassin versant de Djitiko semblent appartenir à plusieurs faciès. Des travaux de géologie minière (DNGM, ORSTOM, CNRS, 1986), dans la petite région de Kangaba incluant le bassin versant, ont permis l'identification de 6 types de cuirasse :

- cuirasse lamellaire : c'est une carapace indurée à l'air,
- cuirasse massive : rouge violacé et dure,
- cuirasse pseudonodulaire : présence de volumes violets, délimités par du matériel brun,
- cuirasse nodulaire : très répandue dans la région, elle est formée d'éléments gravillonnaires rouges sombres ou violets,

- cuirasses complexes : elles contiennent un important matériel brun et ne présentent pas de traits morphologiques remarquables,
- cuirasses bauxitiques : elles comprennent des cuirasses nodulaires à élément de bauxite, parfois de grande taille, et des cuirasses ferrugineuses envahies par du matériel alumineux.

En ce qui concerne les argiles, les géologues parlent d'argiles tachetées. Il s'agit d'un assemblage de plages jaunes, friables, passant au brun, puis au rouge violacé.

En ce qui concerne les caractéristiques géochimiques et minéralogiques des formations superficielles du bassin versant de Djitiko, les travaux de recherches minières précédemment cités (DNGM, ORSTOM, CNRS 1986) restent la référence. Ils ont inclus des analyses de laboratoire sur de nombreux échantillons : cuirasse (484 échantillons), gravillons (288 échantillons) et argile (245 échantillons). Les valeurs moyennes pour un groupe de 12 éléments (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , MgO , K_2O , MnO , quartz, gibbsite, kaolinite, goéthite, hématite) sont données au tableau 1.6. Les cuirasses analysées sont nettement plus riches en fer qu'en aluminium ; il s'agit donc de cuirasse ferrugineuse. Par ailleurs, on note que les matériaux meubles (il s'agit d'échantillons provenant des couvertures pédologiques) sont riches en silice, en gibbsite et en goéthite d'où une forte altération et une nette individualisation des sesquioxydes de fer.

Tableau. 1.6 : Géochimie et minéralogie des formations superficielles de la région de Kangaba d'après DNGM, ORSTOM, CNRS (1986)

Élément	Cuirasse	Gravillons	Matériaux meubles
SiO_2 (silice)	33,04	58,76	75,01
Al_2O_3 (oxyde d'aluminium)	19,02	17,01	13,32
Fe_2O_3 (oxyde de fer)	43,9	18,74	4,4
TiO_2 (oxyde de titane)	0,89	1,34	1,5
MgO (oxyde de magnésium)	0,2	0,23	0,2
K_2O (oxyde de potassium)	0,37	0,38	0,25
MnO (oxyde de manganèse)	0,03	0,02	0,02
Quartz	17,5	38,74	6,34
Gibbsite	11,98	0,02	59,39
Kaolinite	1,74	43,04	0,07
Goéthite	45,27	7,67	33,6
Hématite	14,67	11,84	2,34

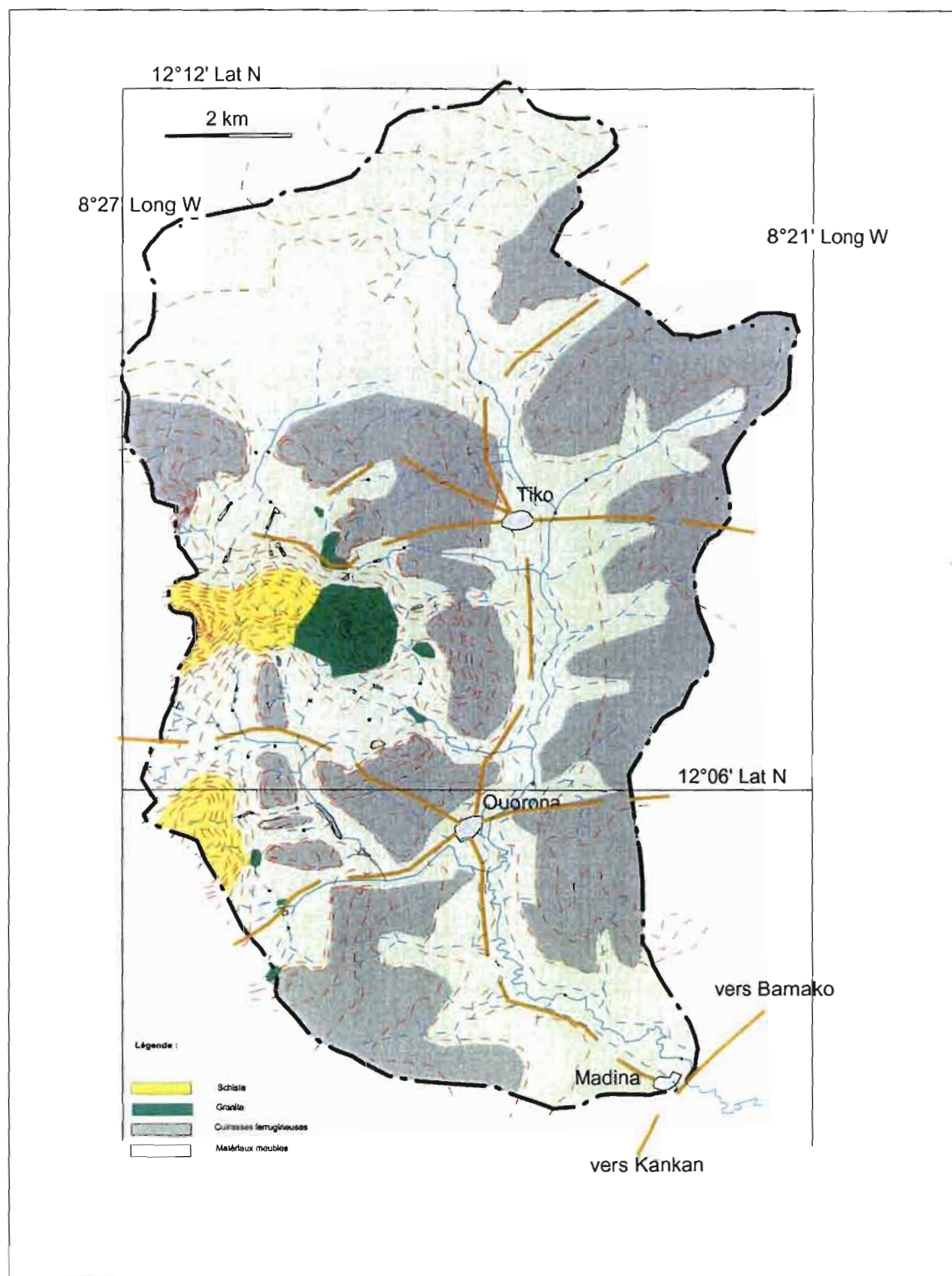


Figure 1.4 : Carte des affleurements dans le bassin versant de Djitiko d'après la cartographie de C. Zanardi (2000)

13.3. Géomorphologie et relief

13.3.1 Quelques aspects de la géomorphologie de la zone soudanienne ouest africaine

Dans les études relatives à l'environnement biophysique de l'Afrique de l'ouest, la présence de grandes étendues de cuirasses (bauxitiques et surtout ferrugineuses) a vite attiré l'attention des chercheurs des différentes disciplines. Michel (1978) est arrivé à la conclusion que morphogenèse et cuirassement sont intimement liés dans cette région.

Un schéma chronologique et paléomorphoclimatique des cuirasses, donné par Michel (1978, 1973) permet de distinguer plusieurs générations de cuirasse.

* Les vieilles cuirasses antérieures au Tertiaire

Elles présentent un profil complexe, sont riches en alumine et couvrent de vastes plateaux dénudés et largement ondulés. Ces cuirasses sont très étendues dans les ensembles montagneux du Fouta Djallon et du Plateau Mandingue.

* Les cuirasses du Tertiaire.

Ces cuirasses ont été principalement formées vers la fin du Pliocène. Deux types de modelé sont distingués : d'une part, les collines et versants du "Relief intermédiaire" datant du Pliocène et d'autre part, les surfaces planes des bassins sédimentaires récents et leurs bordures. Parmi ces cuirasses du Tertiaire, certaines contiennent de l'alumine mais en sont moins riches que les vieilles cuirasses. Les autres sont ferrugineuses et contiennent quelquefois du matériel allochtone (fragments de roche et débris d'anciennes cuirasses)

* Les cuirasses du quaternaire

Elles sont très étendues dans les domaines guinéen et soudanien, contrairement aux zones sahéliennes. Il s'agit de cuirasses toujours ferrugineuses, pauvres en alumine et riches en silice.

Les terrains cuirassés du Quaternaire, généralement connus sous le nom de glacis à partir de la thèse de Michel (1973), comprennent trois étages (trois générations de glacis) : le haut glacis, le moyen glacis et le bas glacis.

Ces glacis ont joué un grand rôle dans l'organisation des couvertures pédologiques actuelles et la distribution spatiale originelle des formations végétales. Ils jouent un rôle fondamental dans les processus morphodynamiques actuels qui affectent les bioclimats soudaniens et guinéens.

Il s'agit de glacis étagés avec trois niveaux : **Les deux premiers glacis** sont toujours cuirassés. Les niveaux indurés par les oxydes de fer affleurent ou sont seulement couverts d'une mince couche formée de débris ferrugineux et d'un peu de terre fine (argile + limon + sable). Les cuirasses sont gravillonneuses ou conglomératiques. Ils contiennent des débris de cuirasses antérieures et quelquefois des fragments de roche. L'épaisseur et la dureté du

revêtement ferrugineux dépendent de différents facteurs dont la lithologie et la topographie locales. Concernant leur nature chimique, les cuirasses du haut et du moyen glacis sont composées de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 et TiO_2 , les éléments dominants étant la silice et le fer (voir point 13.2 et annexe I). **Le bas glacis** se distingue des deux autres par l'absence de cuirasse ferrugineuse en surface. Dans les domaines guinéens et soudaniens où la migration des sesquioxydes est intense, le fer et le manganèse s'accumulent à faible profondeur. Le matériau meuble ou légèrement induré du bas glacis est d'origine détritique et allochtone. Le façonnement du bas glacis semble se poursuivre de nos jours, du fait que la topographie n'est pas figée par une cuirasse.

En ce qui concerne l'altitude, les différents glacis sont observés dans des positions différentes. L'altitude relative de chaque glacis semble beaucoup varié à l'intérieur de la région et la lithologie jouerait un rôle important dans cette variabilité. Les glacis s'ordonnent en fonction du réseau hydrographique. Leur inclinaison vers les rivières et les ruisseaux se fait par une pente très douce (6 à 1 %).

Beaudet (1978) a bien résumé la chronologie des formes étagées proposée par Michel. Ce schéma est utilisé maintenant par la plupart des spécialistes des Sciences de la Terre de l'Afrique occidentale :

Relief intermédiaire (Pliocène), haut glacis (Quaternaire ancien), moyen glacis (Quaternaire moyen) et bas glacis (Quaternaire récent).

Par ailleurs Beaudet (1978) signale qu'une seule série d'observations et de conclusions, régionalement judicieuses ont été trop souvent généralisées à l'échelle de l'Afrique occidentale entière par certains auteurs. Il semble que si ces généralisations sont parfois justifiées, elles ont aussi l'inconvénient de négliger bien des différences qui peuvent exister entre les divers types de cuirasse, leurs relations avec les roches et leurs rapports avec le cadre géomorphologique régional.

13.3.2 La morphologie du bassin versant de Djitiko

Les premières études (MOLINIER, 1969) ont montré que seulement 10 % du bassin versant de Djitiko occupent une tranche d'altitude supérieure à 400 m. Le Kilikourou (583 m), localisé à l'ouest, est le point culminant du bassin versant. C'est une colline (photo n°1) où affleurent des roches birrimiennes dressées (schiste métamorphique et dolérite). La majeure partie du

bassin (60%) est située entre 350 et 400 m et son exutoire à Madina se trouve à 335 m d'altitude.



Photo n°1: Vue d'une colline birrimienne dans le bassin versant de Djitiko
(mars, 1999, après le passage du feu de brousse)

Dans le cadre du présent travail, pour avoir des informations plus précises, il a été demandé à Cyril Zanardi de faire l'étude géomorphologique du bassin versant. Ce travail a abouti à une carte (fig. 1.5). Les unités morphologiques distinguées par Zanardi (2000) sont : un relief résiduel, sa dépression périphérique, les topographies cuirassées (glacis cuirassé) et les modelés à sols profonds, situés plus bas.

Le relief résiduel de résistance, qui est cartographié ici, est de faible volume. La dépression périphérique, d'après la carte de Zanardi, est limitée du côté des topographies cuirassées par des pseudo cuestas cuirassées. Au point de vue morphodynamique actuelle, les flux de matière de la dépression en direction du marigot Djitiko passent à travers des percées pseudo-cataclinales. Le modelé cartographié sous la désignation de sol épais peut être assimilé à un bas glacis du système de Michel (Michel, 1973).

Les différents modelés du bassin versant apparaissent dans les proportions suivantes :

reliefs résiduels :	10 %
glacis cuirassés :	40%
bas glacis :	39 %
zones déprimées :	11 %.

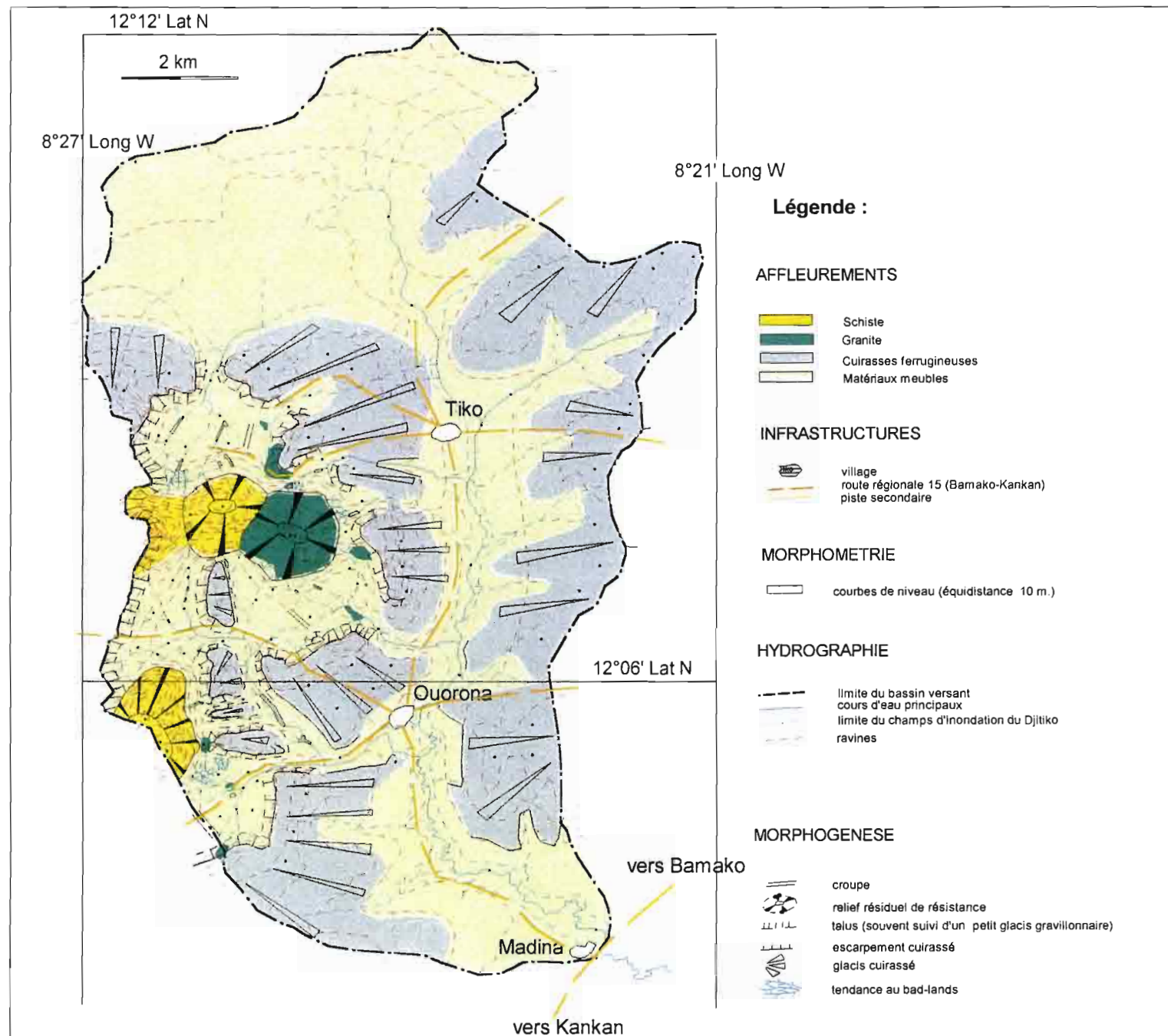


Figure 1.5 : Carte géomorphologique du bassin versant de Djitiko (D'après Zanardi, 2000)

13.4 Végétation

Dans le bassin versant de Djitiko, comme ailleurs en zone soudanienne, les conditions édaphiques locales ont une nette influence sur la composition floristique et surtout la physionomie des formations végétales.

* Végétation des glacis cuirassés

La strate ligneuse est principalement représentée par des arbustes, en particulier des combrétacées et autres espèces adaptées au milieu cuirassé comme *Lanea acida* et *Entada africana*. La strate inférieure est formée par de nombreuses espèces de graminées parmi lesquelles *Hypparrhenia dissoluta*, *Loudetia togoensis*. Il faut noter que la strate ligneuse est parfois discontinue au profit de grandes étendues à couverture herbacée. Cela est en rapport avec la présence de cuirasses subaffleurantes recouvertes d'une mince couche de sable argileux graveleux.

* Végétation des glacis à sols profonds

Ici, la végétation est une savane boisée avec un important tapis herbacée. Les espèces arborées fréquentes sont : Karité (*Vitellaria paradoxa*), *Isoberlinia doka*, néré (*Parkia bigloboza*), caïlcédrat (*Khaya Senegalensis*). La strate herbacée est dominée par *Hypparrhenia dissoluta* et *Andropogon gayanus*.

* Végétation du pseudo cuesta

Les espèces arborées sont disséminées au milieu des arbustes et surtout des herbacées. Dans ce mélange, on distingue des acacias et dans la strate herbacée, *Pennisetum pedicellatum* et *Andropogon gayanus*.

* Forêt galerie longeant le réseau hydrographique

C'est classique de voir en zone soudanienne, le long des petits cours d'eau, une véritable forêt, très peu large. Les espèces arborées dominantes le long du Djitiko sont le caïlcédrat (*Khaya Senegalensis* et *Isoberlinia doka*). Elles coexistent avec le bambou et de nombreuses espèces de lianes

13.5 Hydrographie et hydrologie

13.5.1 Un cours d'eau à écoulement temporaire

Le Djitiko est un cours d'eau dont le nom a été donné au bassin versant à l'étude. Son écoulement est temporaire et il tarit complètement à la fin de la saison pluvieuse. L'écoulement continu commence en juillet d'après le suivi effectué pendant les années 1960, 1968, 1994 et 1995. L'étiage absolu est généralement constaté en novembre. Les coefficients

d'écoulement du Djitiko, établis au cours des quelques années de suivi hydrologique montrent des valeurs toujours inférieures à 10 % (tab.1.7).

Tableau 1.7 : Coefficient d'écoulement du Djitiko d'après Droux (1999)

Année	1960	1968	1994	1995	Moyenne
Coefficient d'écoulement (Ke) en %	9,1	8,8	6,7	9,4	8,5

13.5.2 Les transports de matière par le Djitiko

Pour les campagnes 1994 et 1995 la dégradation spécifique du bassin versant de Djitiko (tab.1.8) est inférieure à $15 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ (Droux, 1999). L'auteur estime que les valeurs obtenues pour Djitiko sont faibles par rapport à celles mesurées sur des bassins versants du domaine soudanien au Cameroun, Burkina Faso et Côte d'Ivoire.

Cependant la dégradation spécifique du Djitiko est nettement supérieure à celle qui est mesurée à l'échelle supérieure : le bassin supérieur du Niger incluant Djitiko (tab.1.9)

Tableau 1.8 : Flux spécifiques de matières sur le bassin versant de Djitiko d'après Droux (1999)

Année	Ecoulement annuel	Matières en suspension
	$\text{l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$	$\text{t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$
1994	2,3	13,7
1995	3,0	14,4

Tableau 1.9 : Flux spécifiques de matières sur le bassin du Niger d'après Olivry et al (1995 b)

Station et année	Ecoulement annuel	Matières en suspension	Matières dissoutes
	$\text{l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$	$\text{t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$	$\text{t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$
Banankoro			
1990	7,4	-	-
1991	7,6	8,1	10,4
1992	7,4	6,6	11,7
Koulikoro			
1990	6,1	2,8	-
1991	6,4	3,2	2,7
1992	6,4	2,5	2,5

1.4 Environnement humain du bassin versant de Djitiko

14.1 Le peuplement

Actuellement, 3 terroirs villageois (Madina, Ouronina et Tiko) se partagent l'espace. Il s'agit de populations vivant essentiellement d'agriculture. La population de chacun des trois villages

se répartit entre un site principal et des hameaux de culture. Ici, les hameaux sont généralement installés en vue d'exploiter les terres éloignées du village.

La pression humaine sur le bassin versant est faible (20 habitants km⁻²) en comparaison avec d'autres situations au Mali. Les surfaces cultivées représentent moins de 10% pour Djitiko, contre 70% dans le vieux bassin cotonnier du Mali, localisé sur le plateau, dans la partie nord de la zone soudanienne.

14.2 Les pratiques foncières

De façon générale au Mali, l'accès aux ressources foncières, un élément fondamental de l'existence dans les communautés rurales, a été beaucoup réglementé par les empires et royaumes d'avant colonisation française. Le système foncier en vigueur dans le bassin versant de Djitiko est du type "soudanien" dont les caractéristiques sont présentées dans l'Atlas des ressources terrestres du Mali (PIRT, 1980). Ce système a été façonné dans un contexte dont les traits dominants sont :

- une structure sociale villageoise et une organisation du village dans l'espace;
- les membres de la communauté appartiennent au même lignage, ou à un nombre limité de lignage;
- ils ont en commun, des liens historiques et mystiques avec le lieu et exploitent un paysage physiquement compartimenté dont les droits d'exploitation sont divers, mais bien définis.

Conformément à ce système foncier, chaque portion de terroir villageois est gérée par un groupe familial et cela depuis la fondation du village. Ces pratiques sont souples quand il s'agit simplement de faire des cultures annuelles. Dans ce cas, quelque soit le statut de la famille, elle a accès à la terre. Par contre, les activités de production fruitière, de reboisement ou d'aménagement foncier (construction de diguette par exemple) qui sont des investissements importants peuvent se buter contre les pratiques foncières : seuls les descendants du premier occupant d'un espace donné y ont le droit de faire de tels investissements.

14.3 Les activités de production

14.3.1 Rappels

Depuis les temps reculés, la zone soudanienne ouest africaine est occupée par des peuples vivant essentiellement de productions céréalières (mil, sorgho, maïs) et de tubercules (surtout igname) auxquelles s'ajoutent de nombreuses autres cultures de moindre importance dans les

exploitations. Plus tard, l'élevage bovin a été introduit et a pris un caractère sédentaire par opposition à la transhumance pratiquée plus au nord, dans la zone sahélienne.

A partir des années 1970, le domaine soudanien est, au Mali et dans les pays voisins, un important espace de mise en application des politiques modernes de développement agricole (Piéri, 1989). Ces politiques visent à faire des cultures cotonnière et arachidière le moteur du développement rural. Des capitaux considérables ont été investis à travers des projets confiés aux services techniques gouvernementaux.

Cette nouvelle vocation du domaine soudanien, dans un contexte de forte pression démographique, est à l'origine de nombreux problèmes environnementaux (destruction du couvert végétal, baisse de fertilité des terres et érosion).

La recherche de solutions durables pour les agrosystèmes soudaniens reste d'actualité.

14.3.2 Agriculture

L'agriculture est diversifiée et l'on peut distinguer 3 groupes de cultures:

- les céréales (sorgho, maïs, riz) produites essentiellement pour l'autoconsommation ;
- les légumineuses (arachide, niébé) sont destinées à l'autoconsommation et au commerce ;
- la culture commerciale du coton qui bénéficie d'une attention particulière auprès du ministère de l'agriculture.

Les techniques culturales sont basées sur la traction animale et la pratique manuelle. La mécanisation touche surtout la préparation du sol (labour).

14.3.3 Elevage

L'élevage, bien que diversifié (bovin, ovin, caprin, volaille) reste une activité marginale. Il est extensif sur des pâturages naturels non aménagés. En saison des pluies, pendant que les cultures sont sur pied, les troupeaux sont bien gardés avec pacage de nuit près des habitations. En saison sèche, la surveillance des animaux est négligée et c'est la divagation.

14.3.3 Exploitation des ressources forestière

L'essentiel des besoins énergétiques est couvert avec le bois et le charbon d'où une forte exploitation des ressources ligneuses. L'exploitation forestière doit permettre aussi la satisfaction des besoins en bois d'œuvre. Il faut noter que toutes ces ressources forestières font de plus en plus l'objet de commerce en direction de Bamako.

Une fonction non négligeable de la forêt ici, est la fourniture de produits de cueillette (noix de karité, gousses de néré) qui sont traités avec des technologies locales puis autoconsommés et commercialisés.

De nombreuses autres activités sont pratiquées de façon secondaire en particulier la pêche, la chasse, l'artisanat et le commerce.

1.5 Conclusions

Le bassin versant de Djitiko est situé en zone soudanienne dont les caractéristiques climatiques essentielles sont un régime pluviométrique monomodal, l'existence d'une longue saison sèche (5 à 6 mois) et une forte évapotranspiration durant la majeure partie de l'année. Cette situation pèse sur la disponibilité des ressources en eaux (eaux de surface et nappes). Elle conduit, au niveau des écosystèmes, à un ralentissement considérable de nombreux processus géodynamiques et biologiques pendant plusieurs mois.

Le substratum géologique, formé de granites et de schistes, est couvert d'un manteau d'altération de 20 à 30 m d'épaisseur. Les matériaux superficiels comprennent la cuirasse et ses débris gravillonnaires, les argiles et argiles sableuses. Concernant le relief, l'altitude varie de 350 à 400 m pour la majeure partie du bassin versant et est de 335m à l'exutoire.

L'environnement végétal est variable d'une unité physiographique à l'autre et cela aux points de vue composition floristique et physionomie. On note la présence de zones boisées et de zones essentiellement arbustives et herbacées. Dans toutes les situations du bassin, le couvert herbacé semble trouver des conditions favorables à son développement.

La densité de population reste faible comparativement à celles enregistrées dans de nombreuses zones rurales du domaine soudanien au Mali et en Afrique occidentale.

Les systèmes de production sont en profonde mutation avec le développement de la culture commerciale du coton. La généralisation du labour à la charrue, un aspect de cette mutation, conduit comme ailleurs dans la zone soudanienne, à l'accentuation des risques de dégradation environnementale (destruction du couvert végétal, baisse de fertilité et l'érosion des sols). Ainsi dans le bassin versant de Djitiko, comme dans le reste du Sud du Mali, les paysans se plaignent d'une nette accentuation de l'érosion des sols. Il faut noter que cette zone, comme le reste du Mali, n'a pas été couverte par les programmes internationaux d'étude expérimentale de l'érosion et du ruissellement au cours des années 1960 à 1990. Les données disponibles sur la question sont celles découlant de mesures hydrologiques. Elles montrent une faible dégradation spécifique pour le bassin versant de Djitiko mais supérieure à celle du bassin supérieur du Niger. Dans ces hydrosystèmes, la question longtemps posée est : que se passe-t-il entre les versants et l'exutoire ?

CHAPITRE II

CARACTERISATION DES UNITES MORPHOPEDOLOGIQUES ET DES ETATS DE SURFACE DU BASSIN VERSANT DE DJITIKO

2.1 Introduction

Ce deuxième chapitre, consacré à l'étude des sols et des états de surface du bassin versant de Djitiko complètent les caractéristiques géologiques et géomorphologiques présentées au chapitre I et serviront de données de base pour :

- l'interprétation des résultats expérimentaux des chapitres suivants ;
- la comparaison à différentes échelles ;
- la formulation des propositions pour le développement et les recherches futures.

2.2. Les sols et les unités morphopédologiques

22.1 Définitions et concepts.

22.1.1 Sol et couverture pédologique

Ce qu'on appelle habituellement le "sol" en pédologie est un objet naturel, continu et tridimensionnel, nommé couverture pédologique dans le Référentiel Pédologique de 1992 (AFES, 1992).

Les couvertures pédologiques sont formées sous l'influence des facteurs climatiques et biologiques, aux dépens du matériau minéral (substratum géologique). Elles sont aussi en perpétuelle évolution sous l'influence des mêmes facteurs d'où une autre dimension : la durée.

La couverture pédologique influence profondément le fonctionnement et les transformations de l'écosystème et du relief, avec lesquels elle se développe (Ruellan et Dosso, 1993). De ce fait la connaissance des sols dans un environnement donné est d'une grande importance pour la compréhension des autres aspects de cet environnement, par exemple érosion, qualité des eaux et transfert de polluants dans les bassins versants.

22.1.2 Représentation cartographique des sols

Un des aspects importants de l'étude des sols est la représentation cartographique qui est une opération de synthèse. Elle vise à replacer chaque unité sol dans le paysage, à mettre en relief les relations qui existent entre chaque type de sol et son milieu, et enfin, à montrer les interactions qui peuvent apparaître entre sols voisins (Duchaufour, 1997). La mise au point d'une carte des sols exige un double choix : le choix des unités à représenter et celui du mode de représentation. Ces choix sont le plus souvent fonction de l'échelle et de l'objectif poursuivi.

*** Choix des unités cartographiques**

Dans le cas le plus simple, l'unité typologique de sol (UTS) correspond à l'unité cartographique de sol (UCS) (Duchaufour, 1997). Cela suppose que l'échelle de la carte permet de représenter des unités typologiques bien individualisées lors des relevés.

Dans le cas le plus fréquent, les UTS ne peuvent pas faire l'objet d'une représentation séparée sur la carte et cela pour deux raisons principales : soit l'échelle choisie ne le permet pas, soit les sols variant d'un point à l'autre forment des mosaïques. Alors, le choix est de représenter sur la carte, des UCS qui regroupent plusieurs UTS ; cependant, il convient de préciser les liens géomorphologiques ou génétiques qui unissent les UTS au sein des UCS (chaînes, séquences et juxtaposition de sols).

Tricart et Killian ont particulièrement insisté sur la prise en compte des aspects géomorphologiques dans la cartographie des sols (Killian, 1974 ; Tricart 1974; Tricart et Killian , 1979). Ils ont proposé un diagnostic conduisant à des cartes où sont représentées **des unités morphopédologiques**. Ces dernières peuvent être conçues comme des portions de territoire où coexistent ensembles géomorphologiques et unités de sols correspondants. L'unité morphopédologique doit être caractérisée à partir des processus complexes de morphogenèse et de pédogenèse étroitement associés les uns aux autres. Il s'agit de processus qui sont à l'origine de la forme et de la structure des unités et qui leur confèrent une dynamique d'évolution spécifique.

* Mode de représentation

Il doit être adapté au problème posé (Duchaufour, 1997) : représentation synthétique, représentation analytique, représentation mixte, etc. Une différence importante entre les modes de représentation réside dans le choix des éléments à figurer sur la carte (trait génétique, type de matériau, indications sur la géomorphologie, la végétation etc.).

22.1.3 Types d'information recherchée et étude des sols

L'étude des sols peut être envisagée pour différentes préoccupations parmi lesquelles, Baize et Jabiol (1995) en citent six. Les sols peuvent être étudiés :

- en tant qu'objets naturels spécifiques : pédologie fondamentale ;
- en tant que facteurs d'une production agricole : pédologie appliquée à l'agronomie (agropédologie);
- en tant que facteurs d'une production forestière : pédologie appliquée à la sylviculture ;
- en tant qu'éléments fondamentaux de notre environnement (écosystèmes terrestres et paysage rural) : écologie générale, géomorphologie, géologie des formations superficielles, etc.
- en tant que milieu de vie de certains organismes vivant dans le sol : écologie et biologie de ces organismes;
- en tant que milieu capable de dégrader nos déchets et d'épurer nos effluents.

Ici, notre étude vise la connaissance des couvertures pédologiques en tant que facteurs de production agricole et ressources dont la dégradation (baisse de fertilité, érosion) inquiète de plus en plus les communautés vivant de son exploitation.

Ainsi cette étude doit rendre compte de la diversité typologique et des caractéristiques des sols, en particulier, l'épaisseur du profil, la texture, le statut organique et le complexe absorbant. Il s'agit là d'informations recherchées pour aider à la compréhension du comportement des sols du bassin versant sur les plans agronomique, hydrodynamique et érosion. Les méthodes d'étude décrites plus loin ont été choisies en fonction de ces objectifs. Les résultats présentés font ressortir deux points essentiels :

- l'environnement, les caractéristiques pédologiques et l'utilisation actuelle des sols ;
- la distribution spatiale et les relations entre les sols.

Le premier point donne une description des sols en mettant l'accent sur les caractéristiques morphologiques et analytiques essentielles de chaque type de sol observé dans le bassin versant, puis son utilisation actuelle. Par contre, le deuxième point traite des aspects cartographiques et des liens génétiques et morphodynamiques (passés et actuels) entre différents sols.

22.2 Méthodes d'étude

22.2.1 Description morphologique des sols

La caractérisation morphologique des sols a été faite suivant une démarche tout à fait classique.

*** Choix des points d'observation.**

Les points d'observation ont été essentiellement distribués le long des pistes praticables en tenant compte des unités morphologiques initialement décelées sur les photographies aériennes. Au total, 220 points ont été observés dans le bassin versant, mais essentiellement localisés sur environ 50 ha (bas glacis + dépressions). Dans la pratique, le reste du bassin versant, (les milieux cuirassés) a été vite compris du point de vue morphopédologique avec seulement quelques observations.

*** Les points d'observations**

Elles incluent des cavités trouvées sur place (ravines, point de prélèvement de banco pour construction, etc.), des sondages à la tarière, des fosses pédologiques (3 à 5 par unité morphopédologique). Les fosses pédologiques, irremplaçables pour accéder à une bonne connaissance de la morphologie des sols, ont été ouvertes à partir des premières informations

fournies par l'examen de cavités et trous de tarière. Nous avons fait des fosses mesurant 1 m de long, 0,80 m de large et au maximum 1,20 m de profondeur. Les descriptions détaillées ont porté sur 3 profils par unité morphopédologique.

* Description des sols sur le terrain

Les descriptions ont été faites en indiquant par horizon : l'épaisseur, la couleur à l'état humide (utilisation du code Munsell), la texture, la présence des éléments grossiers, la structure, la porosité et enfin l'enracinement et l'activité biologique. Ce travail de description morphologique a conduit au choix de profils représentatifs des unités et à des prélèvements d'échantillons pour analyses de laboratoire.

22.2.2 Méthodes d'analyse d'échantillons de sols au laboratoire

Il faut d'abord préciser que les analyses¹ ont porté sur différents types d'échantillons :

- 12 échantillons pédologiques représentant 4 profils. Ces échantillons ont été prélevés en mars 1997.

- 47 échantillons agronomiques dont 14 prélevés en juin 1997 et 33 en février 2000. Il s'agit d'échantillons moyens de l'horizon de surface (0-10 cm) prélevés sur les parcelles expérimentales. Un échantillon moyen est issu de prélèvements en 3 points différents. Sur chaque site et par période de prélèvement, les échantillons moyens, au nombre de 3 sont issus de 9 points de prélèvement.

Les méthodes d'analyses utilisées sont données en annexe.

22. 2.3 Cartographie

Une première campagne de cartographie a permis l'établissement d'une esquisse morphopédologique (Diallo, 1995). Par la suite, l'acquisition de données pédologiques et géomorphologiques plus fines, a permis de revoir les limites entre unités cartographiques. En outre, la disponibilité d'outil informatique a permis d'améliorer nettement le premier travail.

Les étapes de cette cartographie ont été :

- Photo-interprétation avant et après description sur le terrain. La couverture aérienne disponible est au 1/50 000 : mission 74 MAL 20/500 , photos 58 et 87 à 90
- Etablissement d'une carte sur papier calque;
- Scannérisation;

¹ Toutes les analyses ont été faites au CIRAD et à l'IRD (Agropolis, Montpellier)

- Amélioration de la présentation avec le logiciel Map info.

22. 3 Les typologies pédologiques identifiées dans le bassin versant de Djitiko

22.3.1 Désignation des sols

Dans le bassin versant nous avons identifié 7 unités typologiques de sol (UTS) données au tableau 2.1. Elles ont été situées dans la classification paysanne locale et dans la classification française des sols (CPCS, 1969). Les schémas des différents profils observés sont donnés à la figure 2.1. L'ensemble des résultats d'analyses pédologiques classiques sont donnés à l'Annexe II-2.

Tableau. 2.1 : Les unités typologiques de sol (UTS)
du bassin versant de Djitiko

Unité typologique de sol (UTS)	Désignation dans la classification paysanne locale	Désignation dans la classification française (CPCS, 1967)
UTS1 Sol caillouteux sur roche en altération	<i>Kuru dugukolo</i>	Régosol
UTS2 Sol brun	<i>Bogo dugukolo</i>	Sol brun vertique
UTS3 Sol gravillonnaire peu épais sur cuirasse	<i>Bèrè dugukolo</i>	Sol peu évolué d'érosion
UTS4 Sol jaune	<i>Bilin</i>	Sol ferrugineux tropical jaune
UTS5 Sol rouge		Sol ferrugineux tropical rouge
UTS6 Sol beige	<i>Bida dugukolo</i>	Sol ferrugineux tropical à pseudogley
UTS7 Sol épais sur alluvions	<i>Fara dugukolo</i>	Sol hydromorphe minéral à gley oxydé

Commentaire sur le système paysan local de classification des terres

Dans de nombreuses situations en Afrique, les études ont montré que les paysans ont de bonnes connaissances de leur milieu physique et en particulier un système pertinent de classification des terres qu'ils cultivent (par exemple, Blanc Pammard, 1988 et 1990; Camara, 1990, Warren, 1992, Diallo et Keita., 1995, Diallo et al., 1998). Nous avons pu vérifier ce constat chez les paysans malinkés dans le bassin versant de Djitiko. Ici, la classification des terres se fait essentiellement par référence au modelé et au matériau de surface (texture en particulier). Ainsi :

- *Kuru* qui signifie colline donne son nom au sol (= *dugukolo*) localisé sur les collines birrimiennes observées dans le bassin versant.

- *bilin* est la désignation donnée aux sols à cause de leur position au contrebas immédiat du glacis cuirassé.

- *bida* fait allusion à un terrain de type bas glacis ou bas-fonds bien drainé avec des sols sans élément grossier.

- *fara* désigne marigot et les sols localisés en milieu inondable reçoivent la désignation *fara dugukolo*

- Enfin, en faisant allusion à la texture de la couche superficielle du sol que les paysans donnent les désignations *bogo* (terrain argileux), *bèrè* (terrain graveleux).

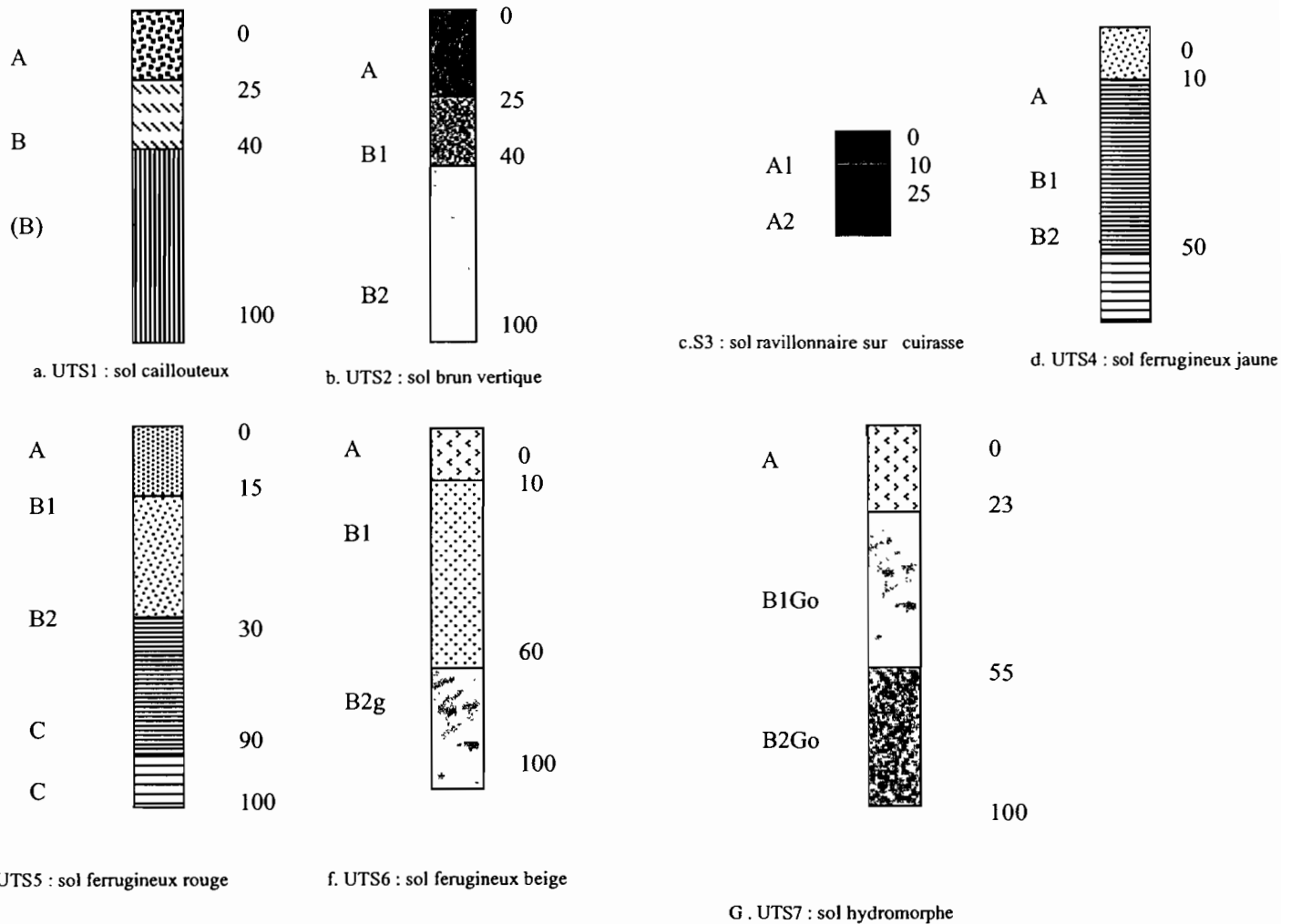


Figure 2.1 : Schéma des profils pédologiques du bassin versant de Djitiko

NB : Désignation des horizons pédologiques

A : horizon de surface contenant de la matière organique

A1: horizon de surface, mixte (mélange de la matière organique et de matière minérale)

A2 : horizon de surface pauvre en matière organique

(B) : B "structural" ou d'altération

B : horizon enrichi par illuviation

C: matériau originel du sol

g : pseudogley

Go : gley oxydé

22.3.2 Environnement, caractéristiques et utilisation actuelle des sols

22.3.2.1 UTS1 : sol caillouteux

Environnement du profil.

Sur les versants des collines birrimiennes les pentes sont fortes pour la région (20 à 30 %). On peut observer des roches à l'affleurement (schiste, dolérite), de nombreux fragments de roche et de cuirasse ferrugineuse.

La végétation ligneuse est clairsemée et les individus (arbres et arbustes) sont le plus souvent effilés. Les espèces observées sont *Pterocarpus erinaceus*, *Burkea africana*, *Vitellaria paradoxa*, *Combretum glutinosum* et diverses autres combrétacées. Par contre, la végétation herbacée est très dense (en saison de pluie) avec *Andropogon gayanus* et *Hyparrhenia dissoluta* comme espèces dominantes ; elle recouvre le sol d'un manteau continu jusqu'aux feux de brousse allumés chaque année, après la saison des pluies.

Le drainage externe est naturellement excessif.

Morphologie du profil (fig2.1.a)

Le profil est formé de 3 horizons majeurs qui se distinguent principalement par la couleur et l'état de désagregation des roches.

- **Horizon 1- A** : 10 –10 cm ; brun sombre en humide (7,5YR3/4) ; sable argileux graveleux ; matériau fin légèrement collant ; nombreuses racines de graminées; porosité très forte (présence de nombreuses fentes); drainage interne élevé.

- **Horizon 2 - B** : 10 - 30 à 40 cm ; brun rougeâtre sombre à l'état humide (2,5YR3/4) ; argile sableuse graveleuse; matériau collant, porosité élevée, bonne activité biologique dans le profil, aération et bon drainage; bon développement des racelles, à l'opposé des grosses racines d'arbre.

- **Horizon 3 -(B)** : horizon très épais, apparaissant à partir d'environ 40 cm de profondeur. Son contact avec la roche saine n'a pas été observé. La principale différence avec l'horizon précédent est la présence de la roche faiblement altérée.

Texture et matière organique

Les taux d'éléments grossiers déterminés au laboratoire sont respectivement 45 et 30 % pour les horizons A et B. Dans ces horizons, la terre fine contient respectivement 20 et 28 % d'argile. Le taux de limon change peu de A à B; il est voisin de 30 %. Par contre, on note une légère diminution du taux de sable : 49% en A contre 40 % en B. Qu'il s'agisse de limon ou de sable, la fraction grossière est toujours plus importante.

Caractéristiques du complexe absorbant et pH

La capacité d'échange cationique (CEC), de même que la somme des bases échangeables (S) sont faibles dans les deux horizons, A et B : la CEC est de 5,4 méq /100g de terre en A et de 3,2 méq /100g en B ; les valeurs de S sont respectivement 4,5 et 2,9 méq/100g de terre en A et B. Le taux de saturation du complexe absorbant est de 84 % en A et 90% en B. Les équilibres entre différentes bases échangeables, Ca/Mg ; Mg/K; (Ca + Mg)/K sont normaux. Dans l'ensemble du profil la réaction est neutre (pH eau voisin de 7).

Utilisation actuelle

Les discussions avec les paysans font ressortir que la protection des cultures contre les adventices (un des principaux goulots d'étranglement des agricultures soudanaises) est plus facile sur le sol caillouteux que sur les autres sols (sols ferrugineux tropicaux et bruns vertiques). C'est pourquoi, il était beaucoup plus cultivé il y a 30 à 40 ans dans un contexte d'agriculture strictement manuelle et où les conditions pluviométriques rendaient les autres sols très humides.

A Ouronina, un des deux villages disposant de sols caillouteux, on note une nette perte de motivation pour sa mise en culture. Cela est une conséquence de la forte mécanisation agricole qui pousse les paysans à abandonner ces sols. Cependant à Tiko, son exploitation reste non négligeable.

Les cultures pratiquées sur ce sol de colline sont les céréales traditionnelles de la région (sorgho et mil). Les techniques culturales sont manuelles : piochage et désherbage.

Comme partout dans le domaine soudanais du Mali, les terrains ne portant pas de culture sont utilisés comme pâturages. Ce sont aussi des lieux de coupe de bois (pour énergie domestique et autres besoins), de fauchage de paille pour la confection des toitures de case et aussi de prélèvement de feuilles et racines de ligneux pour servir de médicaments.

22.3.2.2 UTS2 : sol brun vertique

Environnement.

Dans le bassin versant de Djitiko, le sol brun vertique est localisé au pied des collines birrimiennes. Sa position morphologique, déprimée, est localisée entre les collines à l'amont et les moyens glacis cuirassés à l'aval. Les eaux de ruissellement s'y accumulent fortement avant de s'évacuer par les drains (ravines) quelques heures plus tard. Il faut noter que le caractère déprimé est plus prononcé du côté sud des collines que sur les côtés nord et nord est. Cette situation se traduit par une différence de pédoclimat. Ce dernier, tout au moins pendant la saison pluvieuse, est nettement plus humide au sud.

La strate ligneuse comprend surtout des espèces épineuses (*Acacia sp*, *Zizuphus mauritiana*), mais aussi *Terminalia avicenoides*, *Anogeissus leiocarpus*, *Ficus niaphalocarpa*, etc. La strate herbacée qui devient difficilement pénétrable de juillet à novembre (à cause de la forte densité et de la haute taille) est dominée par *Pennisetum pedicelatum* et *Andropogon gayanus*.

Morphologie du profil

Le profil, formé de 3 horizons majeurs, mesure 80 à 100 cm d'épaisseur (fig.2.1.b)

- **Horizon 1- A** : 0 - 25 cm ; brun grisâtre très sombre à l'état humide (10YR3/2) ; limon sablo-argileux ; matériau meuble, peu fragile à l'état sec, friable et collant à l'état humide ; structure polyédrique fine bien développée, à agrégats plus ou moins arrondis; nombreuses fentes de dessiccation et forte porosité tubulaire, forte activité biologique (présence de racines et de coprolithes), drainage interne élevé.

- **Horizon 2 - B1** : 25 – 40 cm ; brun jaune clair à l'état humide (10YR 6/4) ; sable argileux; matériau, peu fragile et peu friable ; structure polyédrique moyenne, nombreuses fentes de dessiccation en saison sèche ; porosité élevée; comportement normal des racines ; drainage interne moyennement bon.

- **Horizon 3 -B2** : 40 - 100 cm ; brun pâle à l'état humide (10YR6/3); argile sableuse, matériau non fragile et peu friable ; structure polyédrique moyenne, bonne porosité et activité biologique moyenne.

Le profil a des caractéristiques morphologiques favorables, en particulier son état structural. La forte porosité permet de prévoir de bonnes conditions de circulation d'eau et aussi une bonne activité biologique dans le profil.

Texture et matière organique

Dans l'ensemble du profil, le taux d'argile varie peu et reste inférieur à 30 %, soit 300g.kg⁻¹ de sol. Sa variabilité spatiale semble être également limitée, en ce qui concerne l'horizon de

surface (Tab. 2.2). Le taux de limon diminue avec la profondeur (plus de 50 % en A et 34 % en B2). Le taux de sable est légèrement inférieur à 20 % dans l'horizon de surface où l'on note au moins deux fois plus de sable fin que de sable grossier. Les autres horizons contiennent 30 à 35 % de sable. Le taux de matière organique est élevé dans l'horizon de surface (4%). Il diminue nettement dans le reste du profil : les valeurs mesurées sont 1% en B1 et 0,5 % en B2. Le rapport C/N est toujours de l'ordre de 15 à 16, d'où une matière organique relativement peu décomposée.

Caractéristiques du complexe absorbant et pH

Dans l'horizon de surface la CEC est forte (27,1 méq/100g de terre), de même que la somme des bases échangeables (25,1 méq/100g de terre). La capacité d'échange cationique devient moyenne dans les horizons sous-jacents (15 méq/100g de terre) alors que la somme des bases échangeables reste forte. Le taux de saturation du complexe d'échange (compris entre 90 et 100 % en surface et 80 à 90 % en profondeur) indique un sol quasi saturé.

En ce qui concerne les équilibres entre les bases échangeables, dans l'horizon de surface les rapports $\text{Ca/Mg} = 3$ et $\text{Mg/K} = 16$ sont normaux, alors que $(\text{Ca} + \text{Mg})/\text{K} = 62$ est trop fort. Par contre, en profondeur seul le rapport Ca/Mg est normal, les autres étant trop forts. Dans l'ensemble le sol semble être particulièrement riche en calcium et magnésium, une situation qui peut s'expliquer par les données géologiques (présence de roches basiques dans le substratum) et topographique (dépression favorable à l'accumulation des bases dans le profil).

Les mesures de pH donnent pour l'horizon de surface, une réaction légèrement alcaline (pH eau voisin de 7,3) alors que le reste du profil est neutre.

Utilisation actuelle

La bonne fertilité du sol brun vertique est signalée par les paysans et confirmée par les données pédologiques. Toutes les cultures pratiquées dans la zone y sont possibles. Cependant les paysans se plaignent de la fragilité du sol, en particulier si le labour mécanique est pratiqué comme mode de préparation du sol. Deux problèmes principaux sont fréquemment signalés par les paysans qui cultivent ce sol :

- le décapage de l'horizon de surface par les eaux de ruissellement;
- le fort potentiel d'enherbement.

Tableau. 2.2 : Caractéristiques granulométriques de la couche superficielle (0-10 cm) du sol brun vertique (UST2)du bassin versant de Djitiko

Fractions granulométriques	1	2	3	4	5	6	7	Moy.	Ecart-type
Argile (%)	26,1	27	27,2	27	23,9	25,5	27,9	26,4	1,2
Limon fin (%)	31,7	34,9	29,2	31,6	37,2	38	35,5	34,0	3,0
Limongrossier (%)	24,2	25,3	26,7	26,4	20	19,1	24,2	23,7	2,8
Sable fin (%)	11,9	9,4	11,9	9,7	13,6	12,6	7,2	10,9	2,1
Sable grossier (%)	6	3,4	5	5,4	3,3	3,3	5,1	4,8	1,0

22.3.2.3 UTS3 : sol gravillonnaire

Environnement

Le modelé est un moyen glacis cuirassé avec 2% de pente. La cuirasse ferrugineuse est observée localement à l'affleurement. Ailleurs, elle est entièrement couverte par un matériau graveleux avec une quantité plus ou moins importante de blocs. Cette cuirasse ancienne est soumise à une action de désagrégation progressive dont les agents semblent être le système racinaire des arbres et la macrofaune (en particulier, termites, rats et divers myriapodes). Dans les deux cas il s'agit d'action à la fois mécanique et chimique.

La végétation ligneuse est essentiellement arbustive avec de nombreuses espèces , notamment *Lanea sp*, *Detarium microcarpa*, *Entada africana*, *Pterocarpus erinaceus*, *Vitellaria paradoxa*, *Saba senegalensis*, et diverses combrétacées etc. La végétation herbacée comporte, par ordre de fréquence *Hypparhenia dissoluta*, *Loudetia togoensis* et *Andropogon gayanus*.

Morphologie du profil (fig.2.1.c)

Le profil a une épaisseur variable de 20 à 40 cm de matériaux graveleux brun à brun jaunâtre , reposant sur une cuirasse ferrugineuse. C'est un profil de type AC :

-Horizon1- A1 : 0 - 10cm ; brun à l'état humide (10YR4/3), sable argileux graveleux, fragile et friable; peu structuré ; faible développement du système racinaire des espèces ligneuses.

- Horizon2- A2 : 10 - 30 cm ; brun jaunâtre à l'état humide (10YR5/4) ; sable argileux graveleux ; fragile et friable ; peu structuré ; racines d'orientation subhorizontale.

> 40 cm : cuirasse ferrugineuse. Cette cuirasse est cohérente et son épaisseur, d'après les forages, peut atteindre 20 m. Sa perméabilité semble être bonne, aucun signe d'engorgement n'ayant été observé à la base des profils pédologiques.

Ce profil présente deux contraintes morphologiques sévères : la forte charge graveleuse et la présence de la cuirasse ferrugineuse cohérente à faible profondeur.

Texture et matière organique

Le matériau pédologique est principalement grossier (60 à 70% de refus). La terre fine, essentiellement formée de sable (57%), varie peu dans le profil ; les taux de sable grossier et de sable fin diffèrent peu. Le tableau. 2.3 en donne des précisions à propos de l'horizon 0-10 cm.

Tableau. 2.3 : Caractéristiques granulométriques de la couche superficielle (0-10 cm) du sol gravillonnaire (UST3) du bassin versant de Djitiko

Fractions granulométriques	1	2	3	4	Moyenne	Ecart-type
Argile (%)	12	19,4	16,5	14,3	15,6	2,7
Limon fin (%)	9,0	9,9	8,0	10,4	9,3	0,9
Limon grossier (%)	21,7	21,3	21,2	23,4	21,9	0,9
Sable fin (%)	26,5	18,6	19,6	22,2	21,7	3,1
Sable grossier (%)	30,8	30,7	34,6	29,8	31,5	1,8

En considérant la totalité du matériau en place (refus + terre fine), le taux d'argile est très faible (5 à 6%), nettement inférieur à la quantité indispensable pour la formation d'agrégat. Christopher (1996) estime cette quantité à au moins 15 %.

Caractéristiques du complexe absorbant et pH

La capacité d'échange cationique est faible dans les deux horizons (respectivement 5,4 et 3,2 méq /100g de terre). Par contre, la somme des bases échangeables est moyenne dans le premier (4,5 méq /100g de terre) et faible (2,9 méq /100g de terre) dans le second. Le complexe d'échange est saturé à tous les niveaux (environ 90 %). Les équilibres entre les bases échangeables sont normaux. L'horizon 0-10 cm est légèrement alcalin alors que l'horizon sous-jacent est neutre.

Utilisation actuelle

Les populations locales reconnaissent le caractère marginal du sol gravillonnaire. En conséquence, il n'est généralement pas choisi pour l'installation des grandes parcelles familiales. Par contre des microparcelles d'arachide (0,25 ha en moyenne) sont dispersées sur ce sol. Il s'agit de parcelles appartenant aux femmes. Leur premier objectif est la satisfaction

des besoins des ménages en arachide de bouche, mais les éventuels surplus sont commercialisés.

Toutes les femmes enquêtées pensent que l'utilisation de l'UTS3 est avantageuse pour la maîtrise des adventices. Ce qui semble être gênant est que le sol est seulement convenable pour l'arachide. Ainsi, beaucoup de femmes désirant produire du gombo, cherchent d'autres types de sol.

22.3.2.4 UTS4 : Sol ferrugineux tropical jaune

Environnement

L'UTS4 est toujours localisée sur la partie amont du bas glacis, en contrebas immédiat du glacis cuirassé.

La végétation ligneuse est soit extrêmement clairsemée, soit se présente sous forme de bosquets. Les espèces fréquentes sont *Bombax costatum*, *Pterocarpus erinaceus*, *Isobertia doka*. La strate herbacée, à l'opposé des arbres, pousse bien sur l'UTS4 et l'espèce dominante est *Loudetia togoensis*. Parmi les autres espèces observées, il faut citer *Hypparhenia dissoluta* et *Andropogon gayanus*.

Le segment de toposéquence occupé par le sol ferrugineux jaune, apparaît en maints endroits comme un champ de termitières. Il s'agit toujours de termitières à chapeau. Leur forte densité est décelée sur les photographies aériennes par la présence de taches blanchâtres caractéristiques.

Pendant les périodes de fortes pluies, des excès d'eau, envoyés par le glacis cuirassé viennent s'accumuler en surface, par endroits.

Morphologie du profil (fig.2.1.d)

L'épaisseur totale du profil est comprise entre 55 et 75 cm. C'est un matériau sans élément grossier qui repose sur la cuirasse ferrugineuse. Cette dernière, bien que très filtrant, semble ralentir quelque peu, le drainage interne pendant les périodes de fortes pluies successives.

-Horizon1- A : 0 - 10 cm ; brun jaunâtre à l'état humide (10 YR5/6) ; limon sablo-argileux; matériau fragile et friable; structure massive; forte porosité tubulaire ; forte activité biologique (termite) et nombreuses racines .

- Horizon2- B1 : 10 - 50 cm ; brun jaune à l'état humide (10YR 7/6); argile sableuse ; matériau fragile et friable ; structure fragmentaire polyédrique ; poreux (porosité fine) ; racines saines, activité biologique forte.

- **Horizon 3- B2** : 50 - 75 cm; jaune à l'état humide (10YR 8/6), argile sableuse; quelques taches rouilles et nodules ferrugineuses; matériau fragile et friable ; structure fragmentaire polyédrique, peu poreux à porosité fine .

Utilisation actuelle

Les populations locales attribuent au sol jaune, une vocation essentiellement rizicole (riziculture pluviale). Il est actuellement très peu cultivé, suite à la dégradation des conditions de cette riziculture. On sait que dans cette zone bioclimatique, les précipitations annuelles ont considérablement diminué à partir du début des années 1970 (Hubert et Carbonel, 1987 ; Le Borgne, 1987).

22.3.2.5 UTS5 : sol ferrugineux tropical rouge

Environnement

Le sol ferrugineux rouge (UTS5) est toujours situé sur le bas glacis dans le prolongement du sol ferrugineux jaune (UTS4) et en amont du sol hydromorphe (UTS7). Il n'est observé que dans la partie aval du bassin versant.

Morphologie du profil (fig.2.2.e)

Le sol est épais (90 à plus de 100 cm) et formé de 3 horizons majeurs. La présence des oxyhydroxydes de fer (manifestée par la coloration d'aspect rougeâtre à jaunâtre selon la profondeur), est de plus en plus importante de la surface en profondeur. Dans le même sens, la cohérence des matériaux augmente.

-**Horizon1- A** : 0 - 15 cm ; brun jaunâtre sombre à l'état humide (10YR4/4); limon sablo- argileux à argile sableuse fragile et friable; structure massive, très poreux (porosité fine); très nombreuses racines.

- **Horizon2- B1** : 15 - 30 cm ; brun jaunâtre à l'état humide (10YR 5/6) ; argileux; non fragile, et peu friable ; structure polyédrique moyenne , poreux (porosité fine); nombreuses racines.

- **Horizon 3- B2** : 30 - 90 cm d'épaisseur ; brun jaunâtre (10YR 5/8), argile sableuse; structure polyédrique ; peu poreux à porosité fine.

- **Horizon 4 -C** : 90-120 cm : couleur jaune brunâtre (10YR6/8), quelques taches rouilles et nodules ferrugineuses ; argile sableuse , structure polyédrique peu nette ; peu poreux à porosité fine, peu de racines, activité biologique faible.

Le principal problème morphologique de ce sol semble être son état structural : risque élevé de dégradation par la prise en masse.

Texture et matière organique

Le profil ne contient pas d'élément grossier dans sa partie supérieure. Seulement quelques gravillons (moins de 2%) sont observés dans la partie inférieure, au contact avec la cuirasse. Le taux d'argile est de 25 % dans l'horizon de surface et de 30 à 34 % dans les horizons sous-jacents. Le taux de limon dépasse 50 % dans les deux premiers horizons et est voisin de 45 % en profondeur. Dans tous les horizons, il existe plus de limon grossier que de limon fin : par exemple 38 % contre 21 % en A et 36% contre 20% en B1. Le taux de sable fin est de 10 à 20 % selon la profondeur, alors que le taux de sable grossier reste nettement plus faible (2,5 à 5%). Il faut remarquer que le sol ferrugineux à l'étude a un horizon de surface nettement plus riche en argile que ceux des sols ferrugineux tropicaux développés sur substratum gréseux.

La teneur en matière organique est de 2% en surface et diminue progressivement jusqu'à 0,4 % à 1m de profondeur. Il faut préciser que la valeur donnée pour l'horizon de surface est mesurée dans une jachère de plus de 15 ans. Les mesures faites sur des échantillons provenant des champs paysans (plus de 5 ans de culture) indiquent 1% de matière organique dans la couche 0-10 cm. Les rapports C/N sont élevés dans les horizons de surface (14 à 16), d'où une matière organique relativement mal décomposée et pauvre en azote.

Caractéristiques du complexe absorbant et pH

La CEC est généralement faible dans tous les horizons (< 10 méq./100 g de terre). La somme des bases échangeables est faible à moyenne dans l'ensemble du profil. Pour l'horizon de surface par exemple, les valeurs mesurées (avec la méthode à l'acétate d'ammonium 1,0N à pH 7,00 par percolation) sont de 8 à 10 méq./100 g de terre dans les jachères et seulement 4 méq./100 g de terre dans les champs paysans. Le taux de saturation est fort et varie de 75 à 90 %. En ce qui concerne les équilibres entre les bases échangeables, les rapports calculés : Ca/Mg ; Mg/K et (Ca +Mg)/K sont tout à fait normaux. Dans l'ensemble du profil, la réaction est neutre.

Utilisation actuelle

Les populations locales pratiquent diverses cultures sur le sol ferrugineux rouge : mil, sorgho, maïs, coton, arachide. Le profil ne contenant pas d'éléments grossiers, la mécanisation ne pose pas de problème. Cependant la fertilité de ce sol n'est pas satisfaisante aux yeux des paysans. Ce point de vue est confirmé par les caractéristiques pédologiques identifiées, en particulier, la mauvaise structure du sol et la faible capacité d'échange cationique.

22.3.2.6 UTS6 : sol ferrugineux tropical beige

Environnement

Comme le sol ferrugineux tropical rouge (UTS5), le sol ferrugineux tropical beige ('UTS6) est toujours observé dans le prolongement direct du sol ferrugineux tropical jaune ('UTS4). Le modelé de terrain a une pente faible (1 à 2%). A l'opposé de UTS5 qui est uniquement inventoriée dans la partie aval du bassin versant, l'UTS6 est observée seulement dans la partie amont.

La végétation est une savane arborée dont les espèces fréquentes sont *Vitellaria paradoxa*, *Parkia bigloboza*, *Daniela oliveri* et *Terminalia avicenoides*. Dans la strate herbacée, *Andropogon gananus* est l'espèce dominante. La végétation observée est dense en maints endroits.

Morphologie du profil (fig.2.1.f)

Il s'agit d'un sol épais (généralement plus de 100 cm), formé de 3 horizons majeurs. La partie inférieure du profil est caractérisée par un drainage déficient d'où le développement d'un pseudogley à ce niveau.

-**Horizon1- A** : 0 - 10 cm ; brun jaunâtre sombre à l'état humide (10 YR4/4) ; limon sablo argileux ; fragile, friable ; structure massive, très poreux (porosité fine) ; nombreuses radicules.

- **Horizon2- B1** : 10 - 60 cm ; brun jaunâtre à l'état humide (10YR5/6) ; argileux ; non fragile, mais friable ; structure polyédrique subanguleuse grossière ; poreux (porosité fine).

- **Horizon 3- Bg** : 60 - 100 cm ; gris clair à l'état humide (10YR 7/2); nombreuses taches rouilles d'oxydation du fer ; argile sableuse ; structure polyédrique subanguleuse grossière ; peu poreux à porosité fine.

Utilisation actuelle

Dans la partie aval du bassin versant, l'UTS6 est recherchée par les paysans pratiquant la culture commerciale du coton. Le sol ne présente aucune contrainte à la mécanisation. Cependant, il semble avoir une mauvaise structure (sensible à la dégradation) comme l'UTS5.

22.3.2.7 UTS7 : sol hydromorphe sur matériau colluvio-alluvial

Environnement

Le sol hydromorphe est localisé le long du réseau de drainage. Le modelé est une bande étroite d'accumulation des matériaux transportés par le marigot et les ravines. Il est complètement

couvert d'eau à l'occasion des crues du marigot et généralement couvert d'au moins une mince lame durant toute la période d'abondance pluvieuse.

La végétation ligneuse naturelle est seulement formée par quelques grands arbres isolés (*Khaya senegalensis*, *Ficus niaphalocarpa*) et localement quelques. Les espèces herbacées adaptées à l'environnement marécageux y poussent bien.

Morphologie du profil (fig.2.2 g)

Le sol est formé sur un dépôt colluvio-alluvial d'épaisseur assez variable (50 à plus de 100 cm). Il évolue dans un environnement tout à fait favorable à une pédogenèse de type hydromorphe. De la surface à 1 m de profondeur, 3 horizons majeurs ont été décrits. Leurs différences essentielles sont la texture, la couleur et la densité des taches d'oxydation du fer.

- **Horizon 1- A** : 0 – 23 cm d'épaisseur; brun grisâtre à l'état humide (10YR5/2) ; taches rouilles associées aux vides, aux éléments structuraux et aux racines ; texture limoneuse fine ; matériau peu fragile, friable et collant ; structure fragmentaire polyédrique moyenne; très poreux ; nombreuses radicelles de graminées, forte activité faunique.

- **Horizon 2- B1Go** : 23 - 55 cm; gris clair à l'état humide (10YR 7/2); limoneuse ; très nombreuses taches d'oxydation du fer (2,5YR6/6), associés aux vides et aux éléments structuraux ; matériau non fragile, peu friable, très collant ; structure fragmentaire polyédrique ; fente de dessiccation et forte porosité tubulaire.

- **Horizon 3- B2Go** : 55 - 100 cm ; gris clair à l'état humide (10YR 7/1), limon argileux ; nombreuses taches d'oxydation de fer, associées aux vides, aux éléments structuraux et aux concrétions ferromanganisifères ; texture limono-argileuse, matériau peu fragile, peu friable, très collant; structure fragmentaire; très poreux et activité biologique moyenne.

Texture et matière organique

Dans tous les horizons le limon est la fraction granulométrique dominante et diminue avec la profondeur (57,6% en A et respectivement 48,6% et 41,9% en B1 et B2) ; le taux de limon grossier avoisine le double de celui du limon fin. Au contraire le taux d'argile augmente légèrement avec la profondeur : respectivement 22,5%, 24,8% et 29,7% dans les horizons 1, 2 et 3. Les taux de sable sont très voisins de ceux de l'argile avec une prépondérance des sables fins : le rapport sable fin/sable grossier est de 4 en surface et 5 en profondeur.

Utilisation actuelle

Les sols hydromorphes sont généralement cultivés toute l'année :

- en saison pluvieuse, les eaux accumulées sont mises à profit pour la riziculture;

- en saison sèche, les nappes sont exploitées avec des techniques manuelles pour faire du maraîchage.

Signalons aussi que des arbres fruitiers sont cultivés dans ces dépressions : manguiers, agrumes, bananiers et goyaviers.

La contrainte principale signalée ici par les paysans est d'ordre hydrologique : le caractère aléatoire des crues lié au comportement pluviométrique.

22.3.3 Distribution spatiale et relations entre les sols

La carte morphopédologique présentée comporte 5 unités :

* Unité 1 : Relief résiduel à sol caillouteux. Elle regroupe l'UTS1 (UTS =unité typologique de sol) précédemment décrite et des affleurements rocheux peu étendus.

* Unité 2 : Dépression à sol brun vertique. C'est une unité cartographique assez homogène, constituée par l'UTS2. Il faut cependant signaler que ce sol semble être plus humide du côté sud de la plus haute colline (567m d'altitude).

* Unité 3: Glacis cuirassé à sol gravillonnaire. Elle regroupe l'UTS3 et les affleurements cuirassés peu étendus.

* Unité 4: Bas glacis à sols ferrugineux. Cette unité regroupe 3 unités typologiques de sol (UTS4, UTS5 et UTS6). Il s'agit tous de ferrugineux tropicaux (CPCS, 1969) dont la première différence apparente est la couleur de l'horizon de surface.

* Unité 5 : Dépression à sol hydromorphe. Il s'agit d'un matériau d'accumulation colluvio-alluviale qui gaine de façon plus ou moins discontinu le cours du marigot Djitiko. Les conditions hydrologiques favorisent une pédogénèse de type hydromorphe d'où la présence exclusive de l'UTS7 dans l'unité cartographique.

Les sols de faible épaisseur sur cuirasse (UTS3) sont observés dans tous les secteurs du bassin versant. Comme le montre la toposéquence¹, ils sont en contact direct avec les sols ferrugineux jaunes (UTS4), situés plus bas. Ces derniers sont suivis, dans la séquence, soit par les sols ferrugineux rouges,UTS5 (cas généralement observé dans la partie amont du bassin versant), soit par les sols ferrugineux à pseudogley, UTS6 (cas général de la partie aval du bassin versant). Le segment occupé par les sols ferrugineux tropicaux est nettement plus long dans la

partie aval du bassin versant où la cuirasse ferrugineuse semble avoir été beaucoup dégradée. Cette distribution des reliefs cuirassés et des sols ferrugineux semble mettre en évidence la complexité géologique du bassin versant, où passe probablement la limite entre les formations birrimiennes et les grès ordoviciens du Plateau Mandingue.

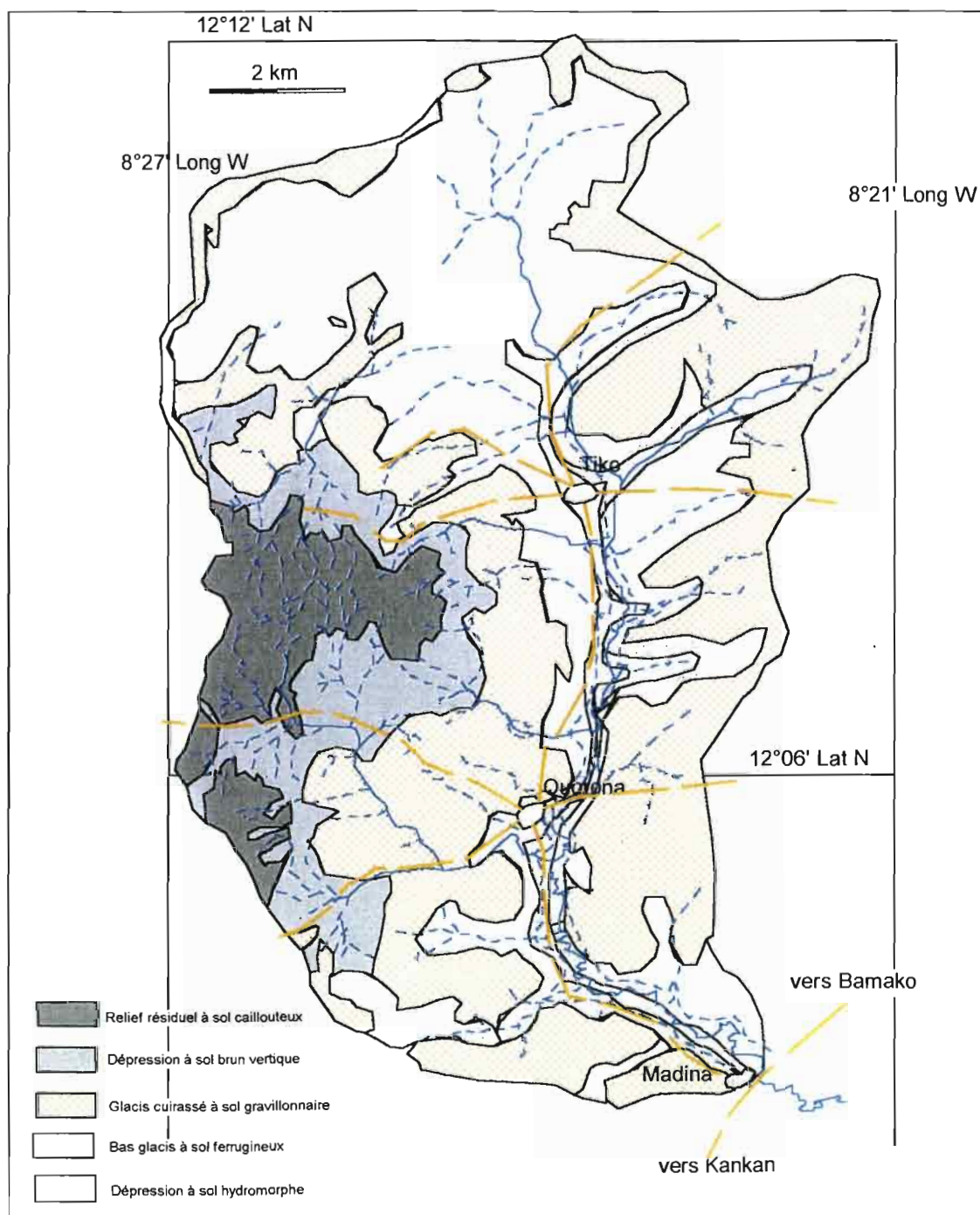
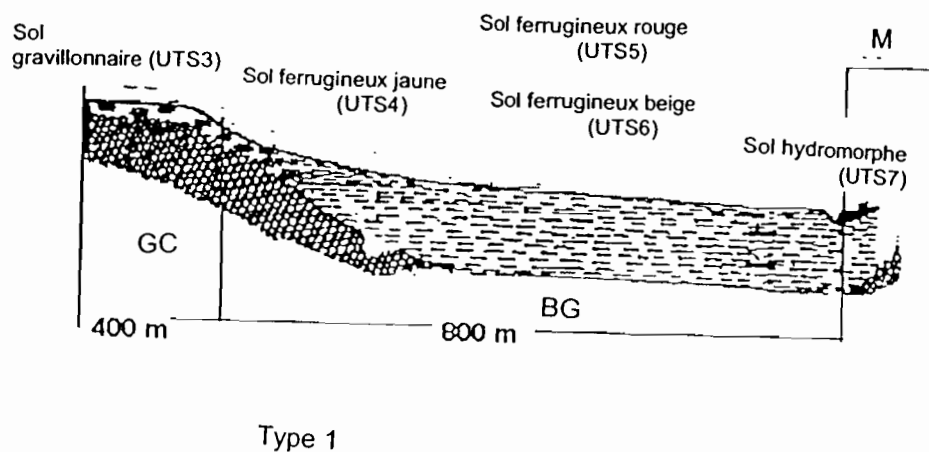


Figure 2.2 : Carte morphopédologique du bassin versant de Djitiko



M : marigot

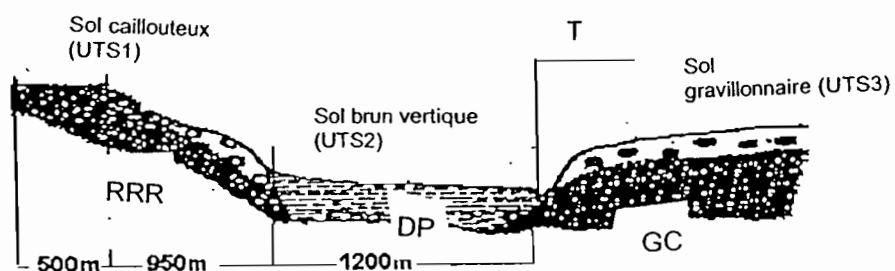
T : thalweg

GC : glacis cuirassé

BG: bas glacis, sans cuirasse en surface

RRR: relief résiduel de résistance

DP : dépression périphérique



Type 2

Figure.2.3 : Toposéquences caractéristiques du Bassin versant de Djitiko

2.3 Caractérisation des états de surface du bassin versant de Djitiko

Dans un bassin versant, les écoulements de surface et le transfert ou la redistribution des matériaux érodés ne peuvent pas être analysés sans une référence aux états de surface. Ces derniers constituent une composante très importante des unités hydrologiques. Il faut préciser qu'une unité hydrologique est une portion de l'espace dont la réponse hydrologique est homogène vis-à-vis des sollicitations pluviométriques (Estève et Rajot, 1999). Malgré cette définition claire de l'unité hydrologique, sa mise en application est complexe : elle exige, la prise en compte de critères pertinents qui puissent renseigner sur les fonctions de production mais aussi de transfert du ruissellement.

Dans notre étude, où le ruissellement doit être mesuré sur parcelles expérimentales, nous avons considéré, dès le départ, qu'une unité hydrologique est la combinaison d'une unité morphopédologique et de caractéristiques d'état de surface. Ces dernières sont dépendantes de l'occupation du sol et des techniques culturales. Ainsi, le bassin versant est un ensemble d'unités hydrologiques dont chacune se caractérise par sa dynamique, fonction de ses caractéristiques morphologiques, de la variabilité climatique (saisonnière et annuelle) et de l'agrosystème.

23.1 Le concept de surface élémentaire et d'état de surface

La surface élémentaire selon Casenave et Valentin (1989) désigne, à un moment donné, un ensemble caractérisé par son couvert végétal, le type de sol et les organisations pédologiques superficielles.

L'état de surface peut désigner (Casenave et Valentin, 1989):

- un seul type de surface élémentaire qui se répète sur une surface plus grande,
- un système de surfaces élémentaires, c'est -à- dire un ensemble au sein duquel les

surfaces élémentaires sont en interaction.

Ces auteurs ont proposé une démarche de description des états de surface. Elle s'appuie sur une clef de détermination des micro-organisations pelliculaires de surface (mops) et une clef de détermination des types de surfaces élémentaire. Aux différentes échelles spatiales (région, petit bassin versant, parcelles cultivées, section, ligne, point), il est possible d'établir une carte des états de surface. Cette cartographie diffère de celle des organisations internes de la couverture pédologique par l'objet d'étude, mais s'en écarte peu dans ses grands principes : travaux de terrain et représentation cartographique. Ainsi, le tracé des unités cartographiques doit être possible à partir des seuls documents disponibles (relevés de terrain, carte topographique, photographies aériennes, image satellite). Ce travail est souvent facilité par les

relations topographiques entre les différentes unités. Comme pour la couverture pédologique, la distribution des états de surface est ordonnée. La mise en évidence d'un tel ordre, et son éventuelle compréhension, limitent considérablement les risques d'erreur. La cartographie des états de surface peut se faire par interprétation de photographies aériennes (Casenave et Valentin, 1989), par photo-interprétation des images satellitaires (Lamachère, 1987) ou par analyse numérique des images satellitaires (Puech, 1993 ; Lamachère et Puech, 1995). La cartographie des états de surface, à l'échelle d'une région agricole par exemple, peut fournir des informations aidant à la compréhension des risques de dégradation des sols.

23.2 Influence de l'état de surface sur le ruissellement et l'érosion

*** Etat de surface et ruissellement**

Il est connu depuis longtemps que les caractéristiques physiques des premiers centimètres du sol jouent un rôle important dans l'infiltration (par exemple, Duley, 1939, cité par Valentin (1985).

De façon spécifique, en Afrique de l'Ouest, les simulations de pluies de l'ORSTOM (actuellement IRD), ont mis en évidence, dès la fin des années 1970, l'influence déterminante des organisations superficielles (Casenave et Valentin, 1989) sur le ruissellement. Par la suite, il a été établi que la participation des états de surface à l'hydrodynamique superficielle est variable à l'intérieur de la région en suivant un transect allant de la forêt tropicale humide au Sahara (Casenave et Valentin, 1989) :

- En zone de forêt tropicale ($P > 1600$ mm), les organisations internes de la couverture pédologique ont une influence prépondérante sur l'infiltration. Il s'agit d'une zone où les conditions pédoclimatiques ne favorisent pas les réorganisations pelliculaires de surface.
- En zone de savane humide ($800 < P < 1600$ mm), l'influence de la couverture pédologique reste sensible, mais s'exprime surtout par l'intermédiaire des propriétés de l'horizon humifère et de la surface. Cette zone est complexe car l'infiltration y dépend à la fois des organisations pédologiques internes et des états de surface. C'est dans cette zone que se situe le bassin versant de Djitiko.
- En zone de savane sèche ($400 < P < 800$ mm), il n'existe pas de relation nette entre l'aptitude au ruissellement et les organisations pédologiques internes. L'analyse statistique des résultats acquis sur 48 parcelles au Burkina Faso a clairement établi que le pourcentage de la couverture végétale auquel est liée l'activité mésofaunique est le principal facteur explicatif de l'infiltration.
- En zone sahélienne sensu stricto ($200 < P < 400$ mm), ce sont les caractères d'état de surface qui conditionnent l'hydrodynamique. Ici, contrairement à la zone précédente, ce sont les

organisations pédologiques superficielles qui ont un rôle prépondérant, le couvert végétal étant moins dense et beaucoup plus fugace.

- En zone subdésertique ($P < 200$ mm), ce sont les seules réorganisations superficielles qui conditionnent l'infiltrabilité.

Il faut signaler que la modélisation du ruissellement est possible à partir des caractéristiques d'état de surface. Connaissant les caractéristiques des surfaces élémentaires et la pluie utile, il est possible de calculer la lame ruisselée théorique dans un bassin versant ou sur une parcelle par exemple (Lafforgue, 1997 ; Lafforgue et Casenave, 1980).

* Etat de surface et érosion

Depuis longtemps, les chercheurs ont compris que le recouvrement du sol par la végétation, la litière ou les éléments grossiers (gravillons), joue un rôle fondamental dans son comportement vis-à-vis de l'érosion (Hudson, 1953; Roose, 1967). Plus récemment, en zone semi-aride du Kenya, Snelder et Bryan (1995) ont mesuré l'érosion sur des parcelles avec des taux croissants de couverture du sol. Dans cette étude, seul un taux de recouvrement supérieur à 55 % a permis de limiter l'érosion à un bas niveau (0 à $7,3 \text{ g m}^{-2}$). Par contre, avec une couverture du sol de 0 à 25 %, l'érosion mesurée est de 80 à 140 g m^{-2} .

23. 3 Méthodes utilisées pour la caractérisation des états de surface du bassin versant de Djitiko

Nous avons utilisé deux méthodes pour caractériser les états de surface du bassin versant de Djitiko, :

- d'une part, la caractérisation des états de surface d'après le catalogue de Casenave et Valentin (1989) en vue de faire une carte des états de surface et d'établir les relations entre microorganisations pédologiques de surface et types de sol du bassin versant;
- d'autre part, la description des surfaces fermées, ouvertes et couvertes (Roose, 1996), en vue de suivre l'évolution des états de surface en fonction de l'utilisation actuelle des sols.

23.3.1 Caractérisation des états de surface

* Dans cette méthode, les descriptions au sol portent sur les micro-horizons et les surfaces élémentaires par référence à un catalogue (Casenave et Valentin, 1989). La description du micro-horizon porte sur un nombre important de paramètres : profondeur et épaisseur, polygénie, régularité et netteté de la transition, continuité et affleurement, couleur, taille et nature des constituants, forme et taille des éléments structuraux, porosité, fragilité. Pour la

description de la surface élémentaire, les éléments retenus sont : le couvert végétal herbacé et cultural, le micro-relief, les constructions mésofauniques, l'organisation superficielle du sol et le type de sol.

* Notre étude sur le terrain a été faite en fin de saison sèche. Cette période a été choisie afin d'observer les surfaces élémentaires et les microhorizons avant leur humectation par les pluies. Il s'agit en fait de formations qui changent de structure en fonction de l'état d'humidité. A partir d'un premier travail de photointerprétation, nous avons choisi des transects qui traversent tous les types de paysage du bassin versant de 103 km². Le long de ces transects, des points ont été choisis et géoréférencés avec un GPS (*Global Position System*). Sur chaque point dans un rayon de 50 m, les micro- horizons et les surfaces élémentaires ont été décrits en référence au catalogue de Casenave et Valentin (1989). Le taux de couverture du sol par les différentes surfaces élémentaires a été établi par la suite pour chaque unité de paysage du bassin versant.

23.3.2 Description des surfaces fermées, ouvertes et couvertes

* Cette méthode (Roose, 1996) vise la distinction et la quantification des types de surface (fermées, ouvertes et couvertes). Les surfaces fermées favorisent le ruissellement. Leur évolution est un bon indice de la stabilité de l'horizon superficiel.

- Les surfaces fermées regroupent les pellicules de battance (ou d'érosion), les croûtes de sédimentation, les semelles de tassement, la surface des cailloux apparents (et des grosses mottes tassées) pris dans la masse.

- Les surfaces ouvertes comprennent les fissures profondes, les galeries de la mésofaune, les mottes de moins de 1 cm à plus de 5 à 8 cm. Dans le cas précis des sols très sableux, les coulées de sables grossiers ne recouvrant pas de structure liée sont aussi comptabilisées.

- Les surfaces couvertes comprennent la litière (résidus de culture, racines nues, mousses), les cailloux non intégrés dans la masse du sol, les adventices et plantes rampantes.

* Procédure de description et de quantification sur le terrain

Sur les parcelles de 1 m², il faut définir 5 transversales stables à partir de marques sur le cadre de mesure. Poser un mètre rigide à 5 cm du sol, et laisser descendre (systématiquement sans viser) une aiguille à tricoter ou un crayon tous les 2cm en laissant de côté 10 cm de bordure (10 -30 -50 -70 -90 cm). On obtient ainsi, 200 points de mesure sur la parcelle de 1 m². Sur les parcelles d'érosion ou les champs paysans, il faut choisir les diagonales qui croisent toutes les hétérogénéités. Les observations sont faites tous les 5 cm, le long d'un décimètre tendu au sol. Il est recommandé de fixer la zone de mesure à l'aide de piquets indéracinables.

* Expression des résultats : chaque catégorie de surface est exprimée en % de la surface totale de la parcelle étudiée.

* Dans le bassin versant de Djitiko, nous avons fait des descriptions à différentes périodes de la saison pluvieuse (début, milieu et fin), principalement en 1999. En 1998, des mesures exhaustives n'ont été possibles qu'en fin de saison pluvieuse. Tous les types d'occupation (jachère, culture avec labour, culture avec travail minimum du sol) ont été concernés par ces descriptions.

23.4 Résultats

23.4.1 Distribution des surfaces élémentaires en fonction des types de sol

La cartographie des états de surface avec le catalogue de Casenave et Valentin (1989) en début de saison pluvieuse a permis d'identifier les surfaces élémentaires associées aux différents types pédologiques du bassin versant et leur occupation (Diallo, 1995). Le tableau. 2.4 donne pour la situation de jachère, le taux de surface élémentaire en fonction des types de sol.

Tableau. 2.4 : Distribution des surfaces élémentaires sous jachère
en fonction du type de sol, en début de saison

Formation	UTS1 Sol caillouteux	UTS2 sol brun vertique	UTS3 Sol gravillonnaire	UTS4 Sol jaune	UTS5 Sol rouge	UTS6 Sol beige	UTS7 Sol hydromorphe
Arborée	GRO3 (90) ST 2 (10)	DES2 (60) DES3 (10) ERO (20)	GRO 1 (30) GRO 3 (60) GRO 6 (5) ERO (5)	DES 1 (50) DE2 (25) ST 2 (10) ERO (15)	DES 1 (90) ERO (10)	DES 1 (94) ERO (6)	VERS (100)
Herbacée			GRO 1 (25) GRO 3 (60) GRO 6 (5) DES 3 (10)	DES 1 (25) DES 2 (55) ERO (20)			

NB : Le chiffre entre parenthèses indique le pourcentage de surface occupé par la surface élémentaire

I : cas d'une jachère arborée ou arbustive

II : cas d'une jachère herbacée

Définition des types de surface élémentaire inventoriés dans le bassin versant de Djitiko

Surface de type VERS : surface non cultivée présentant moins de 20 % de turricules de vers et moins de 30 % de placage de récolte de termites.

Surface de type dessiccation (DES 1, DES2, DES 3) : surface non cultivée, présentant moins de 20 % de turricules de vers et moins de 40% de charge grossière, sans croûte (DES 1) ou avec une croûte de dessiccation peu développée (DES 2) ou avec une croûte de dessiccation avec pellicule algale (DES 3).

Surface de type structurale (ST2). Elle est couverte d'une croûte structurale à deux micro-horizons comprenant une couche de sable continue, légèrement pris en masse, recouvrant une pellicule plasmique.

Surface de type érosion (ERO): surface non cultivée présentant moins de 20% de turricules de vers et moins de 40 % de charge grossière, couverte d'une croûte d'érosion. Elle est formée, suite à un décapage superficiel ayant entraîné un glaçage de la surface du sol.

Surface de type grossier (GRO 1, GRO 3, GRO 6). le type modal (GRO 1) montre des éléments grossiers enchâssés dans une croûte à 3 micro-horizons (sable grossier, sable fin, pellicule plasmique). Le type GRO 3 correspond à une variante où les graviers et gravillons sont libres. Le type GRO 6 est une variante correspondant à un affleurement continu de la cuirasse ferrugineuse.

23.4.2 Dynamique de recouvrement du sol par la litière et la végétation.

Dans la jachère, le taux de couverture du sol par la litière et la végétation est légèrement plus élevé sur sol brun que sur sol rouge et cela quelque soit la période de mesure au cours de la saison des pluies: respectivement 41% et 34 % en début de saison des pluies et 82% et 74% en fin de saison. Il faut préciser que les taux de recouvrement mesurés en début de saison des pluies, se trouvent multipliés par au moins deux, du milieu à la fin de la saison (tab. 2.5). Quant aux sols caillouteux et gravillonnaires, ils sont respectivement proches du sol brun et du sol ferrugineux rouge en ce qui concerne le recouvrement par la litière et la végétation. Cependant, leur recouvrement par les éléments grossiers (gravillons, fragments de roche) qui n'est pas pris en compte ici est très important.

Pour ce qui est du milieu cultivé, il faut rappeler que les études ont seulement porté sur sol brun vertique et sol ferrugineux rouge. Les parcelles de culture, presque nues en début de saison des pluies, présentent dès la moitié de la saison des taux de recouvrement de l'ordre de 80 à plus de 90 % pour le sol brun et de 60 à 90 % pour le sol rouge selon respectivement que la parcelle est cultivée par labour ou par travail minimum du sol (tab. 2.6). Les différences selon les techniques culturales (labour ou travail minimum du sol) sont en faveur du travail minimum :

- en début de saison, 8% sur sol brun de couverture supplémentaire avec le travail minimum du sol, et 3 % de plus seulement sur sol rouge;
- à partir du milieu de la saison 16 % de plus sur sol brun et 27 % de plus sur sol rouge.

En ce qui concerne la différence de couverture entre jachère et milieu cultivé, elle varie aussi en fonction des types de sols, des techniques culturales et de la période de la saison pluvieuse

(2.7). En début de saison, les différences entre jachère et culture sont 28 % sur sol brun et 26 % sur sol rouge avec la pratique du labour ; dans le cas du travail minimum du sol, la différence est légèrement plus faible : 20 % sur sol brun et 23 % sur sol rouge . A partir du milieu de la saison des pluies, la situation est fort différente selon les cas : on note une égalité entre jachère et labour sur sol brun et une légère efficacité de la jachère par rapport au labour sur sol rouge (10 % de différence) ; par contre le travail minimum assure par rapport à la jachère une plus grande couverture du sol quel que soit le type de sol (une différence d'au moins 16 %) (tab.2.7).

Tableau. 2.5 : Dynamique de recouvrement des sols sous jachère pendant la saison pluvieuse

NB : (4) = (2) + (3) et (8) = (6) + (7)

Type de sol	Début de saison				Milieu- fin de saison			
	Nu (1)	Litière (2)	vég. (3)	Récouv. (4)	Nu (5)	Litière (6)	Vég. (7)	Récouv. (8)
Jachère sur sol caillouteux	58	11	31	42	2	8	90	98
Jachère sur sol brun	59	31	10	41	18	13	69	82
Jachère sur sol gravillonnaire	26	30	0	30	12	5	83	88
Jachère sur sol rouge	65	31	3	34	26	16	58	74

Tableau. 2.6 : Dynamique de recouvrement des sols sur parcelles de culture pendant la saison pluvieuse

NB : (4) = (2) + (3) et (8) = (6) + (7)

Type et travail du sol	Début de saison				Milieu - fin de saison			
	Nu (1)	Litière (2)	Vég. (3)	Récouv. (4)	Nu (5)	Litière (6)	Vég. (7)	Récouv. (8)
Labour sur sol brun	87	11	2	13	18	21	61	82
Travail minimum sur sol Brun	79	16	5	21	2	29	69	98
Labour sur sol rouge	92	8	0	8	36	26	38	64
Travail minimum sur sol Rouge	89	7	4	11	9	39	52	91

**Tableau. 2.7 : Comparaison des dynamiques de recouvrement du sol
sous jachère et en milieu cultivé.**

NB : (4) = (2) + (3) et (8) = (6) + (7)

Différence entre jachère et culture	Début de saison				Milieu- fin de saison			
	Nu (1)	Litière (2)	Vég. (3)	Récouv. (4)	Nu (5)	Litière (6)	Vég. (7)	Récouv. (8)
Sol brun : jachère - labour	- 28	21	8	28	0	- 8	5	0
Sol brun : jachère - travail minimum du sol	- 20	15	5	20	16	-16	0	- 16
Sol rouge : jachère - labour	- 27	23	3	26	- 10	- 10	20	10
Sol rouge : jachère - travail minimum du sol	- 24	24	- 1	23	17	- 23	6	- 17

26.4.3 Dynamique des microorganisations pédologiques de surface

En début de saison, les sols du bassin versant, quelle que soit l'occupation (jachère ou culture), sont principalement couverts de croûte et de pellicule au détriment des surfaces ouvertes (tabx. 2.9 et 2.10). Les taux de surfaces ouvertes varient de 5 pour les sols gravillonnaires à 42 % pour les sols ferrugineux rouges et permet de classer les sols du plus ouvert au plus fermé comme suit :

Sous jachère : Sol rouge (SR) > Sol brun (SB) = Sol caillouteux (SC) > Sol gravillonnaire (SG)

Sous culture : Labour /SB > Travail minimum /SR > Travail minimum /SB > Labour /SR

Du milieu à la fin de la saison pluvieuse, on note une nette augmentation des taux de surface ouverte partout sauf sur sol gravillonnaire où une diminution a été constatée au contraire. Nous avons mesuré une valeur de 2 % sur ce dernier alors que pour les autres sols (en jachère ou culture) les valeurs vont de 31 à 93 %. Pour cette période, le classement est le suivant :

Sous jachère : SB > SC > SR > SG

Sous culture : Travail minimum/SR > Travail minimum/SB > Labour/SR > Labour/SB

Tableau. 2.8 : Dynamique des surfaces ouvertes du sol (en %) sous jachère pendant la saison pluvieuse

Type de sol	Début de saison			Fin de saison		
	Croûte	Pellicule	Ouverte	Croûte	Pellicule	Ouverte
Jachère sur sol caillouteux	45	33	22	3	11	86
Jachère sur sol brun	45	33	22	0	7	93
Jachère sur sol gravillonnaire	0	95	5	2	96	2
Jachère sur sol rouge	2	56	42	0	34	66

Tableau. 2.9 : Dynamique des surfaces ouvertes du sol (en %) en milieu cultivé pendant la saison pluvieuse

Type et travail du sol	Début de saison				Fin de saison		
	Croûte	Pellicule	Ouverte		Croûte	Pellicule	Ouverte
Labour sur sol brun	32	44	24		6	63	31
Travail minimum sur sol Brun	31	58	11		15	6	79
Labour sur sol rouge	9	84	7		0	37	63
Travail minimum sur sol Rouge	7	80	13		0	7	93

Tableau. 2.10 : Comparaison des dynamiques des surfaces ouvertes (%) du sol sous jachère et en milieu cultivé.

Comparaison jachère et milieu cultivé	Début de saison			Fin de saison		
	Croûte (1)	Pellicule (2)	Ouverte (3)	Croûte (4)	Pellicule (5)	Ouverte (6)
Sol brun : jachère - labour	13	- 11	- 2	- 6	- 56	62
Sol brun : jachère - travail minimum du sol	14	- 25	11	- 15	1	14
Sol rouge : jachère - labour	- 7	- 28	35	0	- 3	3
Sol rouge : jachère - travail minimum du sol	- 5	- 24	29	0	27	- 27

26.5 Discussions

* La croûte la plus observée dans les jachères sur sols profonds du bassin versant est la croûte de dessiccation (DES) dont la destruction peut être rapide avec l'installation des pluies. Elle est particulièrement bien représentée sur le sol brun vertique et les sols ferrugineux (rouge, jaune et beige). La croûte la plus défavorable (croûte d'érosion = ERO) est observée en abondance sur le sol ferrugineux jaune et le sol brun vertique. Elle est également observée sur les autres sols ferrugineux (rouge et beige) mais dans des proportions assez faibles. La présence ou l'abondance de cette croûte, semble être en relation avec le type de matériau et la localisation du sol dans le paysage :

- concernant, le matériau, un taux important de limon est une condition favorable
- la localisation au contrebas immédiat d'un impluvium semble être une condition favorable à la dynamique conduisant à la croûte ERO. Les sols brun vertique et jaune sont justement dans ces positions, respectivement au contrebas des collines birrimiennes et des glacis cuirassés. Les quelques croûtes ERO observées ailleurs sont généralement dans la zone de contact avec le sol jaune.

La présence de croûte ERO semble être est un critère pertinent de risque d'érosion dans le paysage.

* Dynamique des surfaces ouvertes

En début de saison des pluies, le taux de surfaces ouvertes sur jachère semble dépendre de deux facteurs : l'activité faunique et la fissuration par dessiccation des argiles. L'activité faunique (actions des termites et autres insectes, des vers et des rats) semble être le facteur discriminant entre les sols du bassin versant, ce qui expliquerait la présence du plus grand taux d'ouverture sur le sol rouge en cette période. Dans les descriptions sur le terrain, nous n'avons pas expressément, fait une distinction entre trace faunique et autre ouverture. Cependant, la simple observation permet de constater une forte activité faunique sur les sols de la classe des ferrugineux qui semblent offrir une meilleure ambiance aux termites et autres représentants de la faune du sol.

Dans le cas des milieux cultivés, en début de saison pluvieuse, avant l'installation des pluies et des cultures, la parcelle labourée sur sol brun vertique est nettement plus ouverte à cause de la présence de grandes fentes de dessiccation.

Au milieu et à la fin de la saison, l'ouverture du sol sous jachère semble être d'autant plus importante que le couvert herbacé est développé, d'où un meilleur comportement des sols caillouteux et brun vertique plus riches en matière organique et favorables au développement des herbes. Le chevelu racinaire de la végétation herbacée est probablement responsable de

cette action positive. Pendant la même période, les parcelles de pratique du travail minimum du sol présentent le meilleur comportement en milieu cultivé à cause de l'accumulation d'une biomasse détritique plus importante (une conséquence du mode de gestion des adventices).

*** La faible couverture des sols en début de saison des pluies**

Elle est une conséquence directe des modes traditionnels de gestion du milieu physique.

- Les feux de brousse annuels, allumés après la saison des pluies, brûlent à leur passage la presque totalité de la biomasse herbacée en plus des litières accumulées sur le sol.

- Les résidus de récolte sont exportés (prélèvement pour besoins domestiques, pâture par les bovins). Dans le cas contraire, le feu les trouve sur son passage.

Ces pratiques ont deux conséquences graves sur les sols :

- Le faible taux de recouvrement augmente le risque d'érosion. En effet, les sols sont exposés à l'action violente de l'harmattan pendant la saison sèche et aux violentes tornades du début de la saison pluvieuse .

- La destruction annuelle de la biomasse est défavorable au maintien des taux de carbone et de matière organique dans le sol.

Les différences de couverture observées en fonction des types de sol et de leurs occupations semblent être liées aux caractéristiques des différents sols (morphologiques, physiques et chimiques) et à l'influence des pratiques sur ces sols. Ainsi, à cause de ses bonnes propriétés (bonne structure, richesse élevée en matière organique et en bases), le sol brun offre de meilleures conditions de production de biomasse végétale. Par ailleurs au passage du feu, ce dernier semble contenir encore un peu plus d'humidité, ce qui limiterait la destruction de biomasse et favorise le redémarrage rapide de la végétation. La différence entre labour et travail minimum du sol serait également imputable à une différence d'influence sur le stock hydrique du sol, meilleure avec la deuxième pratique, d'où une meilleure reprise des adventices après le passage du feu.

*** La nette augmentation des taux de couverture du milieu à la fin de la saison**

Les conditions hydriques sont bonnes, la production de biomasse végétale est partout favorisée et les différentes situations de sol et d'occupation tendent à présenter des taux de recouvrement élevés, relativement peu différents. La légère supériorité de la pratique du travail minimum du sol par rapport au labour s'explique par le fait qu'avec le travail minimum il n'y a pas eu d'enfouissement de biomasse pendant la période considérée ; toute la biomasse produite depuis la première pluie est restée à la surface du sol. En comparaison avec la jachère, l'apport

d'engrais minéraux aux cultures favorise nettement la production de biomasse et atténue l'effet de la dégradation relative des propriétés des sols en milieu cultivé.

2.4 Conclusion

* Dans le bassin versant de Djitiko, on distingue sept types de sols.

Deux types de sols sont respectivement associés au versant des reliefs résiduels et au glacis cuirassé (cuirasse ferrugineuse) ; le premier est épais mais caillouteux et le second est squelettique et graveleux.

Trois types de sols appartiennent aux ferrugineux tropicaux. Ils présentent des horizons superficiels argilo sableux reposant sur des horizons plus argileux.

Un sol brun vertique est localisé dans la dépression périphérique des reliefs résiduels; il est riche en limon et argile.

Un sol hydromorphe se trouve associé aux formations colluvio-alluviales du lit majeur du marigot Djitiko.

Dans ce bassin versant les contraintes pédologiques, les plus sévères (épaisseur limitée des sols, très forte charge graveleuse) sont notés seulement pour deux types de sols mais qui représentent plus de 45 % de la superficie totale.

* Dynamique de recouvrement et d'ouverture des sols

Le taux de recouvrement de la surface du sol (tel que défini dans nos travaux : couvert végétal + litière), varie, en début de saison pluvieuse d'environ 30 à 40 % sous jachère et de 10 à 20 % en milieu cultivé. Qu'il s'agisse de jachère ou de milieu cultivé, le type de sol a une influence nette. Dès le milieu de la saison pluvieuse, le taux de recouvrement du sol dépasse 60 à 80 % dans toutes les situations.

La réorganisation superficielle des matériaux pédologiques fait que les premières pluies trouvent des surfaces hydrologiques assez fermées (tab. 2.7 et 2.8) avec un accent plus net en milieu cultivé.

La comparaison des deux techniques culturales testées montre que le travail minimum du sol favorise un meilleur recouvrement et une meilleure ouverture du sol par rapport au labour conventionnel. L'efficacité du travail minimum du sol est plus forte sur sol ferrugineux rouge que sur sol brun vertique.

Couverture du sol dans le bassin versant de Djitiko

Photo n°2
Savane arbustive
sur sol caillouteux
(Fin de saison sèche)



Photo n°3
Parcelle cultivée sur
sol brun vertique
(Fin de saison sèche)



Photo n°4
Savane herbacée sur
sol gravillonneux
(Début de saison pluvieuse)



Photo n° 5
Savane arbustive sur
sol gravillonneux
(Début de saison de pluie)



Photo n°6
Jeune jachère sur
sol ferrugineux tropical
(Début de saison pluvieuse)



CHAPITRE III
ETUDE EXPERIMENTALE DU RUISSELLEMENT ET DE L'EROSION
SUR PARCELLES

3.1 Introduction

La quantification du ruissellement et de l'érosion a été retenue dans notre étude en vue de connaître, à l'échelle du bassin versant, la réaction vis-à-vis de ces processus, des différentes couvertures pédologiques, de leur occupation (jachère, culture et parcelle nue) et des techniques culturales (pratiques locales et nouvelles alternatives).

Chaque parcelle, définie par le type de sol, l'occupation et les pratiques culturales constitue un espace spécifique. Le bassin versant est une agglomération de tels espaces avec une variabilité spatio-temporelle, fonction du rythme des saisons et de l'évolution des systèmes agraires. On comprend qu'il est intéressant de connaître le fonctionnement hydrodynamique et la sensibilité à l'érosion de chaque espace spécifique en vue d'aborder les questions de spatialisation des risques d'érosion et de transfert du ruissellement et des matériaux érodés (de l'amont vers l'aval).

3.2 Généralités sur l'érosion hydrique

3.2.1 Quelques définitions

Le mot **érosion** vient du verbe latin "ERODERE" qui signifie "ronger" (Roose, 1994). L'érosion ronge la terre. Elle résulte de nombreux processus qui jouent au niveau de trois phases : le détachement des particules, le transport des matériaux (sous formes solide et ionique) et la sédimentation.

L'érosion a toujours existé et continuera à exister (Hudson, 1981). La surface terrestre est en changement perpétuel et les formes de relief actuelles ne sont pas généralement le résultat d'un cataclysme particulier. Ces formes résultent de changements infiniment lents dont les effets sont notables, le plus souvent, après des siècles ou des millénaires. L'érosion est simplement un aspect de ce constant processus de changement. Elle est responsable, entre autres, de la formation des dépôts détritiques.

Il existe divers types d'érosion et le dictionnaire des sciences de la terre (Michel et Fairbridge, 1992) en donne une liste impressionnante. La distinction entre les différents types d'érosion peut se faire à partir de critères divers. Une des distinctions les plus utilisées est celle faite à partir des facteurs actifs de l'érosion, c'est-à-dire la source d'énergie : érosions par le vent, par l'eau, par la glace et par la gravité.

Hudson (1981) distingue l'érosion géologique et l'érosion accélérée. Il est question "d'érosion géologique", ou "érosion normale" ou "érosion naturelle" si les processus

morphodynamiques résultent seulement des forces de la nature. Quand les processus sont influencés par les activités humaines, on parlera d'érosion accélérée. Roose (1994), a donné des chiffres indicatifs sur les pertes en terre par l'érosion normale, l'érosion accélérée et les situations catastrophiques :

- Erosion normale : $0,1 \text{ à } 1 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$
- Erosion accélérée : $10 \text{ à } 700 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$
- Erosion catastrophique : décapage d'1 mètre en quelques heures
- Ravinement : $100 \text{ à } 300 \text{ t ha}^{-1} \text{ j}^{-1}$
- Glissement en masse : $1000 \text{ à } 10\,000 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$

Notre objet d'étude est l'érosion accélérée en condition pluviale (**érosion hydrique**).

L'érosion hydrique est l'un des six groupes de processus de dégradation des sols distingués par la FAO (1980). Les autres groupes sont : l'érosion éolienne, la dégradation par excès de sel (salinisation et alcalinisation), les dégradations chimique, physique et biologique.

Rappelons que la dégradation du sol est un processus qui diminue la capacité actuelle ou potentielle du sol de produire (quantitativement et ou qualitativement) des biens ou services (FAO, 1980). La dégradation du sol n'est pas nécessairement continue. Elle peut avoir lieu pendant une période relativement brève entre deux états d'équilibre écologique.

Les formes d'érosion hydrique

On distingue généralement : l'érosion en nappe, l'érosion linéaire et l'érosion en masse. Une forme d'érosion évolue le plus souvent vers une autre. Par exemple, l'érosion en nappe évolue en rigoles puis en ravines, deux formes d'érosion linéaire.

*** Erosion en nappe**

On parle d'érosion en nappe ou aréolaire parce que l'énergie des gouttes de pluie s'applique à toute la surface du sol et le transport des matériaux détachés s'effectue par le ruissellement en nappe. C'est le stade initial de la dégradation des sols par l'érosion hydrique. L'érosion en nappe observée sur parcelle d'érosion dépend à la fois de :

- l'intensité maximale des pluies qui déclenchent le ruissellement,
- l'énergie des pluies qui détachent les particules susceptibles de migrer,
- la durée des pluies et/ou de l'humidité avant la pluie.

Plusieurs chercheurs ont observé que seules les pluies intenses provoquent de l'érosion (Hudson, 1965 et 1983; Elwell et Stocking, 1975) cités par Roose (1994). On peut cependant penser que toutes les pluies laissent une trace en dégradant la surface du sol (Roose, 1994). Même si toutes les pluies ne ruissellent pas, elles favorisent la naissance de croûtes peu perméables et accélèrent le ruissellement lors des averses suivantes.

* Erosion linéaire

L'érosion linéaire apparaît lorsque le ruissellement en nappe s'organise et creuse des formes de plus en plus profondes :

- les griffes, profondes de quelques centimètres ;
- les rigoles dont la profondeur atteint 10 cm ;
- la nappe ravinante où les creux ne dépassent pas 10 à 20 cm mais la largeur atteint plusieurs mètres ;
- les ravines où les creux atteignent plusieurs dizaines de cm (plus de 50 cm).

L'érosion linéaire a pour cause l'énergie du ruissellement, laquelle dépend à la fois du volume ruisselé et de la vitesse de celui-ci.

* Erosion en masse

Les phénomènes de mouvement de masse sont très nombreux et comprennent principalement divers types de glissements dont les coulées boueuses.

32.2. Les sociétés humaines face à l'érosion des sols

Sur un plan historique, il semble bien que le développement des sociétés humaines a longtemps été confronté à l'érosion des sols. En effet des études relatives aux civilisations anciennes ont montré que la dégradation des sols a été une cause majeure du déclin d'empires florissants (Lowdermilk, 1953, cité par Hudson ;1983).

Aujourd'hui, l'érosion est généralement reconnue comme un problème sérieux à l'échelle mondiale (Roose, 1994; Hudson, 1981). L'ampleur du fléau diffère d'une région à l'autre en fonction, principalement, des caractéristiques des milieux physiques, mais aussi des politiques et des systèmes de production agricole (Morel, 2000). Aussi, les sociétés humaines réagissent différemment (Roose, 1994; Morel et Maillo, 1997).

L'érosion est particulièrement préoccupante dans les régions tropicales où de nombreuses populations vivent de ressources de plus en plus surexploitées dans un environnement climatique difficile à gérer. Dans le cas précis de la zone soudano-sahélienne d'Afrique

occidentale où les longs glacis à sols ferrugineux tropicaux sont les plus cultivés, les chercheurs ont déjà mesuré des pertes en terre de l'ordre de 0,5 à 40 t ha⁻¹an⁻¹ sous mil, sorgho, arachide (Roose et Piot, 1984). Dans cette région, l'évolution des paysages (dégradation de la végétation, dénudation, encroûtement et décapage des sols, augmentation du ruissellement et ravinement des versants) ont commencé à se manifester depuis les années 1950 et plus spécialement depuis la longue sécheresse des années 1970 (Roose, 1987). Les causes principales semblent être :

- les pressions démographiques : augmentation de la charge en homme et en gros bétail pour une potentialité de production très variable ;
- les pressions socio-économiques : extension des surfaces défrichées, dessouchées et labourées mécaniquement en vue de cultures industrielles ou vivrières, réduction de la jachère.

32.3 Le problème de la quantification de l'érosion hydrique : les mesures sur parcelles expérimentales

L'érosion peut être étudiée à différentes échelles spatiales, de la parcelle (de 1 à quelques centaines de m²) au bassin versant de plusieurs milliers de km². Les objectifs de l'étude imposent l'échelle et les méthodes à mettre en application. Dans ce chapitre nous parlons seulement des études sur parcelles expérimentales.

L'étude de l'érosion sur parcelle est un moyen de quantifier l'érosion. Elle a commencé dans les années 1920 aux USA (Hudson, 1996). Cette méthode d'étude de l'érosion, qui peut être conduite sous pluie naturelle ou simulée a permis d'obtenir des masses importantes de données ayant servi à l'établissement de l'équation des pertes en terres aux USA (Wischmeier et Smith, 1978). Elle a permis en Afrique de l'ouest de caractériser la susceptibilité à l'érosion hydrique des principales couvertures pédologiques (Roose, 1973; Lal, 1976; Collinet 1988).

Dans l'étude de l'érosion sur parcelle expérimentale, une difficulté majeure est l'obtention de données précises et les chercheurs en ont pris conscience depuis longtemps.

Roose (1981) a fait à ce sujet les remarques suivantes :

- Etant données les erreurs provenant essentiellement du partiteur, du mode de prélèvement de la charge solide en suspension dans les eaux (intégration de gros volumes d'eau ruisselée) et de l'humidité des terres de fond, on ne peut espérer une précision des résultats à moins de vingt pour cent près.

- Les perturbations apportées au sol lors de la mise en place des bordures peuvent entraîner une augmentation artificielle de l'érosion qui peut atteindre 1 à 2 t ha⁻¹ la première année sur de fortes pentes sans que le ruissellement ne change.

- Les levées de terre compactée qui isolent les parcelles utilisées par le C.T.F.T. (Centre Technique Forestier Tropical) introduisent une erreur sur les transports solides (1 à 2 t ha⁻¹).

Collinet (1988) estime que les mesures sur parcelles conduisent à des informations globales sur les quantités d'eau ruisselée et de terres érodées.

Plus récemment, Hudson (1996) a fait une analyse très critique sur l'expérimentation en parcelle d'érosion. Cet auteur estime qu'à l'échelle mondiale, les mesures d'érosion sur parcelle ont le plus souvent produit des informations peu exploitables ou peu intéressantes. Cette situation semble être liée à divers facteurs : les nombreuses difficultés pratiques qui compromettent la bonne conduite des travaux et la fiabilité des mesures, la taille réduite des parcelles et surtout le manque de répétition qui ne permet pas le traitement statistique des résultats. Concernant, les aspects statistiques, Hudson (1996) estime que le choix de trois répétitions doit être considéré comme un minimum absolu, qu'il convient de dépasser si possible. Il faut signaler que le début des études expérimentales de l'érosion sur parcelle correspond au moment où les chercheurs commençaient à appliquer à la recherche agricole les plans d'expérimentation et l'analyse statistique. Ces outils théoriques de l'expérimentation ont vite gagné du terrain dans les différents aspects de la recherche agricole. Cependant, ils n'ont pas connu grand succès dans le cas des études d'érosion sur parcelle. Nearing et al (1999), ont récemment travaillé sur un grand nombre de données collectées aux USA sur parcelles avec répétitions. Leur hypothèse de départ est qu'il est possible de quantifier la variabilité de l'érosion mesurée sur parcelle et sous pluie naturelle à partir de dispositifs avec répétitions. Ces auteurs estiment que la compréhension et la quantification de la variabilité des données d'érosion sont indispensables pour l'avancement des recherches, l'évaluation des modèles et la projection des expérimentations dans ce domaine.

De façon générale, l'étude expérimentale de l'érosion au champ est une méthode reconnue coûteuse, non seulement à la mise en place, mais aussi à l'entretien et au suivi.

Malgré, ces critiques sévères, Hudson (1996) estime que les parcelles d'érosion sont utiles dans certains cas, notamment :

- * La démonstration, à l'attention des agriculteurs, de la gravité de l'érosion ou la comparaison, par exemple, d'une parcelle bien protégée par le couvert végétal et d'une parcelle nue ;
- * Les études comparatives pour vérifier ou obtenir un ordre de grandeur de l'érosion ;

* La recherche de données destinées à la construction ou à la validation de modèle ou équation de prévision du ruissellement et de l'érosion.

La conception, la taille et la mise en place des parcelles sont fortement dépendantes des moyens disponibles. La parcelle peut être conçue pour des mesures sous pluie naturelle (cas le plus simple et le plus économique) ou simulée.

La taille de la parcelle est choisie en fonction du type d'expérimentation :

- microparcelles de 1 ou 2 m² pour la comparaison de deux traitements dont les incidences respectives sont indépendantes de l'échelle d'expérimentation ;
- parcelles d'environ 100 m² pour expérimenter l'incidence des pratiques culturales, du couvert végétal, des rotations;
- parcelles de la taille de l'hectare pour tester des traitements avec le souci de se rapprocher d'avantage des conditions réelles de terrain.

Les parcelles sont complètement isolées de l'extérieur par des tôles fichées en terre sur au moins dix centimètres (Roose, 1981). Cet isolement peut être obtenu aussi en construisant une diguette de terre, une murette de pierres ou de béton.

A l'aval de la parcelle, un canal récepteur dirige les eaux et les terres érodées vers un système de stockage composé d'un piège à sédiment et de plusieurs cuves reliées entre elles par un partiteur .

Ce dispositif permet de mesurer le volume des eaux ruisselées et le poids des terres érodées. En ce qui concerne les terres érodées, deux fractions sont mesurées séparément : d'une part, les particules fines migrant en suspension et d'autre part, les particules plus grossières (sables et agrégats).

3.3 Dispositifs expérimentaux et méthodes utilisées dans le bassin versant de Djitiko

33.1 Equipement hydropluviométrique et méthodes de mesure

Dans le cadre de notre étude, nous avons envisagé dès le départ :

* de mesurer les pluies journalières sur chaque parcelle ou groupe de parcelles expérimentales et sur les limites du sous- bassin versant de 13 km², délimité pour l'expérimentation.

* de caractériser au mieux l'intensité des averses sur le bassin versant.

Pour cela, notre réseau d'instruments (fig. 3.1) a comporté 10 pluviomètres et 3 pluviographes soit 13 appareils. Sur ce nombre, 10 appareils, dont les 3 pluviographes sont localisés sur le sous bassin versant expérimental, soit 10 appareils pour 13 km² et 3 pluviographes pour 13 km². Pour l'ensemble du bassin versant de Djitiko, la densité d'équipement est de 13 appareils pour 103 km². Ce niveau d'équipement semble être acceptable pour avoir des données

représentatives de l'espace étudié surtout que les reliefs sont globalement faibles. Nouvelot (1993) a donné des chiffres indicatifs pour l'étude des petits bassins versants ruraux en Afrique tropicale : 6 à 8 appareils pour 10 km², 15 à 20 appareils pour 100 km² et 2 pluviographes pour 10 km². Il faut noter que dans le cadre d'une étude spécifique de l'érosion hydrique, la priorité est d'équiper d'un pluviomètre (ou mieux d'un pluviographe) chaque parcelle ou groupe de parcelles.

Les pluviomètres

Les pluviomètres utilisés sont tous du modèle pluviomètre "Association". Ce modèle, le plus souvent utilisé en Afrique francophone, a été défini au XIX^{ème} siècle par l'Association pour l'Avancement des Sciences (Nouvelot, 1993). Il se compose d'un seau tronconique, avec une ouverture de 400 cm² matérialisée par une bague à arrête tranchante. L'instrument est posé sur un piquet de 1,2 m de long et son aire de captation est placée à une hauteur de 1,5 m. La lecture se fait à l'aide d'une éprouvette en plastique. Ce type de pluviomètre de capacité variable de 175 à 275 mm permet de faire des mesures avec une précision de 0,05 mm.

Sur les 10 pluviomètres du bassin versant, 2 sont à seau métallique et 8 à seau plastique transparent tropicalisé. Précisons que nous avons installé 7 pluviomètres et exploité les données de 3 autres pluviomètres trouvés sur place (Il s'agit d'appareils installés par l'Office de la Haute Vallée du Niger).

Les pluviographes.

Les 3 pluviographes ont été répartis entre les parcelles sur sol ferrugineux rouge, les parcelles sur sol brun et le versant des reliefs résiduels. Il s'agit de deux pluviographes (avec guérite) à augets basculeurs ou basculants et d'un pluviographe électronique. Ce dernier a eu un fonctionnement défectueux.

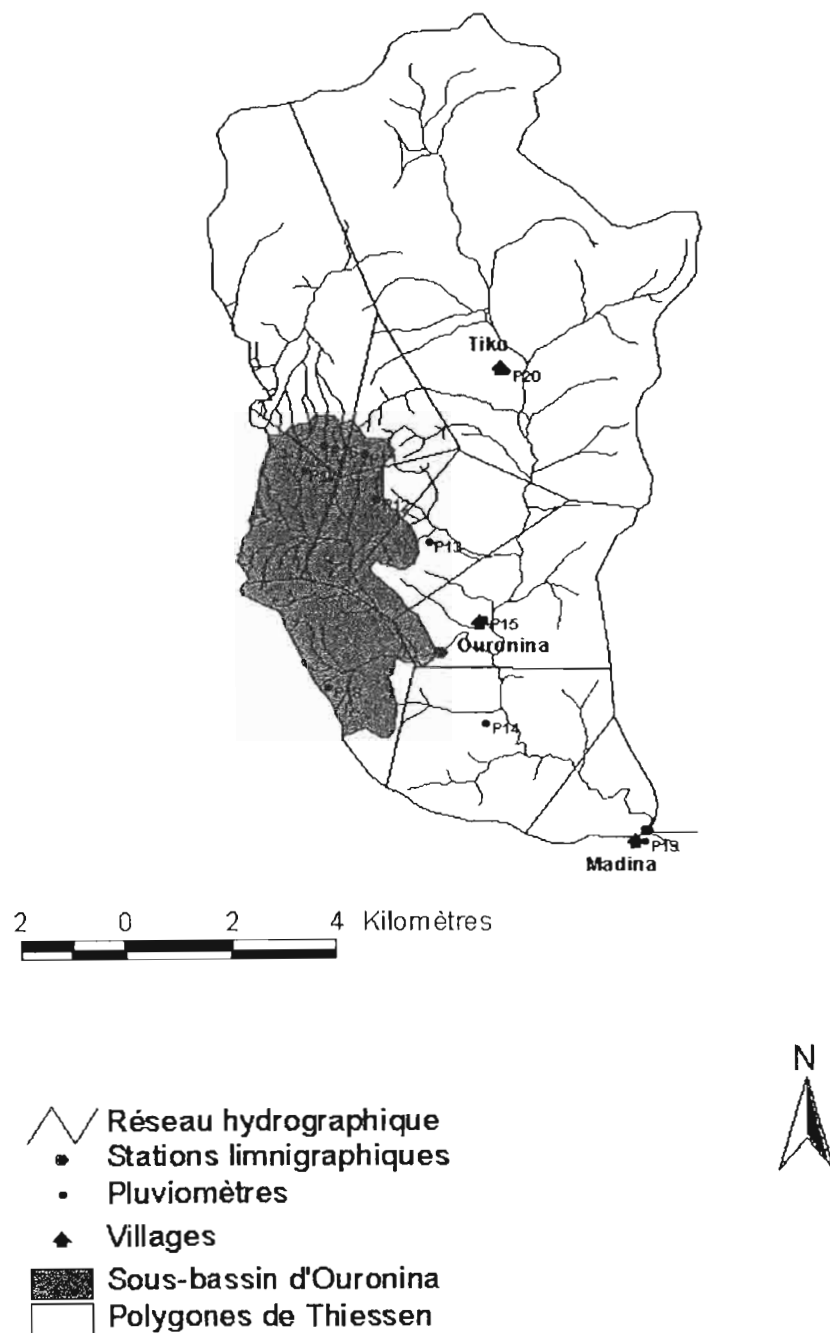


Figure 3.1 : Hydrographie et équipement hydrométrique du bassin versant de Djitiko (Marius, 2000)

NB: aux stations P12 et P13, existent des pluviographes en plus des pluviomètres

33.2 Parcelles expérimentales et méthodes de mesure du ruissellement et de l'érosion

33.2.1 Emplacement, occupation et aménagement des parcelles

Nous avons installé 14 parcelles se distinguant par leur localisation dans le bassin versant, leur occupation et leur superficie (tableau 3.1).

* Les emplacements des parcelles ont été choisis de façon à couvrir les principales unités morphopédologiques du bassin versant : sol caillouteux sur relief résiduel, sol brun dans la dépression périphérique, sol gravillonnaire sur glacis cuirassé et sol ferrugineux rouge sur bas glacis. Les parcelles sont regroupées sur 4 sites à raison d'un site par unité morphopédologique (fig.3.2).

Pour faciliter le suivi quotidien, toutes les parcelles sont localisées dans un sous- bassin versant, dans le terroir villageois de Ouronina (fig 3.1).

* Les occupations du sol sont le sol nu, la jachère d'au moins 20 ans sur tous les sites et des parcelles cultivées, uniquement sur sol brun vertique et sol ferrugineux rouge. Sur les parcelles cultivées, deux types de pratiques culturales sont testés : le labour conventionnel et le travail minimum du sol. Dans le premier cas, la parcelle est labourée en début de saison, dès que l'humidité du sol est suffisante pour cette opération, puis semée. Deux sarclages sont faits pour protéger les cultures contre les adventices. Dans le second cas, en début de saison, les adventices de 15 à 20 cm de haut sont brûlées avec un herbicide total. La parcelle est ainsi couverte par une fine couche de mulch. Elle est ensuite travaillée, uniquement sur les lignes de semis. Par la suite, l'entretien des cultures est assuré en faisant deux sarclages manuels. Les méthodes de semis, les apports d'engrais sont les mêmes dans les deux cas ; aussi le même calendrier agricole a été observé.

* L'aménagement des parcelles a été fait de façon classique. La parcelle est isolée avec des feuilles de tôle en aluminium, fichées dans le sol sur 10 cm avec une bordure de 20 cm de haut pour éviter les débordements. A l'aval de chaque parcelle, trois cuves bétonnées ont été confectionnées (fig.3.3) :

- Première cuve. Elle est prévue pour la réception des sédiments grossiers (terres de fond) ;
- Deuxième cuve. Elle reçoit les eaux débordant de la première cuve. Elle est appelée cuve de partition, car équipée de partiteurs qui sont des bouts de tuyaux PVC de diamètre constant. Lors de son débordement, l'eau passe par les partiteurs.

- Troisième cuve ou cuve de stockage. Elle reçoit l'eau envoyée par un seul des partiteurs (celui occupant la position centrale), alors que les autres conduisent l'eau à l'extérieur du dispositif.

Le volume total des cuves et le nombre des partiteurs sont soigneusement fixés de façon que tout le volume d'eau ruisselé de la parcelle puisse être mesuré sans perte. Connaissant la pluie décennale et en faisant l'hypothèse d'un coefficient de ruissellement maximal, le volume maximal d'eau à stocker peut être fixé de façon assez fiable. Les parcelles regroupées sur le même site sont contiguës, au moins deux à deux, pour réduire le coût d'installation (ligne de tôle mitoyenne) et faciliter les opérations de vidange et d'échantillonnage.

Tableau 3.1 : Taille et répartition des parcelles expérimentales

Dimensions parcelles	Type de sol			
	Sol caillouteux	Sol brun vertique	Sol gravillonnaire	Sol ferrugineux rouge
Parcelles de 100 m ² (20 m x 5 m)	(1, jachère)	(1, jach) ; (1, nue) ; (1, labour) (1, travail mini. du sol)	(1, jachère) (1, nue)	(1, jach) ; 1 (nue) ; (1, labour) (1 travail mini. du sol)
Parcelles de 1000 m ² (20 m x 5 m)		(1, labour) (1, travail mini. du sol)		(1, labour) (1, travail mini. du sol)

NB : le nombre de parcelles et l'occupation sont indiqués entre parenthèses

Sauf sur sol caillouteux où la parcelle a une pente de 24%, les pentes sont toujours comprises entre 1 et 2%.

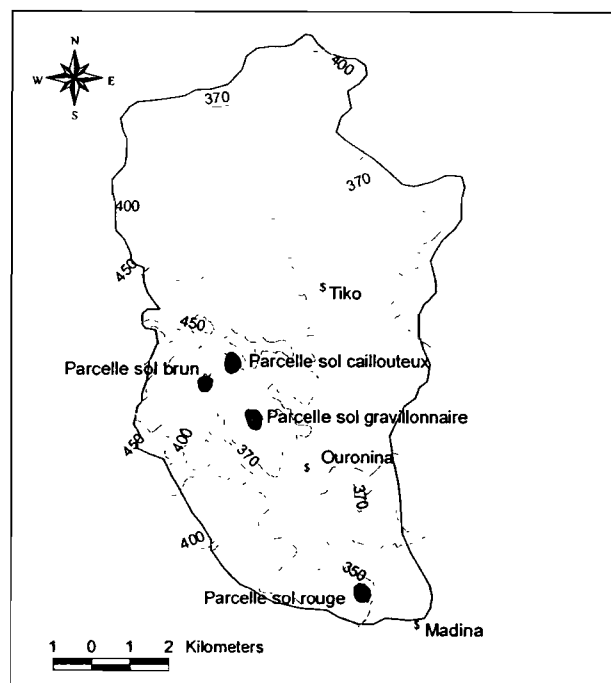


Figure 3.2 : Localisation des parcelles expérimentales dans le bassin versant

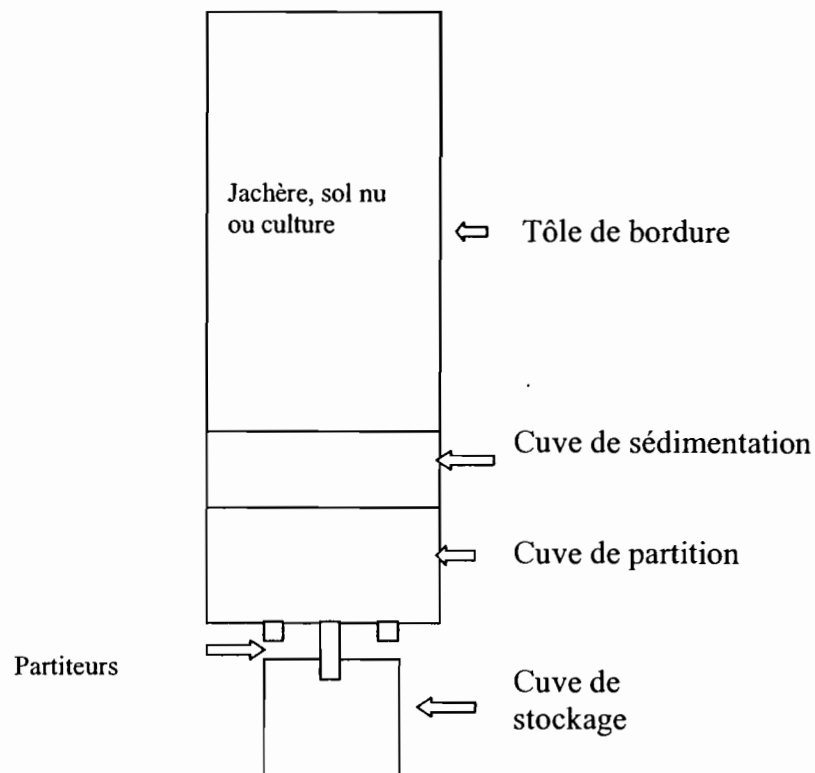


Figure 3.3 : Schéma d'une parcelle d'érosion installée dans le bassin versant de Djitiko

33.2.2 Méthodes de mesure sur parcelles expérimentales

Après chaque événement pluvieux occasionnant un ruissellement, les opérations suivantes sont faites les unes à la suite des autres :

- * Relevé de la hauteur de pluie au pluviomètre installé à côté de la parcelle ;
- * Mesure de la hauteur d'eau dans toutes les cuves;
- * Vidange de la première cuve (cuve de sédimentation), pesée et échantillonnage des sédiments grossiers (terres de fond). Pour la pesée des sédiments, on se sert d'un seau (à remplir toujours à bord avec sédiments et eau) et d'un peson pour connaître leur poids à l'état humide. Ce premier poids permettra de connaître ultérieurement le poids des sédiments à l'état sec, grâce à l'utilisation d'un abaque (il en existe pour chaque type de sol du bassin

versant). Un échantillon de 500g est prélevé et mis dans un sachet plastique, avant d'être exposé à l'air pour séchage.

* Vidange de la deuxième cuve (cuve de partition) et prélèvement d'eau pour la mesure de la turbidité et pour la détermination des matières dissoutes. L'eau de la cuve est suffisamment brassée pour homogénéisation puis un volume de 10 L est prélevé dans un Jerrycan. On y ajoute du sulfate d'alumine (1cc par litre) afin de favoriser la floculation des matières en suspension. Après 24 h, tout le floculat est récupéré et une prise d'échantillon (200 à 400cc) est faite sur le surnageant (eau claire). Ce dernier échantillon doit servir à caractériser les matières dissoutes.

* Vidange de la troisième cuve (cuve de stockage). Notons qu'aucun prélèvement d'échantillon n'est fait à ce niveau.

* Nettoyage complet de toutes les cuves après ces opérations de vidange.

33.2.3 L'échantillonnage (eaux et sédiments) et le conditionnement des échantillons

*** L'échantillonnage exhaustif**

Cet échantillonnage est fait pour avoir des échantillons représentatifs de chaque événement de ruissellement. Après chaque pluie donnant lieu à un ruissellement, trois échantillons sont pris par parcelle : un échantillon d'eau de ruissellement, un échantillon de terre de fond et un échantillon des matières en suspension. Le premier est un échantillon d'eau claire, débarrassé des matières en suspension par l'effet floculant du sulfate d'alumine. Il est conservé dans un flacon rempli à bord, laissé à l'abri de la chaleur et de la lumière avant d'aller au laboratoire d'analyse. L'échantillon de sédiment grossier (terre de fond) est séché à l'air libre. Après séchage, il est broyé et tamisé comme tout échantillon de sol destiné aux analyses classiques de laboratoire. L'échantillon de matières en suspension n'est pas directement obtenu sur le terrain. Après floculation et enlèvement du surnageant (eau claire), la totalité des matières en suspension contenues dans les 10 L (voire point 32.2.2) est transportée au laboratoire, à l'état humide pour séchage à l'étuve, puis pesée. Le plus souvent, les quantités sont si faibles qu'on garde la totalité des suspensions pour les analyses de laboratoire.

Cet échantillonnage exhaustif aboutit, en fin de campagne, à un grand nombre d'échantillons dont les coûts d'analyses sont hors de portée. Cela nous a conduit à faire des échantillons moyens par période.

*** Formation des échantillons moyens**

Pour avoir des échantillons représentatifs, la campagne a été subdivisée en périodes : la première période regroupe tous les événements de ruissellement survenus avant le labour et chaque mois au delà, jusqu'à l'arrêt des pluies, constitue une période. Ainsi, nous avons eu quatre périodes pour la campagne 1998 et cinq pour 1999.

Tous les échantillons (eau, terre de fond, matières en suspension) prélevés pendant la même période ont été mélangés en prenant les mêmes quantités. Ensuite la quantité requise pour les analyses au laboratoire a été prise.

33.2.4 Analyses d'échantillons au laboratoire

Les analyses¹ faites comprennent le phosphore, le carbone, l'azote et les bases échangeables (Ca, Mg, K, Na) sur les eaux de ruissellement et les sédiments (terres de fond et matière en suspension).

Les méthodes d'analyses utilisées sont celles déjà signalées au chapitre 2 et font l'objet de l'annexe II -1.

33.2.5 Traitement des données et informations recherchées sur le ruissellement et l'érosion

* Traitement des données de terrain

Les relevés de hauteur de pluie et de volume d'eau ruisselé, faits sur les parcelles, pour chaque événement pluvieux de la saison permettent de calculer :

- la lame ruisselée, notée LR, exprimée en millimètre. Elle correspond à la quantité de pluie qui ne s'est pas infiltrée dans le sol. Sa valeur est calculée à partir du volume d'eau ruisselé qui est mesuré à partir des cuves.

$$LR = \frac{V \text{ (m}^3\text{)} \times 10\,000 \text{ m}^2}{\text{Surface de la parcelle}}$$

- le coefficient de ruissellement, noté KR. Il est exprimé en pourcentage, et représente la proportion de la pluie (P en mm) qui ne s'est pas infiltré dans le sol.

$$KR = \frac{LR}{\text{Pluie (en mm)}} \times 100$$

¹ Les analyses sont faites dans les laboratoires du CIRAD et de l'IRD (Agropolis, Montpellier).

A partir de la quantité totale de pluie mesurée pendant la campagne et la somme totale des valeurs de LR, un coefficient de ruissellement annuel moyen (KRAM) est calculé.

$$\text{KRAM} = \frac{\sum \text{LR}}{\text{P annuel}} \times 100$$

P annuel et LR en mm, KRAM en %

La plus forte valeur mesurée de KR au cours de la campagne est notée KR max

Par ailleurs, l'examen des lames ruisselées du début à la fin de la saison permet de déterminer la hauteur de pluie limite qui provoque un ruissellement. Selon l'état d'humidité du sol, on distingue :

Pi s = pluie d'imbibition à l'état sec du sol et Pi h = pluie d'imbibition à l'état humide du sol.

En ce qui concerne l'érosion, les relevés par événement pluvieux permettent de calculer :

- la perte de terre sous forme de sédiments grossiers (terres de fond) en t ha⁻¹ ;
- la turbidité qui représente la charge solide des eaux en g L⁻¹ ;
- la perte de terre sous forme de matières en suspension (MES), exprimée en t ha⁻¹ .

Ces données permettent d'établir le bilan annuel d'érosion et les proportions relatives des pertes en terre sous forme de sédiments grossiers et de matières en suspension.

* Traitement des données de laboratoire

Les déterminations de laboratoire doivent permettre de connaître la teneur des eaux de ruissellement et des sédiments en éléments chimiques (C, N, bases échangeables et phosphore assimilable). Connaissant ces teneurs, les volumes d'eau ruisselés et les pertes en terres, nous pouvons évaluer les pertes d'éléments chimiques par le ruissellement et l'érosion pour les différentes situations morphopédologiques et d'occupation des sols du bassin versant.

3.4 Résultats

Ici, nous allons présenter successivement les données relatives à : la pluie, le ruissellement, les pertes en terre, les teneurs des eaux et des sédiments en éléments chimiques et les pertes en ces éléments. Les discussions seront faites par la suite (point 3.4).

34.1 Les précipitations dans le bassin versant de Djitiko

* Hauteurs des précipitations annuelles et mensuelles.

Pour les années 1998 et 1999, nous avons respectivement mesuré 994,5 et 1354,7 mm de pluie. Ces valeurs se situent de part et d'autre de la moyenne interannuelle mesurée à Kangaba (1939-1995) qui est de 1 076 mm. Il faut rappeler que l'exutoire du bassin versant est à 20 km de Kangaba, station la plus proche avec une longue période d'observation. En poursuivant les comparaisons avec les données de Kangaba, on note les remarques suivantes :

- la hauteur de pluie de 1998 est de la classe des faibles quantités annuelles mesurées à cette station ($P > 700$ mm et < 1000 mm);

- la hauteur de 1999 est du même ordre de grandeur que 6 valeurs annuelles (de la période 1939-1995) : $P > 1\ 200$ mm et < 1400 mm. Elle est seulement inférieure aux pluies mesurées en 1964, 1966 et 1975, respectivement 1674,6 mm, 1 509,5 mm et 1 610,4 mm.

Les quantités mensuelles de pluie (fig.3.4) sont nettement plus élevées en 1999 sauf pour les mois de mai et juin où les pluies ont été légèrement supérieures en 1998. Au cours des deux années, les quantités mensuelles de pluie en août, septembre et octobre ont été plus élevées que celles mesurées, en moyenne, à Kangaba (1939- 1995).

* Les précipitations journalières

Le nombre de pluies journalières est plus élevé en 1999 qu'en 1998 : 80 contre 45. Le nombre de pluie ayant ruisselé dans le cas du sol nu est de 43 en 1999 contre 23 en 1998. Il s'agit respectivement de 55 % et 56 % du nombre annuel de pluie.

Les plus fortes pluies journalières enregistrées sont respectivement 127 mm en 1998, au mois de septembre et 101 mm en 1999 au mois d'août.

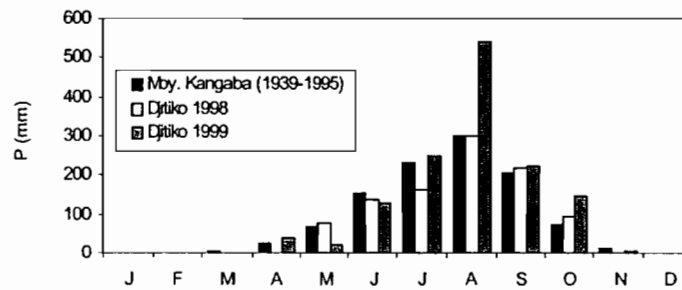


Figure 3.4 : Comparaison des pluies mensuelles de Djitiko (1998 et 1999) aux valeurs moyennes de Kangaba (1939-1995).

* Intensité et indice d'agressivité climatique R_{USA}

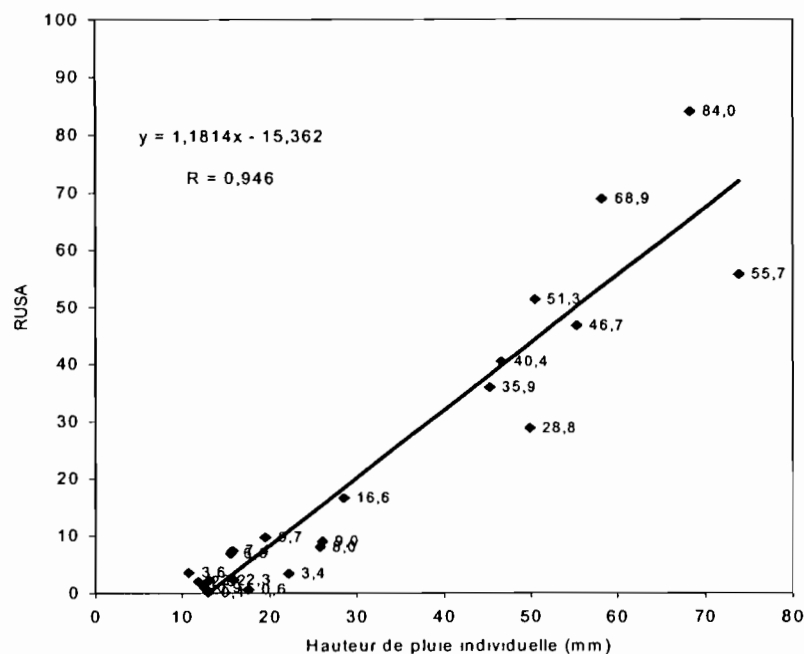
Les mesures d'intensité pluviale qui ont pu être exploitées (uniquement une partie de celles de la saison 1999) ont montré que les intensités partielles peuvent atteindre 90 à plus de 100 mm h⁻¹ pendant 5 à 10 minutes. Les valeurs d'indice d'agressivité R_{USA} ont été calculées à partir de 25 pluies (tab 3.2). Les valeurs moyennes pour différentes classes de pluies sont données au tableau 3.3. Nous avons trouvé une bonne corrélation entre la hauteur de pluie individuelle et l'indice R_{USA} . Si l'on considère seulement les pluies de hauteur supérieure à 10 mm, cette corrélation devient plus nette (fig3.5); l'équation de la droite ($Y = 1,1814x - 15,362$) est vérifiée pour $P \geq 13$ mm. Nous l'avons utilisé par la suite pour calculer les valeurs mensuelles et annuelles de l'indice R_{USA} pour les années 1994,1995, 1998 et 1999 (tab3.4), qui correspondent à des années de mesures d'érosion (à l'exutoire pour les deux premières et sur les versants pour les deux autres).

Tableau 3.2 : Hauteur de pluie individuelle (H) et l'agressivité pluviale (R_{USA}) d'après de relevés de 1999

H	24,1	28,5	58,3	50,5	45,2	68,2	25,7	11,9	55,4	10,8	13,0	15,6	15,8
R_{USA}	9,0	16,6	68,9	51,3	35,9	84,0	8,0	2,0	46,7	3,6	0,1	6,9	7,4
H	15,9	13,1	73,9	5,7	49,9	46,6	17,6	12,6	9,2	22,1	3,1	19,5	
R_{USA}	2,3	2,2	55,7	0,3	28,8	40,4	0,6	0,9	1,7	3,4	0,1	9,7	

Tableau 3.3 : Valeurs moyennes de R_{USA} pour quelques classes de pluies individuelles d'après les mesures de 1999

Classe de pluie (H en mm)	N (nombre de pluies)	H moyen (mm)	R_{USA} moyen
0 - 10	3	6,0	0,7
10 - 20	10	14,6	3,6
20 - 30	4	25,1	9,1
40 - 50	3	47,2	35,0
50 - 60	3	54,7	55,6
> 60	2	71,1	69,9

Figure 3.5 : Relation entre hauteur de pluie individuelle et indice R_{USA} dans le bassin versant de DjitikoTableau 3.4 : Indice d'agressivité pluviale (R_{USA}) calculé pour le bassin versant de Djitiko

Année	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Total	R_{USA}/Ha
1994	0,0	70,5	54,1	107,5	44,7	194,2	12,5	484	0,44
1995	2,0	56,9	30,9	80,7	245,9	33,3	14,4	464	0,46
1998	0,0	30,5	87,2	108,1	168,0	190,3	89,9	674	0,68
1999	31,9	8,3	46,5	111,1	423,5	128,2	84,2	834	0,62
Moyenne mensuelle	8,5	41,6	54,7	101,9	220,5	136,5	50,3	614	0,55
% du total interannuel	1,4	6,8	8,9	16,6	35,9	22,2	8,2		

NB : R_{USA} est calculé avec l'équation de régression de la figure 3.5 ($Y = 1,1814x - 15,362$)

Ha : hauteur annuelle de pluie

En utilisant la valeur moyenne R_{USA}/Ha du tableau 3.4 et la pluie moyenne de Kangaba (1076 mm pour la période 1939-1995), on obtient pour cette station : $R_{USA} = 538$.

Rappelons que la station de Kangaba, à 20 km de l'exutoire de notre bassin versant est la plus proche disposant d'une longue période d'observation.

34.2 Le ruissellement

Les mesures de ruissellement pendant deux saisons de pluie ont montré des valeurs caractéristiques (KRAM, KR max, Pis et Pih) qui diffèrent d'une année à l'autre, d'un type de sol à l'autre et aussi suivant les techniques culturales appliquées à la parcelle (tableau 3.5).

Tableau 3.5 : Caractéristiques du ruissellement sur le bassin versant de Djitiko
(résultats des mesures des campagnes 1998 et 1999)

Parcelles (sol, occupation, superficie)	KRAM			KR max			Pis			Pih		
	98	99	Moy.	98	99	Moy.	98	99	Moy.	98	99	Moy.
Sur sol caillouteux												
jachère (100 m ²)	13	7	10	42	37	40	32	34	33	16	16	16
Sur sol brun vertique												
jachère (100 m ²)	16	27	22	50	63	57	17	16	17	10	7	9
parcelle nue (100 m ²)	23	42	33	58	86	72	17	16	17	9	7	8
labour (100 m ²)	21	33	27	74	97	86	22	33	28	9	14	12
labour (1000 m ²)	10	24	17	30	93	62	21	16	37	12	16	14
travail mini. du sol (100 m ²)	13	40	27	54	88	71	21	16	19	12	14	13
travail mini. du sol (1000 m ²)	12	21	17	36	92	64	21	16	19	12	14	13
Sur sol gravillonnaire												
jachère (100 m ²)	28	54	41	76	99	88	17	16	16	10	6	8
parcelle nue (100 m ²)	41	43	42	84	95	90	14	16	15	10	5	8
Sur sol ferrugineux rouge												
jachère (100 m ²)	26	18	22	65	49	57	10	17	14	10	7	9
parcelle nue (100 m ²)	49	42	46	95	85	90	9	17	13	7	4	6
labour (100 m ²)	40	50	45	88	84	86	9	19	14	10	9	10
labour (1000 m ²)	32	33	33	95	86	91	10	19	14	4	9	10
travail mini. du sol (100 m ²)	13	23	18	54	95	75	11	19	15	10	9	10
travail mini. du sol (1000 m ²)	12	24	18	36	68	52	21	19	20	12	12	12

NB : Pluie totale annuelle = 994,5 pour 1998 et 1354,7 mm pour 1999

Pis : pluie d'imbibition à l'état sec

Pih : pluie d'imbibition à l'état humide

* Sous jachère, les valeurs mesurées de KRAM varient de 10 % sur sol caillouteux à 41 % sur sol gravillonnaire. La plus forte valeur de KR max (88 %) est mesurée aussi sur sol gravillonnaire. Le fort ruissellement sur sol gravillonnaire par rapport aux autres sols est clairement montré par la figure 3.6. Il est suivi par le sol rouge et le sol brun : sur ces deux

sols, la jachère est caractérisée par la même valeur de ruissellement ($KRAM = 22 \%$; moyenne des deux années).

* Sur parcelle nue, le sol brun ruisselle moins que les sols ferrugineux et gravillonnaires (fig.3.7). Notons que le sol caillouteux n'a pas porté de parcelle nue.

* En milieu cultivé où sont testés deux sols (sol brun et sol ferrugineux rouge), deux techniques culturales (labour et travail minimum du sol) sur des parcelles de 100 m^2 et de 1000 m^2 , les résultats sont de tendances complexes comme le montrent le tableau 3.5 et les figures 3.8 et 3.9 :

- sur sol brun vertique, les valeurs du KRAM sont plus élevées sur parcelle de 100 m^2 par rapport à la parcelle de 1000 m^2 , alors que la différence entre technique culturale (labour et travail minimum du sol) n'est pas nette (fig.3.8)

- sur sol ferrugineux rouge, la taille de la parcelle expérimentale (100 m^2 et 1000 m^2) ne semble pas avoir d'influence sur le KRAM, dans le cas du travail minimum du sol. Par contre avec le labour, la parcelle de 100 m^2 ruisselle plus que la parcelle de 1000 m^2 . Sur des parcelles de même taille, le KRAM est plus élevé sur la parcelle labourée (fig.3.8).

* Taille de la parcelle et valeurs des paramètres du ruissellement

Dans le cas du sol brun, on note une variation de KRAM et KR max suivant la taille de la parcelle et quelle que soit la pratique culturale (fig. 3.8) : les plus fortes valeurs sont mesurées sur parcelle de 100 m^2 mais les rapports restent toujours inférieurs à 2.

Sur sol rouge, les tendances ne sont pas nettes comme le montrent la figure 3.9 : avec la pratique du labour, on note un KRAM plus élevé sur la parcelle de 100 m^2 et un KR max plus élevé sur la parcelle de 1000 m^2 . Par contre avec le travail minimum du sol, les mêmes valeurs de KRAM sont enregistrées, mais la parcelle de 100 m^2 présente un plus fort KR max.

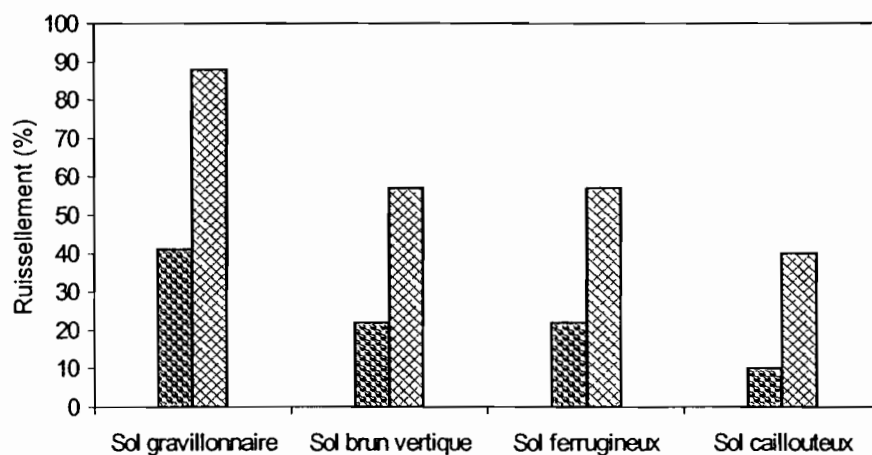


Figure 3.6 : Ruissellement sous jachère dans le bassin versant de Djitiko (valeurs moyennes des campagnes 1998 et 1999)

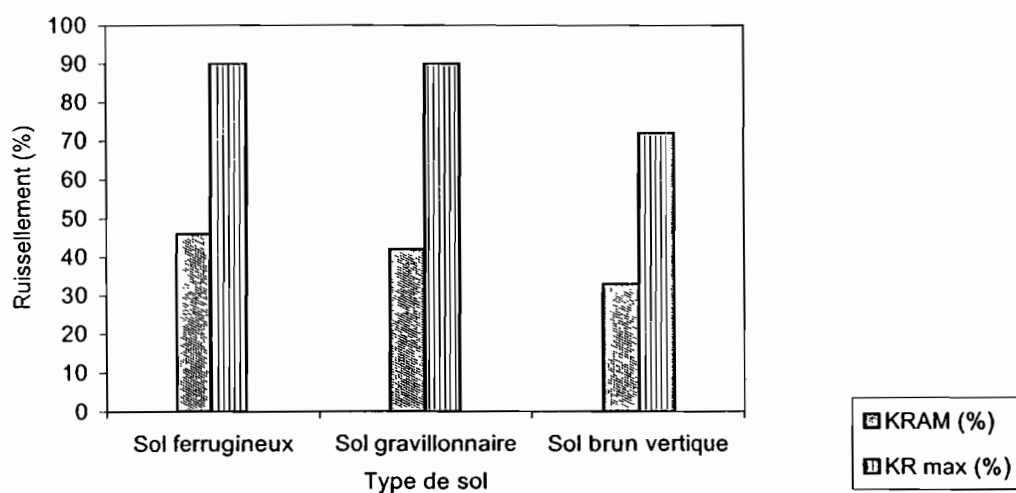


Figure 3.7 : Ruissellement sur parcelle nue dans le bassin versant de Djitiko (valeurs moyennes des campagnes 1998 et 1999)

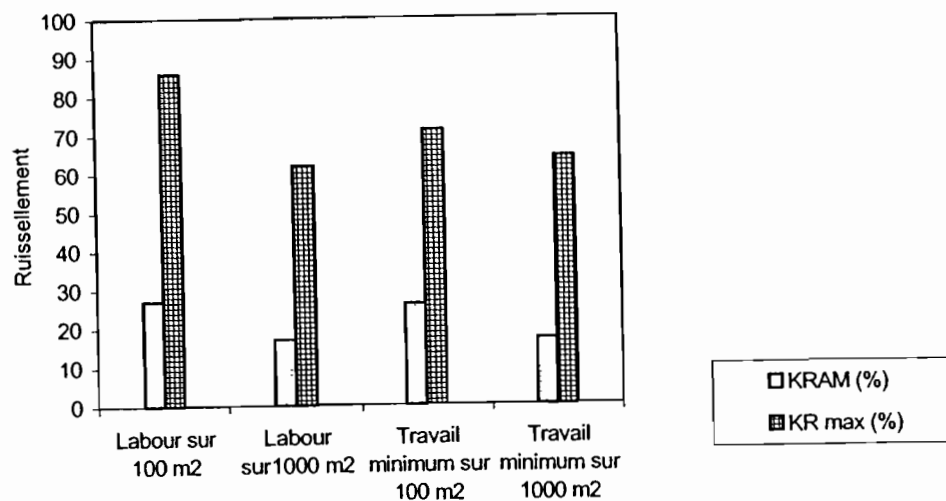


Figure 3.8 : Ruissellement sous culture sur sol brun vertique (valeurs moyennes des campagnes 1998 et 1999)

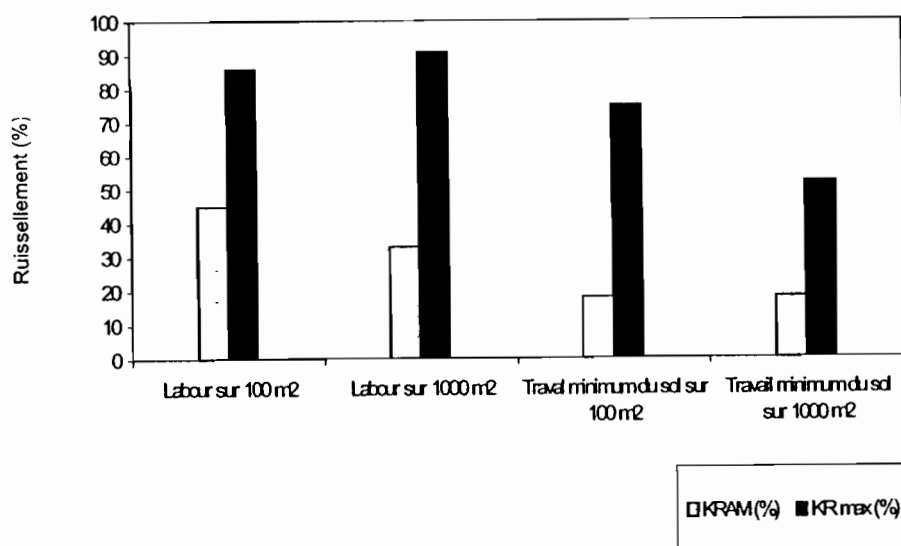


Figure 3.9 : Ruissellement sous culture sur sol ferrugineux rouge (valeurs moyennes des campagnes 1998 et 1999)

34.3. Les pertes en terre

* Sous jachère, les pertes en terre (valeurs moyennes de deux ans de mesure) sont très faibles à faibles (fig. 3.10). On distingue d'une part les sols caillouteux et les sols bruns vertiques à très faible érosion ($< 2t\ ha^{-1}\ an^{-1}$) et d'autre part les sols gravillonnaires et les sols ferrugineux à faible érosion ($< 5t\ ha^{-1}\ an^{-1}$). Sur sols caillouteux et gravillonnaire, une partie importante (30 à 70 %) de la perte en terre se fait sous forme de matières en suspension (tab.3.5). Les taux de MES restent inférieurs à 30 % de l'érosion totale sur sols bruns vertiques et sols ferrugineux tropicaux (tab. 3.5).

* Sur parcelle nue, les sols bruns et les sols ferrugineux sont les plus sensibles à l'érosion (fig.3.10) avec plus de $40\ ha^{-1}\ an^{-1}$ (valeurs moyennes des deux campagnes de mesure). Sur sol gravillonnaire, l'érosion est très faible par rapport à celles mesurées sur les deux premiers sols. Ici, également, le taux de MES est particulièrement élevé sur sol gravillonnaire (66%).

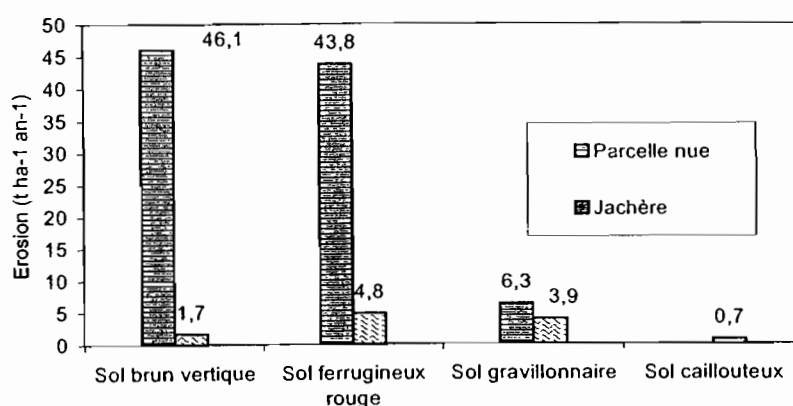


Figure 3.10: Erosion sous jachère et sur parcelle nue (moyennes des valeurs mesurées en 1998 et 1999)

Tableau 3.6 : Taux de matières en suspension (MES) dans les pertes en terre sur parcelles expérimentales (moyenne des campagnes 1998 et 1999)

Sol et occupation	Sol brun jachère	Sol brun nu	Sol rouge jachère	Sol rouge nu	Sol gravillonnaire jachère	Sol gravillonnaire nu	Sol caillouteux jachère
Proportion de MES dans l'érosion mesurée (%)	28	10	24	13	32	44	66

* Les pertes en terre sur parcelle cultivée sont plus importantes dans le cas du labour que celui du travail minimum du sol (tab.3.7). Le rapport entre les pertes (valeurs moyennes des deux ans de mesure) subies avec les deux pratiques culturales, varie avec le type de sol, mais très peu avec la taille de la parcelle. Sur sol brun, ce rapport est de 3,3 pour la parcelle de $100\ m^2$

et de 2,2 pour la parcelle de 1000 m². Sur sol rouge, le rapport est toujours de 2,5 quelle que soit la taille de la parcelle.

* Les quantités de terres érodées en milieu cultivé dépendent de la taille de la parcelle de mesure, quel que soit le type de sol et la pratique culturale. Les parcelles de 100 m² produisent proportionnellement plus de sédiments (en t ha⁻¹ an⁻¹) que les parcelles de 1000 m² (tab.3.7). Les rapports entre les productions de sédiments sur les deux tailles de parcelles varient avec le type de sol : sur le sol brun, les rapports sont 3,5 (cas du labour) et 2,3 (cas du travail minimum du sol), alors que sur sol rouge, le rapport est de 4 avec les deux pratiques culturales. La proportion de MES dans l'érosion mesurée est plus importante dans le cas du travail minimum du sol et toujours plus importante sur sol ferrugineux rouge que sur sol brun. Le rapport entre les pertes en terre sur parcelle cultivée et sous jachère est plus élevé avec le labour qu'avec le travail minimum du sol (tableau 3.7). L'incidence de la mise en culture est plus forte sur sol brun vertique que sur le sol ferrugineux rouge quelle que soit la pratique culturale.

Une comparaison des pertes en terres occasionnées par toutes les occupations de sol testées (jachère, pratiques culturales et dénudation du sol) est montrée par la figure 3.11 pour le cas du sol ferrugineux rouge.

Tableau 3.7: Pertes en terre sur parcelles cultivées (campagnes 1998 et 1999)

NB : cultures de maïs en 1998 et de coton en 1999.

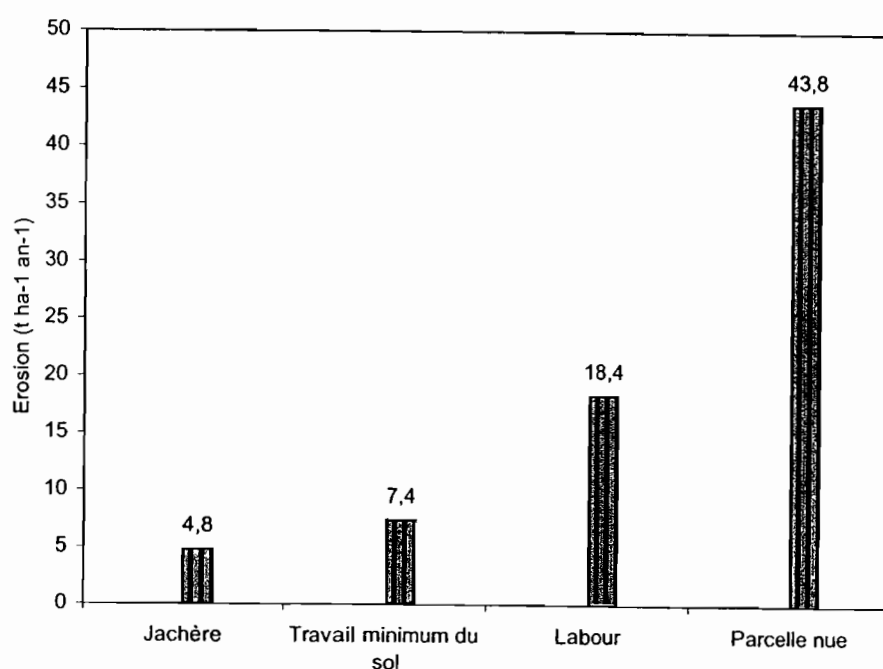
Parcelles	Erosion totale (t ha ⁻¹ an ⁻¹)			Taux de matières en suspension (%)		
	1998	1999	Moy.	1998	1999	Moy.
Sur sol brun						
Labour (100 m ²)	10	18,2	19,1	4	9	7
Labour (1000 m ²)	1,4	9,5	5,5	15	6	10
Travail mini. du sol (100 m ²)	2,3	9,3	5,8	14	35	25
Travail mini. du sol (1000 m ²)	1,2	3,7	2,5	27	3	15
Sur sol rouge						
Labour (100 m ²)	15,8	21	18,4	12	20	16
Labour (1000 m ²)	3,2	5,6	4,4	31	13	22
Travail mini. du sol (100 m ²)	2,7	12	7,4	27	43	35
Travail mini. du sol (1000 m ²)	1,2	2,3	1,8	27	18	23

Tableau 3.8 : Comparaison des pertes en terre mesurées sur parcelles cultivées et jachère (moyenne des campagnes 98 et 99 sur parcelles de 100 m²)

Pratiques culturales et types de sol	E_C / E_J
Labour sur sol brun	8,3
Travail minimum sur sol brun	3,4
Labour sur sol rouge	3,8
Travail minimum sur sol rouge	1,5

NB : E_C : érosion sous culture en t ha⁻¹ an⁻¹

E_J : érosion sous jachère en t ha⁻¹ an⁻¹

Figure 3.11 : Erosion sur sol ferrugineux rouge en fonction de l'occupation du sol (moyenne de valeurs mesurées sur parcelle de 100 m² en 1998 et 1999)

34.4 Teneurs des eaux de ruissellement et des sédiments en éléments chimiques et les pertes d'éléments pour les sols.

L'ensemble des résultats d'analyses faites au laboratoire sur les eaux de ruissellement et les sédiments et les pertes d'éléments chimiques font l'objet de l'annexe III-2.

34.4.1 Teneurs des eaux de ruissellement en éléments chimiques

* Teneurs en carbone soluble et azote total

La teneur en carbone soluble est plus élevée dans les eaux de ruissellement des jachères sur sol ferrugineux et sol gravillonnaire respectivement, 4,20 et 3,30 mg L⁻¹ (tableau 3.9). En

milieu cultivé, la différence entre les deux sols testés est peu nette : avec la pratique du labour, les eaux provenant de la parcelle de sol brun contiennent 2 mg L^{-1} de carbone contre $0,8 \text{ mg L}^{-1}$ pour le sol rouge. Dans le cas de la pratique du travail minimum du sol, les deux sols ne montrent pas de teneurs très différentes (les valeurs sont voisines de 1 mg L^{-1}). En ce qui concerne l'évolution de la teneur des eaux de ruissellement en carbone soluble au cours de la campagne, la tendance, bien que peu nette, est une diminution progressive du début vers la fin de la saison pluvieuse. Le cas de la jachère sur sol ferrugineux illustre bien cette dynamique des teneurs en fonction des périodes de la saison (figure 3.12).

Les teneurs en azote, sous jachère, sont très voisines ($0,60$ à $0,70 \text{ g L}^{-1}$) pour les eaux prélevées sur sols ferrugineux, gravillonnaires bruns vertiques (tab.3.9). Les eaux de ruissellement des sols caillouteux ont montré une teneur nettement inférieure ($0,33 \text{ g L}^{-1}$). En milieu cultivé, les teneurs en azote sont plus importantes que sous jachère (tableau 3.7). Pour ce qui est de la différence entre pratiques culturales, elle semble dépendre du type de sol : sur sol brun labouré, les échantillons prélevés sont 2,5 fois plus riches que ceux prélevés dans la parcelle de travail minimum du sol. Par contre sur sol ferrugineux, les eaux de ruissellement montrent la même teneur en azote quelle que soit la pratique culturale (tab.3.9).

* Teneurs en bases échangeables

Parmi les bases échangeables, le calcium est le plus abondant dans les eaux de ruissellement et cela quel que soit le type de sol et son occupation. Ensuite vient le potassium avec une teneur nettement plus élevée dans les échantillons provenant de la parcelle de jachère sur sol caillouteux. Les échantillons d'eau issus des parcelles sur sol ferrugineux rouge montrent les plus faibles teneurs en potassium et surtout en magnésium. La comparaison entre parcelles de jachère et de culture ne montre pas de différence nette de teneurs en base sauf avec le magnésium. Dans le cas précis du magnésium, les sols brun et les sols ferrugineux se comportent de façon opposée :

- dans les échantillons provenant du sol brun, les teneurs en magnésium sont plus importantes sous culture que sous jachère ($3,34 \text{ mg L}^{-1}$ pour le labour ; $3,06 \text{ mg L}^{-1}$ pour le travail minimum et $2,83 \text{ mg L}^{-1}$ pour la jachère);
- pour le sol ferrugineux, les teneurs sont plus élevées dans l'échantillon issu de la jachère ($1,73 \text{ mg L}^{-1}$ contre $1,24 \text{ mg L}^{-1}$ et $1,20 \text{ mg L}^{-1}$ respectivement pour le travail minimum du sol et le labour).

* Teneurs en phosphore : elles varient très peu, quel que soit le type de sol, l'occupation (jachère ou culture) et la technique culturale (labour ou travail minimum du sol). Les teneurs enregistrées sont toujours inférieures à $0,01 \text{ mg L}^{-1}$ pour le phosphore par colorimétrie. Pour le phosphore ICP, les échantillons provenant des sols ferrugineux et gravillonnaire se démarquent légèrement (respectivement $0,12$ et $0,11 \text{ mg L}^{-1}$), alors qu'ailleurs, les valeurs mesurées sont comprises entre $0,01$ et $0,06 \text{ mg L}^{-1}$.

Tableau 3.9: Qualité des eaux de ruissellement du bassin versant de Djitiko
(valeurs moyennes des mesures faites pendant la campagne 1998)

Sol et occupation	C soluble mg.l^{-1}	N total mg.l^{-1}	Ca mg.l^{-1}	Mg mg.l^{-1}	K mg.l^{-1}	Na mg.l^{-1}	P colorimétrie mg.l^{-1}	P ICP mg.l^{-1}
Sol caillouteux jachère	2,10	0,33	10,78	2,18	16,14	3,64	< 0,01	0,03
Sol brun vertique jachère	1,60	0,63	18,61	2,83	11,66	4,2	< 0,01	0,02
maïs sur labour	2,00	1,95	21,35	3,34	5,71	2,92	< 0,01	0,06
maïs sur travail minimum du sol	1,10	0,76	16,7	3,06	6,18	1,08	< 0,01	0,02
Sol gravillonnaire jachère	3,30	0,69	19,79	2,31	11,36	1,97	< 0,01	0,12
Sol ferrugineux rouge jachère	4,20	0,69	13,45	1,73	5,49	1,4	< 0,01	0,11
maïs sur labour	0,80	0,88	7,56	1,2	4,48	0,83	< 0,01	0,03
maïs sur travail minimum du sol	1,00	0,91	10,58	1,24	7,87	1,53	< 0,01	0,01

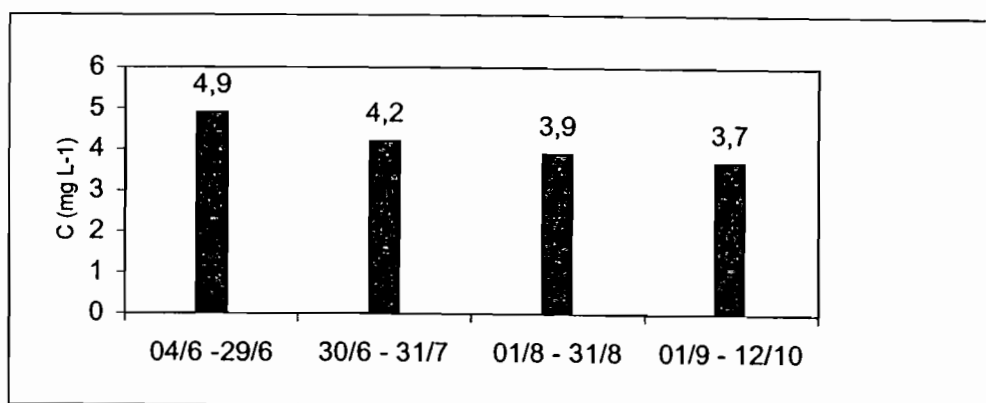


Figure 3.12 : Evolution de la teneur en carbone soluble des eaux de ruissellement au cours de la saison pluvieuse 1998 (cas de la jachère sur sol ferrugineux)

34.4.2 Teneurs des sédiments en éléments chimiques

* Teneurs en carbone et azote total

Les teneurs en carbone et azote total (tab.3.10) dans les jachères varient beaucoup d'un sol à l'autre. Les sédiments issus des sols bruns ont toujours les plus fortes teneurs, suivis des sols gravillonnaires, des sols caillouteux puis des sols ferrugineux rouges. Il est remarquable que ce classement est vérifié pour les deux éléments, carbone et azote. Sous culture, sur sol brun, les teneurs en carbone des sédiments sont plus élevées avec le labour qu'avec le travail minimum du sol, mais les teneurs en azote sont du même ordre de grandeur. Dans le cas du sol ferrugineux rouge, les teneurs en carbone et en azote sont légèrement plus importantes dans les sédiments provenant de la parcelle du travail minimum du sol (figure 3.13). Dans tous les cas, les matières en suspension sont plus riches en éléments chimiques que les terres de fond (tab. 3.10). Dans ces matériaux érodés, on note que les valeurs du rapport C/N sont proches de celles observées dans les sols où l'on pense que la matière organique est mal décomposée en conditions tropicales. Les valeurs de C/N sont légèrement plus élevées dans le cas des sédiments grossiers (terres de fond).

Tableau 3.10 : Teneurs des sédiments en carbone et azote
(valeurs moyennes de la campagne 1998)

Origine des sédiments dans le bassin versant	Teneurs des terres de fond (mg g ⁻¹)			Teneurs des matières en suspension (mg g ⁻¹)		
	C	N	C/N	C	N	C/N
Jachère sur sol caillouteux	23,06	1,33	17,3	36,53	2,43	15,0
Jachère sur sol brun	44,33	2,56	17,3	59,69	4,08	14,6
Maïs avec labour sur sol brun	26,34	1,64	16,1	38,04	2,47	15,4
Maïs avec travail minimum sur sol brun	27,51	1,78	15,5	10,44	3,1	3,4
Jachère sur sol gravillonnaire	36,58	1,98	18,5	45,71	3,14	14,6
Jachère sur sol ferrugineux rouge	18,8	1,19	15,8	24,01	1,92	12,5
Maïs avec labour sur sol ferrugineux rouge	18,03	1,33	13,6	13,39	1,73	7,7
Maïs avec travail minimum sur sol ferrugineux rouge	17,27	1,07	16,1	21,34	1,73	12,3

* Teneurs en bases échangeables.

Les teneurs des sédiments en Ca, Mg, K et Na sont données au tableau 3.11. Ici, comme dans les eaux de ruissellement, les teneurs en calcium sont les plus importantes et cela quel que soit le type de sol et son occupation. Les sédiments issus du sol brun sont les plus riches, alors que ceux provenant du sol ferrugineux rouge sont les plus pauvres. Sur ces deux types de sol, les mesures montrent que les sédiments des parcelles cultivées sont plus riches que ceux des jachères, dans le cas général (tableau 3.11). S'agissant des teneurs en magnésium, les

différences observées entre sols et entre occupations sont peu marquées. Avec plus de 3 méq/100 g de terre, les sédiments du sol caillouteux sont nettement plus riches en potassium que les sédiments issus des sols. En ce qui concerne le sodium, les teneurs varient de 0,1 méq/100 g de terre (sédiments des parcelles sur sol ferrugineux rouge) à 0,43 méq/100 g de terre (sédiments de la parcelle sur sol caillouteux).

*** Les teneurs en phosphore assimilable**

Elles sont nettement plus élevées dans les sédiments du sol brun, suivis par ceux du sol gravillonnaire (tableau 3.10). Les plus faibles teneurs ont été notées avec les sédiments provenant de la jachère sur sol caillouteux et du labour sur sol ferrugineux (respectivement 94,39 ppm et 82,13 ppm). La comparaison des pratiques culturales montre que les sédiments obtenus avec le travail minimum sont plus riches en phosphore assimilable que les sédiments de la parcelle labourée : le rapport est de 2,4 sur sol brun et 1,6 sur sol ferrugineux.

Tableau 3.11 : Teneurs des sédiments en bases échangeables et phosphore assimilable (valeurs moyennes au cours de la campagne, 1998)

Origine des sédiments (sol et occupation)	Eléments chimiques				
	Ca méq/100	Mg méq/100	K méq/100	Na méq/100	P ppm
jachère sur sol caillouteux	32,41	9,17	3,53	0,43	93,39
jachère sur sol brun vertique	48,73	7,08	1,96	0,24	393,21
maïs avec labour sur sol brun vertique	52,08	6,43	2,22	0,22	239,94
maïs avec travail minimum sur sol brun vertique	52,81	7,63	1,87	0,2	586,66
jachère sur sol gravillonnaire	39,9	4	1,41	0,21	224,47
jachère sur sol ferrugineux	18,95	3,23	1,02	0,15	134,7
maïs avec labour sur sol ferrugineux	16,43	2,07	0,75	0,1	82,13
maïs avec travail minimum sur sol ferrugineux	20,26	2,14	0,91	0,1	128,53

34.4.3 Pertes d'éléments chimiques par ruissellement et érosion des sols

*** Pertes de carbone et d'azote**

Les pertes annuelles en carbone et azote sous jachère sont nettement plus faibles sur sol caillouteux (tableau 3.12) : respectivement 35,1 kg ha⁻¹an⁻¹ et 1,5 kg ha⁻¹an⁻¹. Elles sont plus fortes sur sol brun (carbone = 124,5 kg ha⁻¹an⁻¹; azote = 8,3 kg ha⁻¹an⁻¹) alors que la plus forte perte est notée sur sol ferrugineux rouge (3,95 kg ha⁻¹an⁻¹). Les différences entre les pertes mesurées sous jachère et sous cultures sont montrées à la figure 3.13. Les pertes en carbone et azote sont toujours plus élevées avec le labour qu'avec le travail minimum du sol.

Dans toutes les situations pédologiques et d'occupation du sol du bassin versant, les pertes de carbone et d'azote sous forme dissoute sont très faibles par rapport aux pertes sous forme solide (tableau 3.12).

Tableau 3.12 : Pertes de carbone et d'azote par ruissellement et érosion

F1 : forme dissoute

F2 : forme solide mesurée dans les sédiments grossiers (terres de fond)

F3 : forme solide mesurée dans les matières en suspension (MES)

Sols et occupations	Carbone Kg ha ⁻¹ an ⁻¹					Azote Kg ha ⁻¹ an ⁻¹				
	F1	F2	F3	F2+F3	Total	F1	F2	F3	F2+F3	Total
Sol caillouteux										
jachère	2,45	18,2	14,5	32,6	35,1	0,17	1,03	0,32	1,35	1,5
Sol brun vertique										
jachère	2,5	64,9	57,2	122	124,5	1,06	3,59	3,6	7,19	8,3
labour	2,55	6,24	2,87	9,11	11,7	2,32	5,09	0,19	5,28	7,6
Travail minimum du sol	1,75	45,4	2,91	48,3	50,1	1,03	2,91	2,08	4,99	6,0
Sol gravillonnaire										
jachère	7,40	69,4	32	101	108,9	1,59	0,3	0,58	0,88	2,5
Sol ferrugineux rouge										
jachère	9,61	62,1	18,4	80,4	90,0	1,98	3,95	0,18	4,13	6,1
labour	2,49	362	24,1	386	388,3	2,82	26,2	2,09	28,2	31,1
Travail minimum du sol	1,71	44,4	15,6	60	61,7	1,65	2,66	1,28	3,94	5,6

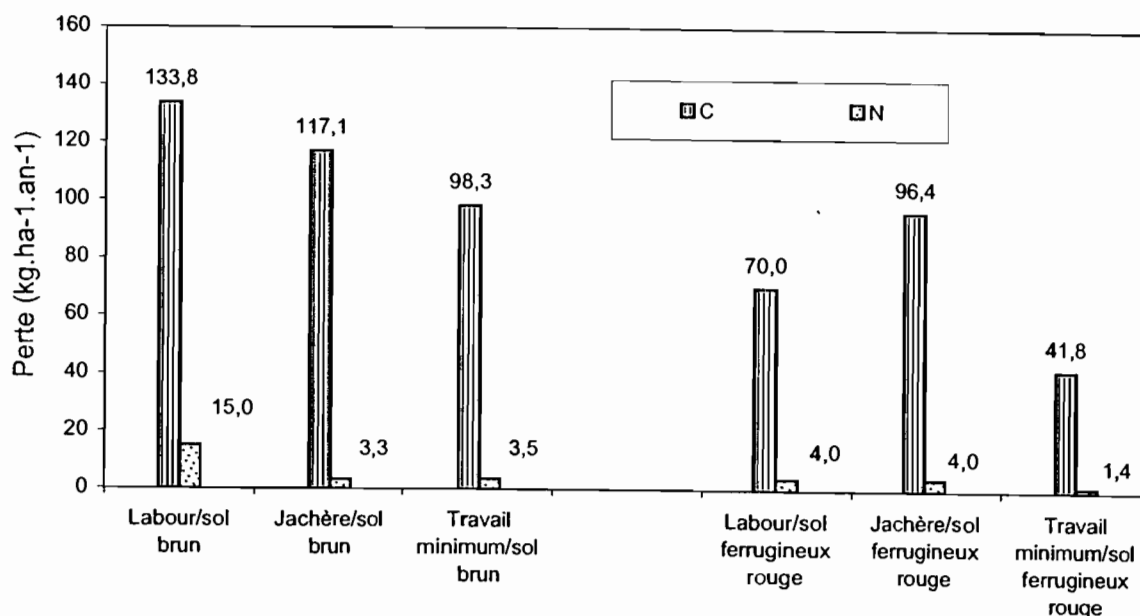


Figure 3.13 : Pertes de carbone et d'azote sur sol brun et sol ferrugineux rouge (mesures de la campagne 1998)

Les pertes mesurées sur différents sols et avec différentes occupations sont données au tableau 3.13. Les pertes en calcium sont les plus importantes en kg ha^{-1} et sont du même ordre de grandeur quel que soit le sol et son occupation. Ici, contrairement à ce qui a été observé avec le carbone et l'azote, les pertes de bases échangeables sont nettement plus importantes sous forme dissoute que solide. Dans le cas du calcium par exemple, le rapport entre forme dissoute et forme solide est le plus souvent supérieur à 2 et peut même dépasser 3.

Tableau 3.13 : Pertes ($\text{kg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) de bases échangeables et phosphore assimilable par ruissellement et érosion (mesures de la campagne 1998)

F1 : forme dissoute

F2 : forme solide

total = F1 +F2 (pertes totales)

Sols et occupations	Ca			Mg			K			Na			P		
	F1	F2	total	F1	F2	total	F1	F2	total	F1	F2	total	F1	F2	total
Sol caillouteux jachère	11,4	4,4	15,8	2,5	0,7	3,2	17,1	1,2	18,2	3,9	0,1	3,9	0,0	0,0	0,0
Sol brun vertique jachère	29,1	12,8	41,8	4,3	1,0	1,2	17,1	0,8	17,9	6,7	0,1	6,8	0,0	74,1	74,1
labour	24,6	13,7	38,3	3,8	1,2	1,2	7,0	0,9	7,8	3,5	0,0	3,6	0,1	0,0	0,1
travail minimum du sol du sol	20,8	14,2	35,0	4,2	1,5	1,5	7,5	0,9	8,4	1,3	0,2	1,6	0,3	0,1	0,3
Sol gravillonnaire jachère	37,9	11,8	49,7	4,2	0,7		20,7	0,7	21,4	4,6	0,1		0,2	0,0	
Sol ferrugineux rouge jachère	25,8	8,3	34,1	3,4	1,1	1,2	10,9	0,8	11,7	2,8	0,1	2,8	0,2	0,0	0,2
labour	14,9	22,8	37,7	3,1	1,6	1,2	14,2	1,8	16,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1
travail minimum du sol	34,8	7,6	42,4	1,8	0,5	1,5	13,4	0,5	13,9	2,8	0,0	2,9	0,0	0,0	0,0

3.5 Discussions

* Les pluies

Pour nos deux campagnes (1998 et 1999) de mesure de ruissellement et d'érosion sur parcelles, la valeur de l'indice d'agressivité climatique R_{USA} calculé (respectivement 674 et 834) a été plus forte que la valeur déjà connue pour la région : 500 (Roose, 1977). Cette différence non négligeable pourrait provenir du nombre limité de données utilisées dans notre cas. La plus forte agressivité climatique enregistrée au cours des mois de juillet août et septembre s'explique par leur forte pluviosité. Ce trimestre semble se caractériser par une forte agressivité dans l'ensemble de la zone soudanienne. A Khorogo, au nord de la Côte d'Ivoire par exemple, Roose (1979) a trouvé que 67 % de l'indice d'agressivité annuelle adviennent de juillet à septembre.

*** Le ruissellement**

La sensibilité des différents matériaux pédologiques au ruissellement est clairement mise en évidence par les coefficients mesurés (en particulier le KRAM) sur parcelles nues. Le sol ferrugineux qui vient en tête par la forte valeur du KRAM semble être le plus sensible à la réorganisation superficielle (matériau riche en limon, plus de 50 % du matériau superficiel). Les faibles valeurs de la pluie d'imbibition (13 mm à l'état sec et 6 mm à l'état humide) sont indicatives dans ce sens.

Le fort coefficient de ruissellement sur sol gravillonnaire a déjà été noté par plusieurs chercheurs ayant travaillé sur les couvertures pédologiques de l'Afrique de l'ouest (Roose, 1975 ; Collinet, 1978 ; Casenave et Valetin, 1989). Cependant, il faut noter qu'il existe dans cette région, plusieurs types de sols gravillonnaires appartenant à des classes pédologiques différentes (en particulier aux classes des sols ferrallitiques et des sols peu évolués d'érosion). Dans le cas précis du bassin versant de Djitiko où il est question de sol peu évolué d'érosion sur cuirasse (voir chapitre 2), le comportement du sol gravillonnaire, s'explique essentiellement par deux facteurs :

- Il présente très peu d'ouverture comme précisé au chapitre 2 (5% d'ouverture en début de saison et 2 % du milieu à la fin) et est couvert de pellicule à plus de 90 % toute l'année; les gravillons sont pris dans la croûte formée par la matrice très instable.

- La faible épaisseur du sol (présence d'une cuirasse peu perméable à moins de 40 cm) n'est pas favorable à l'infiltration d'une quantité importante d'eau.

Le plus faible KRAM enregistré sur sol brun pourrait s'expliquer par la forte perméabilité de ce sol en début de saison, cela étant probablement en rapport avec sa forte fissuration.

Sous jachère, le comportement du sol caillouteux (en particulier moins de ruissellement que sur sols brun et ferrugineux) ne s'explique pas seulement par son état de surface. En effet, par rapport au sol brun, par exemple, il présente le même taux d'ouverture en début de saison (22%) et une moindre ouverture au milieu et à la fin de la saison (86 % contre 93 %). Le comportement du sol caillouteux pourrait donc s'expliquer, principalement, par la morphologie de son profil, marquée par la présence de roche altérée à partir de 40 cm et une très forte porosité, des caractéristiques favorables à une forte infiltration. Cela confirme que l'état de surface n'est pas le seul responsable de l'hydrodynamique des sols en savane humide (Casenave et Valentin, 1989).

Pour ce qui est de l'augmentation du ruissellement avec le labour, elle peut s'expliquer par la dynamique de réorganisation superficielle (voir chapitre 2). Quant à la diminution du ruissellement avec le travail minimum du sol, elle est favorisée aussi par un effet "état de

surface" : présence du mulch (stimulateur de l'activité biologique) et un taux d'ouverture relativement important.

*** L'érosion**

La faible érosion relative qui est enregistrée sous jachère est tout à fait normale, conforme aux connaissances acquises sur l'érosion. En terme de quantité de terres perdues à l'hectare, les valeurs mesurées (plus de $3 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) sur sol ferrugineux et sol gravillonnaire sont supérieures aux valeurs données dans la littérature relative à la zone soudanienne : par exemple les mesures faites par Roose au cours des années 1970 (Roose, 1981). Une telle situation ne peut pas être beaucoup discutée ici à cause de la courte durée de mesure. Cependant, il est connue que les caractéristiques des jachères sont assez variables à l'intérieur de la zone soudanienne.

Sur un autre plan, les érosions mesurées sous jachère semblent surprendre vue les modes de gestion en vigueur, apparemment défavorables. En effet, en début de saison, les jachères en question présentent un taux de recouvrement (par la végétation et la litière) généralement inférieur à 45 %, une conséquence des pratiques locales de gestion du milieu physique (passage annuel de feux en particulier). Un tel taux de recouvrement serait alors suffisant pour apporter à ces sols une protection assez grande. Le rôle important de cette maigre végétation est confirmé par le comportement des parcelles nues (recouvrement nul) et des parcelles cultivées (recouvrement généralement inférieur à 15 % en début de saison). Par exemple, les parcelles dénudées et exposées à partir de juin 1997, ont produit au cours des campagnes 98 et 99, une érosion cumulée de 93 t ha^{-1} sur sol brun vertique contre $3,4 \text{ t ha}^{-1}$ pour la jachère et 88 t ha^{-1} sur sol ferrugineux rouge contre $9,6 \text{ t ha}^{-1}$ pour la jachère. On peut penser aussi que les taux de matière organique de ces sols sous jachère (voisin de 2% et plus pour le sol brun vertique) sont suffisants pour les protéger contre le détachement des particules.

Parmi les deux pratiques culturales testées, le labour et le travail minimum, la première expose plus le sol à l'érosion, un constat déjà noté par de nombreux chercheurs (par exemple Lal, 1975, Boli, 1996). Nous avons constaté que la deuxième technique favorise l'accumulation du mulch à la surface du sol d'où une meilleure protection contre l'énergie cinétique des pluies et de ruissellement. Au contraire, le labour ne favorise pas le maintien d'un bon état de surface; la fragmentation des mottes qu'elle provoque réduit la cohésion des matériaux et semble être favorable au déplacement des particules de terre et à la réorganisation superficielle.

*** Les pertes d'éléments chimiques**

De façon générale, au plan international, il existe actuellement peu de données sur les pertes d'éléments (carbone organique et nutriments) par érosion hydrique (Starr et al, 2000) ce qui limite ici les discussions.

Les résultats précédemment présentés montrent que l'essentiel des pertes en carbone et azote se fait par les sédiments, les pertes par les eaux de ruissellement étant très faibles. Cela veut dire que le carbone est principalement entraîné avec les fractions granulométriques du sol. Les rapports C/N semblent montrés par leur valeurs (toujours inférieures à 20) que la matière organique notée dans les sédiments provient effectivement des matériaux pédologiques et n'inclue pas les débris grossier de la surface.

Contrairement au carbone et à l'azote, les bases échangeables sont essentiellement perdues avec les eaux de ruissellement (carbone et l'azote). Les pertes de sodium se font essentiellement par les eaux de ruissellement. Cela peut être particulièrement préjudiciable à la durabilité des systèmes agricoles dans la mesure où le ruissellement est très important comme montré au tableau 3.5.

Il faut retenir que toutes ces tendances observées, en ce qui concerne les pertes d'éléments chimiques ont besoin d'être confrontées à des résultats ultérieurs.

3.6 Conclusion

Les mesures de ruissellement et d'érosion dans le bassin versant de Djitiko ont permis de classer les sols en fonction de leur sensibilité au ruissellement et à l'érosion hydrique.

Dès le milieu de la saison pluvieuse, les sols deviennent très sensibles au ruissellement. Ainsi des pluies nettement inférieures à 10 mm peuvent provoquer le ruissellement.

Les plus fortes érosions sont mesurées sur les sols ferrugineux tropicaux.

Les jachères montrent des érosions faibles, malgré la destruction considérable de la biomasse par les feux de brousse et la fonction de pâturage avec une pression animale devenue plus importante au cours des dernières décennies. Cependant, dès qu'on détruit la jachère pour installer des cultures avec les techniques actuelles (labour en particulier), l'érosion augmente rapidement. Si la mise en culture se fait en pratiquant le travail minimum du sol, l'érosion reste nettement faible.

La comparaison des types de sol et de leur occupation montre le même rapport entre les érosions mesurées, indépendamment de la taille de la parcelle expérimentale. Il semble bien que la taille de la parcelle expérimentale a peu d'importance dans l'étude comparative des

différents types de sol du bassin versant de même que dans la comparaison du labour et du travail minimum du sol.

Les pertes de carbone et d'azote se font principalement sous forme solide alors que les pertes en bases échangeables se font essentiellement sous forme dissoute.

CHAPITRE IV
RECHERCHE D'INDICATEURS D'ERODIBILITE DES
SOLS EN LABORATOIRE

4.1 Introduction

Parallèlement aux mesures de ruissellement et d'érosion sur parcelles, nous avons fait des études de comportement des sols au laboratoire. Cet axe de recherche a été envisagé pour identifier des indicateurs pertinents d'érodibilité des sols étudiés. Les études sur échantillons au laboratoire permettent généralement l'acquisition de données importantes dans des délais plus courts que sur le terrain. C'est pourquoi, l'identification d'indicateurs d'érodibilité des sols en laboratoire peut offrir de grandes possibilités dans les études de spatialisation des risques d'érosion des sols.

4.2 Généralités

4.2.1 Le facteur d'érodibilité K de l'USLE (Universal soil loss equation) et son évaluation

D'après le dictionnaire de la science du sol (Lozet et Mathieu, 1986), l'érodibilité est la propriété spécifique du sol qui peut être évaluée quantitativement comme la vulnérabilité du sol à l'érosion dans des circonstances précises.

D'après Roose (1994), l'érodibilité d'un sol en tant que matériau plus ou moins cohérent, est sa résistance à deux sources d'énergie : d'une part, la battance des gouttes de pluies à la surface du sol et d'autre part, l'entaille du ruissellement entre les mottes, dans les griffes ou rigoles.

Le facteur d'érodibilité du sol, K, dans l'USLE est une valeur quantitative et sans unité, déterminée de façon expérimentale (Wischmeier et Smith, 1978) :

$$E = R \times K \times LS \times CP \times 2,24, \text{ d'où } K = \frac{E}{R \times SL \times CP \times 2,24}$$

E = érosion en tonne par hectare

R = érosivité des pluies

K = érodibilité

L = longueur de la pente et S = son inclinaison

C = couvert végétal et P = pratique culturale

Pour un sol donné, K est le taux de perte en sol par l'unité d'indice d'érosion tel que mesuré sur une parcelle nue standard. Cette dernière est arbitrairement définie comme une parcelle nue de 22,2 m de long et 9% de pente, travaillée dans le sens de la pente sans enfouissement de matière depuis trois ans. Une telle parcelle est généralement appelée parcelle de Wischmeier. Cette appellation, par extension, est utilisée le plus souvent pour toute petite parcelle de mesure d'érosion.

A l'issue de calculs de régressions multiples par Wischmeier et Smith aux USA, cités par Roose (1994), il s'avère que l'érodibilité d'un sol dépend essentiellement :

- du taux de matière organique,
- de la texture, en particulier les taux des fractions granulométriques de 2 à 100 microns,
- et enfin de la structure et de la perméabilité.

Par la suite, un autre chercheur américain Singer (1978) a montré qu'il faut tenir compte d'autres facteurs dans le cas des sols californiens, en particulier le fer et l'alumine libre, le type d'argile et la salure des matériaux.

En résumé il faut retenir que l'érodibilité d'un sol est fonction des interactions complexes d'un nombre important de ses propriétés physiques et chimiques.

Les mesures directes de K sur parcelle standard reflètent les effets combinés de toutes les propriétés du sol qui influencent de façon significative l'érosion du sol par la pluie et le ruissellement s'il n'est pas protégé (Wischmeier et Smith, 1978). Par ailleurs, K est la valeur moyenne pour un sol donné et sa mesure directe demande des mesures d'érosion pour une gamme représentative d'intensités pluviales et de conditions d'humidité du sol.

L'érodibilité d'un sol change avec le temps (Roose, 1973; Bergsma et al, 1996). De Ploey (1981), cité par Bergsma et al (1996), attribue le changement de l'érodibilité, pendant un événement pluvieux, à deux facteurs :

- l'érosion sélective et le développement du pavage de particules grossières ;
- la diminution de la rugosité et la progression de l'encroûtement.

La mesure directe de l'érodibilité K a permis à Wischmeier, Jhonson et Cross (1971) l'établissement d'un nomograph. Ce graphique permet de faire l'estimation de K pour un sol à partir des taux de *silt* (2 à 100 μ), de sable grossier (200 à 2000 μ), de matière organique et des caractéristiques de la structure du sol et sa perméabilité.

Pour des sols contenant moins de 70% de limon et sable fin, l'équation du nomograph s'écrit :

$$100K = 2,1 M^{1,14}(10^{-4})(12-a) + 3,25 (b-2) + 2,5 (c-3)$$

M= pourcentage des fractions granulométriques de 2 à 100 μ

a = pourcentage de matière organique

b = code de la structure

c = classe de perméabilité

Aux îles Hawaii, El Swaify et Dangler (1976), cités par Wischmeier et Smith (1978), ont déterminé, pour 10 types de sols, des valeurs de K qui varient de 0,10 à 0,49.

Pour les principaux sols d'Afrique de l'Ouest, Roose (1977) a trouvé les valeurs suivantes de K : 0,01 à 0,20 (sols ferralitiques) ; 0,20 à 0,30 (sols ferrugineux) ; 0,01 à 0,04 (sols gravillonnaires); < 0,1 à 0,01 (vertisols).

De nombreux pays ont dressé des cartes de susceptibilité à l'érosion et distinguent généralement cinq à six classes (Duchaufour, 1997). Par exemple :

- Luken et Grivas distinguent à Chypre, cinq classes avec K s'échelonnant de 0,05 à 0,60, selon quatre critères (granulométrie, structure, % M.O, perméabilité).
- En Allemagne, en Westphalie, les cartographes ont procédé à un classement comparable avec cinq classes (K varie de 0,1 à 0,7).

Les résultats présentés au chapitre 3 (mesures d'érosion sur parcelles nues, nous ont permis les valeurs suivantes de K pour les sols du bassin versant de Djitiko :

- sol ferrugineux rouge : 0,13
- sol brun vertique : 0,10
- sol gravillonnaire : 0,01

42.2 L'érodabilité des terrains

En parlant d'érodabilité des terrains, on fait allusion au comportement d'un milieu plus complexe que le matériau sol. En effet, l'étude de l'érodabilité des terrains prend aussi en compte, des facteurs comme la pente et le couvert végétal. Ainsi, le croisement de différentes couches d'informations peut permettre d'établir une carte d'érodabilité d'un espace donné, bassin versant ou région agricole par exemple.

42.3 Le concept d'indicateur d'érodibilité des sols et mesures au laboratoire.

42.3.1 Le concept

Par définition, un indicateur est un test qui signale l'importance d'un état. Ex : indicateur coloré, utilisé au laboratoire dans les analyses de nature chimique ; indicateur économique , utilisé dans la caractérisation de la vie économique d'un pays.

Un indicateur d'érodibilité des sols doit :

- permettre la comparaison objective de différents sols sur le plan de leur susceptibilité à l'érosion.
- faciliter la mise au point d'outils d'aide à la décision pour l'aménagement et la gestion des sols (par exemple, classement des sols en fonction de leur sensibilité à l'érosion, carte des risques d'érosion).

Pour remplir ces différentes fonctions, l'indicateur d'érodibilité des sols doit être :

- une grandeur mesurable ;
- relativement facile à mesurer;
- le reflet des propriétés du sol qui ont une influence nette sur les processus d'érosion.

La recherche de tels indicateurs a longtemps préoccupé les pédologues. En effet, toute une série de tests de laboratoire ou de terrain ont été mis en place pour tenter de définir la stabilité de la structure vis-à-vis de l'eau (Roose et Sarrailh, 1990 ; Roose 1994).

42. 3.2 Les mesures d'indicateurs d'érodibilité au laboratoire

De façon générale, en période humide, la structure d'un sol se modifie : les mottes se soudent entre elles, l'ensemble prenant l'aspect d'une masse boueuse à l'état humide et continue à l'état sec. Cette dynamique est liée à deux causes (Hénin, 1976) : d'une part, le volume des agrégats peut changer en fonction de l'humidité, d'autre part, ces agglomérats ont plus ou moins tendance à se déliter au contact de l'eau. Cette dégradation de la structure est complexe et a depuis longtemps attiré l'attention de nombreux chercheurs (par exemple, Keen, 1931 ; Henin, 1939 ; Ellison, 1954; Marty, 1969) cités par Hénin (1976). La stabilité des agrégats soumis à l'impact des gouttes d'eau a été reconnue par plusieurs auteurs (Mc Calla, 1944 ; Farres et Cousen, 1985) comme un facteur important, en relation avec l'érodibilité des sols. Cela justifie l'orientation générale de la recherche d'indicateurs d'érodibilité vers la caractérisation de l'état structural des sols.

Il existe plusieurs méthodes classiques de mesure de la stabilité structurale des sols (Le Bissonnais et Le Souder, 1995). Elles se distinguent les unes des autres par la taille des échantillons, leur traitement et l'expression des résultats. La taille des échantillons soumis aux tests est généralement celle des agrégats et rarement le sol entier. Parmi les traitements appliqués par les différents laboratoires, il faut citer le tamisage dans l'eau et dans les solutions dispersantes, l'utilisation d'ultrasons, la simulation de pluies et de gouttes d'eau. Concernant l'expression des résultats, le plus souvent, les laboratoires présentent les données sous la forme de la taille des particules en plusieurs classes.

4.3 Les indicateurs d'érodibilité des sols du bassin versant de Djitiko

A la recherche des indicateurs d'érodibilité, nous avons conduit des tests sur échantillons prélevés à la fin des campagnes hydrologiques 1997 et 1998. Il s'agit de tests de stabilité structurale (agrégats et mottes) et de simulation de pluies sur des populations d'agrégats. Les

résultats obtenus ont déjà été partiellement publiés (Diallo et al, 1998a ; Diallo et al 1999 Diallo et al, 2000).

43.1 Matériels testés : les sols et leurs occupations

A la fin de la campagne 1997, les échantillons destinés aux différents tests ont été prélevés sur 6 parcelles, réparties entre les deux unités typologiques de sol les plus cultivées du bassin versant (tableau 4.1). Pour chaque parcelle, un échantillon composite (mélange de 9 échantillons) est retenu pour le laboratoire. Après tamisage, 4 échantillons (un échantillon équivaut à une répétition) sont retenus par parcelle.

L'objectif a été de comparer le comportement des deux sols avec différentes occupations (jachère, nu, culture avec labour). Les caractéristiques pédologiques de ces sols ont déjà été données au chapitre 2.

A la fin de la campagne 1998, les échantillons destinés aux différents tests ont été prélevés suivant la même démarche que précédemment. Ils ont été prélevés sur 12 parcelles, de façon à couvrir :

- les 6 principales unités typologiques de sol du bassin versant,
- les principaux types d'occupation du sol : jachère, culture (avec labour et avec travail minimum du sol) et parcelles nues (tableau 4.2). Les résultats de mesures de matière organique faites sur les échantillons de sol utilisés sont donnés au tableau 4.3.

Tableau 4.1 : Origines des échantillons prélevés en 1997 pour les études de comportement en laboratoire

Unité typologique de sol	Site de prélèvement (parcelle) occupation du sol	Observations
UTS2 (sol brun vertique)	Jachère : BJ Nue : BN Culture (maïs) avec labour : BL	Tous les prélèvements ont été faits le même jour sur 10 cm à l'aide de tubes
UTS5 (sol ferrugineux rouge)	Jachère : RJ Nue : RN Culture (maïs) avec labour : RL	

Tableau 4.2 : Origines des échantillons prélevés en 1998 pour les études de comportement en laboratoire

Unité typologique de sol	Site de prélèvement (parcelle) occupation du sol	Observations
UTS1 (sol caillouteux)	Jachère : CJ Jachère : BJ	Tous les prélèvements ont été faits le même jour sur 10 cm à l'aide de tubes
UTS2 (sol brun vertique)	Nue : BN Culture (coton) avec labour : BL Culture (coton) avec travail minimum du sol : BM	
UTS3 (sol gravillonnaire)	Jachère : GJ Nue: GN	
UTS4 (sol ferrugineux jaune)	Jachère : JJ Jachère : RJ	
UTS5 (sol ferrugineux rouge)	Nue : RN Culture (coton) avec labour : RL Culture (coton) avec travail minimum du sol : RM	
UTS6 (sol ferrugineux beige)	Jachère : BeJ	

Tableau 4.3 : Teneurs en matière organique des échantillons prélevés (couche 0-5 cm) sous jachère en 1998 pour les études de comportement en laboratoire.

Matière organique	sol caillouteux	sol brun vertique	sol gravillonnaire	sol jaune	sol rouge	Sol beige
C (mg g ⁻¹)	26.3	33,0	14.0	8.2	10.3	7.9
N (mg g ⁻¹)	1.5	2.0	1.0	0.5	0.6	0.5
C/N	17.7	16.4	14.2	15.1	16.3	16
MO (%)	4,5	5,7	2,4	1,4	1,8	1,4

43.2 Méthodes utilisées

43.2.1 Test de stabilité des agrégats

Principe

La méthode utilisée a été développée au Laboratoire d'étude du comportement des sols cultivés (LCSC), au Centre IRD de Montpellier (Barthès, 1998). Cette méthode, inspirée directement de celle de Kemper et Rosenau (1986), permet de caractériser la distribution en classes d'agrégats d'un échantillon de sol soumis à une désagrégation standard. L'échantillon tamisé à 2 mm est immergé dans l'eau puis tamisé à 0.2 mm par agitation dans l'eau. La proportion de macroagrégats stables (> 0.2 mm) dans la fraction > 0.2 mm est calculée en déduisant le poids des sables grossiers. Les proportions de mésoagrégats (0.02-0.2 mm) et de microagrégats (< 0.02 mm) dans la fraction < 0.2 mm sont déterminées par sédimentation

(pipette Robinson). Quatre fractions sont ainsi distinguées : sables grossiers, macroagrégats, mésoagrégats et microagrégats.

Equipement.

Il comprend huit tamis et un dispositif pour les agiter. Les tamis sont des tubes cylindriques en acier inoxydable (hauteur 12.5 cm, diamètre 4.5 cm), ouverts au sommet et fermés à la base par une grille à maille carrée de 0.2 mm. Le dispositif d'agitation comprend un plateau supérieur mobile et un plateau inférieur fixe. Le premier est percé de huit orifices recevant chacun un tamis. Le second comporte des loges situées sous les orifices du plateau supérieur et recevant chacune un bêcher de 250 mL. Un moteur commandé par un minuteur anime le plateau supérieur d'un mouvement vertical (amplitude 1.3 cm, fréquence 35 cycles/mn), permettant l'agitation de la base des tamis dans le liquide des bêchers.

Procédure

* Préparation et pesée des échantillons. Les échantillons proviennent de sol non remanié séché à l'air et tamisé à sec à 2 mm avec un tamis à mailles carrées. Pour le test, 4 ± 1 g d'échantillon sont directement pesés dans chaque tamis.

* Réhumectation des échantillons. La base de chaque tamis contenant l'échantillon est plongée pendant 2 h dans un bêcher contenant 100 mL d'eau déminéralisée froide (température ambiante). Cette humectation brutale favorise l'éclatement des agrégats.

* Tamisage. Les tamis sont ensuite placés dans les orifices du plateau supérieur de l'agitateur et les bêchers, avec leur eau, dans les loges du plateau inférieur. Le moteur de l'agitateur est alors mis en marche pendant 6 mn, ce qui provoque une succession d'immersions et d'émersions de la base des tamis dans l'eau des bêchers, entraînant le tamisage des échantillons. Après 6 mn, le plateau supérieur est mis en position haute, pour permettre l'égouttage des tamis. Ceux-ci sont séchés 16 à 24 h à l'étuve (105°C), puis pesés. Le poids de la fraction restant dans le tamis, notée $F_{>0.2}$, est calculé après déduction de la tare, et rapporté au poids de l'échantillon initial séché à 105°C.

* Estimation de la teneur en éléments < 0.02 mm (MI). La teneur en particules < 0.02 mm (argile, limon fins, microagrégats) dans l'eau des bêchers est mesurée par la méthode de la pipette Robinson. Le contenu de chaque bêcher est transvasé dans une allonge de 100 mL, qui subit 30 retournements manuels avant d'être posée sous la pipette. Après un temps suffisant

pour permettre la sédimentation des particules > 0.02 mm, un échantillon de la suspension est prélevé dans l'allonge avec la pipette, versé dans une boîte tarée puis séché à 105°C pendant 16 à 24 h, et enfin pesé. Après déduction de la tare, le poids de la fraction < 0.02 mm, notée MI (pour microagrégats), est calculé et rapporté au poids de l'échantillon initial séché à 105°C .

* Estimation de la teneur en sables grossiers (SG). La fraction $F > 0.2$ mm, après séchage et pesée, est agitée et tamisée dans une solution dispersante. A la différence du tamisage précédent, les béciers du plateau inférieur sont remplis avec 100 mL de solution dispersante (contenant 2 g L^{-1} de NaOH, soit 0.05 M). Les cycles de tamisage sont poursuivis jusqu'à ce que ne subsistent dans le tamis que les sables grossiers et les débris végétaux grossiers. Après ce tamisage dans la soude diluée, les tamis contenant sables grossiers et débris végétaux sont égouttés et séchés pendant 6 à 10 h à 105°C , puis pesés. Le poids des sables grossiers, notés SG, est calculé après déduction de la tare et rapporté au poids de l'échantillon initial séché à 105°C , le poids des débris végétaux étant négligé.

Dans le cas de certains échantillons riches en matière organique, la solution dispersante utilisée ne permet pas une dispersion suffisante ; la dispersion totale est obtenue soit par une sonde à ultrasons, soit en écrasant doucement les agrégats et en séparant les matières organiques par lavage.

* Calculs et expression des résultats. Les opérations décrites permettent de mesurer les teneurs $F > 0.2$ (fraction > 0.2 mm), SG (sables grossiers) et MI (< 0.02 mm) de l'échantillon soumis au test de désagrégation. Tous les résultats sont exprimés en g kg^{-1} d'échantillon initial séché à 105°C . La teneur en macroagrégats stables (> 0.2 mm), notée MA et rapportée au poids de l'échantillon initial séché à 105°C , est calculée par différence : $\text{MA} = F > 0.2 - \text{SG}$. La teneur en mésoagrégats (0.02 à 0.2 mm), notée ME, est calculée par différence : $\text{ME} = 1000 - \text{MA} - \text{MI}$. Quatre répétitions sont réalisées pour chaque traitement.

43.2.2 Test de stabilité des mottes

Principe

Le test consiste à soumettre des mottes naturelles de sol de 4 g à l'effet de gouttes d'eau produites au laboratoire. Le volume d'eau nécessaire pour désagréger la motte, les taux de macroagrégats stables et de microagrégats sont mesurés par la suite.

Equipement

Il comprend une burette, un entonnoir, un tamis et un bûcher.

La burette, graduée est munie d'un robinet permettant de former des gouttes d'eau de diamètre 3 mm, à une hauteur de 1 m au dessus de la motte.

L'entonnoir contenant la motte de sol placée sur une nacelle en fil de fer de 2 mm, est installé sous la burette; il doit être suffisamment grand , pour minimiser les pertes de particules de sol par éclaboussement.

Le tamis à mailles carrées de 0.2 mm est installé dans un bûcher vide placé sous l'entonnoir.Ce dispositif permet de séparer les grosses particules (macroagrégats et sables grossiers) retenus par le tamis et les particules de diamètre inférieur en suspension qui sont recueillies dans le bûcher.

Procédure

* Préparation et pesée des échantillons. Les échantillons provenant de sol non remanié sont séchés avant la formation manuelle de grosses mottes (10 g). Pour le test lui même, on affine les mottes ($4\text{ g} \pm 1$); la motte est placée sur la nacelle à l'intérieur de l'entonnoir.

* Désagrégation de la motte. Les gouttes d'eau de 3 mm formée à partir de la burette tombent, d'une hauteur choisie à 1 mètre, directement sur la motte et la désagrègent progressivement. Les particules grossières (fraction > 0.2) sont retenues dans le tamis et les particules plus fines sont recueillies dans le bûcher.

* Estimation du volume d'eau nécessaire à la désagrégation de la motte. Elle se fait par lecture directe de la burette. Dès que la motte se désagrège et que rien ne subsiste sur la nacelle, on note le volume d'eau qui a été utilisé en cm^3 ou en mL.

* Estimation de la teneur en macroagrégats stables. La fraction $F > 0.2\text{ mm}$ (macroagrégats et sables grossiers) est recueillie dans le tamis déposé sous l'entonnoir. Son poids est déterminé après séchage à l'étuve. Le poids de macroagrégats stables est connu en déduisant celui des sables grossiers mesurés par ailleurs à partir d'échantillons représentatifs du sol étudié. La teneur en macroagrégats stables est rapportée au poids de la motte initiale séchée à $105\text{ }^{\circ}\text{C}$.

* Teneur en mésoagrégats. La fraction $< 0.2\text{ mm}$, recueillie dans le bûcher à l'issue de la destruction de la motte, est transférée dans un bocal et subit 30 retournements manuels. La suspension retournée est mise en repos pendant une durée suffisante pour que toutes les

particules > 0.02 mm, nommées mésoagrégats (ME), sédimentent (loi de Stokes). Ces mésoagrégats sont récupérés avec précaution en versant le surnageant, puis séchés à l'étuve à 105°C , pesés et rapportés au poids de la motte initiale séchée à 105°C .

43.2.3 Simulation de pluies sur une population de mottes et d'agrégats

Principe

Le sol à tester est étalé dans un plateau de 0.1 m^2 et soumis à deux pluies simulées, produites par un gicleur monté sur une tour. La collecte des eaux de ruissellement permet de mesurer : (i) la hauteur de la pluie d'imbibition (P_i en mm), nécessaire pour déclencher le ruissellement ; (ii) le coefficient de ruissellement (KR en %), rapport de la hauteur totale d'eau ruisselée sur la hauteur totale de pluie ; (iii) l'intensité d'infiltration minimale (F_n en mm h^{-1}), différence entre l'intensité de pluie et l'intensité du ruissellement en régime permanent ; (iv) le poids des suspensions (S , en g), de la terre de fond (TF en g) et enfin l'érosion totale (E en g ; $E = S + TF$)

Equipement

L'appareil utilisé est un mini-simulateur de pluie de type ORSTOM (Asseline et Valentin, 1978), constitué d'un gicleur monté sur une tour métallique haute de 4 m ; le gicleur, alimenté par une pompe, est animé d'un mouvement de balancier, et son débit est programmable. La pluie produite par ce gicleur arrose un plateau de section carrée $0,1\text{ m}^2$ et profond de 10 cm, contenant l'échantillon à tester. Ce plateau est équipé d'un exutoire (fentes et canal) permettant la collecte des eaux de ruissellement et des sédiments grossiers et en suspension.

Procédure

* Préparation des échantillons. Les échantillons proviennent de sol non remanié séché à l'air et tamisé à sec à 10 mm avec un tamis à mailles carrées. Le sol à tester est étalé dans le plateau sur une épaisseur de 3 cm au dessus d'une couche de sable fin lavé.

* Mesure du ruissellement et de l'érosion. Le simulateur de pluie est programmé pour délivrer une pluie d'intensité 60 mm h^{-1} pendant une durée de 60 mn. A l'exutoire du plateau contenant l'échantillon de sol testé, des prélèvements chronométrés réguliers permettent de suivre l'intensité du ruissellement ; l'eau de ruissellement s'écoule dans un seau, et son volume est mesuré en fin de pluie. La mesure de la perte en terre est réalisée à la fin de la pluie, en distinguant les sédiments grossiers (nommés terre de fond), retenus dans le canal

d'exutoire, des sédiments en suspension, récupérés dans le seau ; les deux types de sédiments sont prélevés, séchés à l'étuve et pesés.

43. 3 Résultats

43.3.1 Stabilité des agrégats

* Les taux de macroagrégats stables (MA), de mésoagrégats (ME) et de microagrégats (MI) mesurés montrent une nette différence de comportement entre les différents sols du bassin versant et entre les occupations d'un même sol (jachère ou culture).

Les mesures sur échantillons de 1997 (tableau 4.4) montrent que le sol brun présente plus de macroagrégats stables que le sol rouge (657 g.kg^{-1} contre 485 g.kg^{-1}) mais aussi plus de microagrégats, surtout sous culture . Par contre le sol rouge contient plus de mésoagrégats que le sol brun et cela quelle que soit l'occupation du sol (jachère ou culture) (tableau 4.4).

Les mesures faites sur les échantillons de 1998 ont également mis en évidence la supériorité du sol brun en ce qui concerne le taux de MA (figure 4.1) : il est en tête du classement des 6 principaux sols du bassin versant. Dans ce cas, il est suivi par le sol caillouteux des versants des collines birrimiennes. Le sol rouge présente par rapport à ces derniers un taux de MA inférieur mais supérieur à ceux mesurés sur sols gravillonnaire, jaune et beige.

* Les taux de MA diminuent sous l'effet de la mise en culture sur les deux types de sol que nous avons étudié dans ces conditions (figure 4.2). La chute du taux de MA après 5 ans de culture est nette : 32% de diminution sur sol brun et 64% sur sol rouge. On remarque que la dégradation est plus prononcée sur le sol rouge.

* L'étude de corrélation simple montre que le taux de macroagrégat stable dans un sol est expliqué, pour une bonne part, par le taux de carbone dans ce sol ($r = 0,877$).

L'équation de corrélation s'écrit :

$$Y = 261,2 X + 11,82 \quad \text{Equation 4.1}$$

Y = taux de macroagrégats stables en g kg^{-1} de sol

X = taux de carbone en g. kg^{-1} de sol

Tableau 4.4 : Comparaison de l'agrégation du sol brun vertique et du sol ferrugineux rouge du bassin versant de Djitiko

MA : macroagrégat (taille > 0,2 mm)

ME : mésoagrégat (0,2 à 0,02 mm)

MI : microagrégat (taille < 0,02 mm)

Sols et occupations	Taux de MA g.kg ⁻¹	Taux de ME g.kg ⁻¹	Taux de MI g.kg ⁻¹
Jachère/sol brun	657	192	106
Culture/sol brun	449	349	196
Jachère/sol ferrugineux rouge	485	341	72
Culture/sol ferrugineux rouge	178	678	94

43.3.2 Stabilité des mottes

* Le volume d'eau nécessaire pour détruire une motte est un indicateur de sa stabilité. Nous avons mesuré des volumes qui montrent des différences, d'une part entre les deux types de sols testés (sol brun vertique et sol ferrugineux rouge) et d'autre part entre les occupations des sols (jachère ou culture).

Le volume d'eau nécessaire pour détruire la motte est nettement supérieur dans le cas du sol brun, où il a été mesuré sous jachère et en moyenne 136 mL/motte contre 96 mL/motte pour le sol rouge, soit une différence de 30%. Sous culture, les mottes du sol brun sont également plus résistantes, mais la différence avec le sol rouge est nettement plus faible (11%). Dans les deux cas, la résistance des mottes de sol sous jachère est supérieure à celle du sol cultivé (figure 4.3), le rapport étant de 3,4 pour le sol brun et de 2,7 pour le sol rouge. Les tests conduits en 1997 ont vite montré que plus les mottes sont riches en racelles, plus elles résistent à l'action de l'eau. Cela a été confirmé par les tests de 1998 (tableau 4.5) où la détermination du poids des racines a été introduite dans le protocole.

* L'étude de corrélation multiple montre que le volume d'eau nécessaire pour désagréger la motte est beaucoup expliqué par le taux de macroagrégats stables et le poids racinaire. Le coefficient de corrélation multiple, $R^2 = 0,99$

L'équation s'écrit :

$$V = 0,27 \text{ MA} + 50,5 \text{ PR} - 244,2 \quad R^2 = 0,994$$

V = volume d'eau en mL,

MA = taux de macroagréats en g.kg^{-1} de sol,

PR = poids des racelles en g.kg^{-1} de sol

Tableau 4.5 : Mise en évidence de l'influence des racelles
sur la stabilité de la motte

Sols et occupations	Poids racinaire g kg^{-1} de sol	Volume d'eau nécessaire pour la destruction de la motte mL
Jachère/sol brun vertique	7	259
Culture/sol brun vertique	3	65
Parcelle nue/sol brun vertique	3	17
Jachère/sol ferrugineux rouge	3	48
Culture/sol ferrugineux rouge	2	19
Parcelle nue/sol ferrugineux rouge	4	7

43.3.3 Comportement des sols sous pluie simulée

Hydrodynamique des sols

La mesure des différents paramètres hydrodynamiques montre que :

- la pluie d'imbibition (P_i) est plus importante pour un sol sous jachère que pour le sol correspondant sous culture, mais les différences entre sol rouge et sol brun sont souvent peu marquées pour un même couvert (tableau 4.5)
- le coefficient de ruissellement (K_R) est peu variable lors de pluies sur sol humide (environ 60%) ; en revanche, lors de pluies sur sol sec, il est plus important sur sol brun que sur le sol rouge correspondant, et plus important sous culture que sous jachère;
- l'intensité d'infiltration minimale (F_n) est peu variable lors de pluies sur sol humide (environ 20 mm/h) ; en revanche, lors de pluies sur sol sec, elle est plus élevée sous jachère que sous culture, sans différence nette entre types de sols (tableau 4.6). Lors de pluies sur sol sec, le ruissellement est donc plus rapide et plus important sous culture que sous la jachère correspondante, mais les différences entre sol rouge et sol brun sont moins nettes ; les différences entre traitements sont également peu marquées lors de pluies sur sol humide.

Tableau 4.6 : Caractéristiques hydrodynamiques des sols brun vertique et ferrugineux rouge du bassin versant de Djitiko

Pi : pluie d'imbibition (mm)

KR : coefficient de ruissellement (%)

Fn : intensité minimale d'infiltration (mm)

Occupations du sol	Pluies sur sol sec			Pluies sur sol humide		
	Pi	KR	Fn	Pi	KR	Fn
Jachère/sol brun vertique	11	37	28	2	65	20
Jachère/solferrugineux rouge	17,4	17	32	1,4	62	20
Culture/sol brun vertique	8	61	21	1	68	18
Culture/sol ferrugineux rouge	7,5	55	20	0,7	59	24

Erosion des sols

Le test de simulation de pluie sur population d'agrégats montre des différences de comportement érodible relativement nettes, contrairement à ce qui a été constaté avec le comportement hydrodynamique (tableau 4.7). Le sol brun, qu'il s'agisse de jachère ou de culture, est trouvé plus érodible que le sol rouge. La différence des érosions mesurées est surtout à la faveur des quantités de matière en suspension (MES). Ces dernières représentent une proportion plus importante des érosions mesurées sur sol brun (tab. 4.7).

Tableau 4.7 : Erosion mesurée au laboratoire sous pluie simulée

MES : matières en suspension

TF : terres de fond

ET : érosion totale

Occupations du sol	Pluies sur sol sec					Pluies sur sol humide				
	T F		M E S		ET	T F		M E S		ET
	t ha ⁻¹	% ET	t ha ⁻¹	% ET	t ha ⁻¹	t ha ⁻¹	% ET	t ha ⁻¹	% ET	t ha ⁻¹
Jachère/sol brun vertique	1	33	2	67	3	1	33	2	67	3
Jachère/solferrugineux rouge	1	71	0,4	29	1,4	1	50	1	50	2
Culture/sol brun vertique	2	33	4	67	6	1	25	3	75	4
Culture/sol ferrugineux rouge	1	25	3	75	4	0	0	2	100	2

43.3.4 Comparaison du comportement des sols en milieu réel et en laboratoire

Coefficients de ruissellement

La comparaison porte ici sur les coefficients de ruissellement annuels moyens (KRAM) mesurés sur 4 parcelles expérimentales de 100 m² et les coefficients de ruissellement moyens mesurés en laboratoire, sur échantillons correspondants et sous deux pluies simulées (une sur

sol sec et une sur sol humide). Les données sont relatives aux sols brun et ferrugineux rouge avec deux occupations (jachère et culture). Nous utiliserons les termes de ruissellement en milieu réel (R_{mr}) et de ruissellement en laboratoire (R_L). Les sols se classent de façon différentes selon le type de ruissellement :

* En fonction de R_{mr}

culture/sol rouge > culture/sol brun > jachère/sol brun = jachère/sol rouge.

* En fonction de R_L

culture/sol brun > jachère/sol brun > culture/sol rouge > jachère/sol rouge

On remarque (figure 4.3) que les valeurs de R_{mr} et R_L sont assez différentes quel que soit le sol et l'occupation. Le rapport entre ces valeurs est toujours supérieur à 2 dans le cas du sol brun et inférieur à cette valeur dans le cas du sol rouge (tableau 4.8). Une deuxième remarque est que R_{mr} et R_L donnent le même classement de la jachère et de la culture sur les deux sols.

Erosion, stabilité des agrégats et des mottes

Les données utilisées sont, comme précédemment, celle relatives à 4 parcelles expérimentales (données de terrain) et aux échantillons de sols correspondants (données de laboratoire). Il s'agit de :

- valeurs moyennes de l'érosion mesurée sur parcelles pendant les campagnes 1998 et 1999 (érosion en milieu réel, notée E_{mr}) et qui ont été discutées au chapitre 3.

- valeurs moyennes de l'érosion mesurée sur sol sec et sol humide en laboratoire (érosion en laboratoire, notée E_L).

- taux de macroagrégats stables dans les échantillons tamisés à 2 mm;

- volumes d'eau nécessaires pour la désagrégation des mottes de 4 g.

Par rapport à ces différents critères les sols sont classés (tableau 4.9). Leur classement d'après la stabilité des agrégats et des mottes est conforme à leur classement d'après les mesures d'érosion sur le terrain pendant deux campagnes. Par contre, les classements d'après E_{mr} et E_L sont différents : la jachère sur sol brun est la parcelle la moins sensible à l'érosion d'après les mesures de terrain, alors que la jachère sur sol rouge est la moins sensible d'après les mesures de laboratoire.

Tableau 4.8 : Comparaison entre ruissellement mesuré en milieu réel (R_{mr}) et ruissellement mesuré en laboratoire (R_L)

Rapport R_{mr} R_L	Jachère/ sol brun	Culture/ sol brun	Jachère/ sol rouge	Culture/ sol rouge
	2,5	2,4	1,8	1,3

Tableau 4.9 : Classement des sols et de leurs occupations en fonction de l'érosion et de la stabilité des matériaux.

Sols et occupations	N°	Classement d'après E_{mr}	Classement d'après E_L	Classement d'après stabilité des agrégats	Classement d'après stabilité des mottes
Jachère/sol brun Culture /sol brun	a b	$b' > b > a' > a$	$b > a = b' > a'$	$a > a' > b > b'$	$a > a' > b > b'$
Jachère/sol rouge Culture /sol rouge	a' b'				

43.4 Discussions

* Les meilleurs taux de macroagrégats observés dans les sols brun vertique et caillouteux s'expliquent en partie par les teneurs élevées de ces sols en carbone (respectivement 33 et 26,3 mg.g⁻¹ de sol). En effet, il existe une nette corrélation entre les taux de macroagrégats stables et de carbone (Equation 4.1). Cependant la teneur en carbone n'explique pas à elle seule la richesse en MA ($r = 0,78$). Il faut rappeler que plusieurs caractéristiques des sols influencent le comportement structural (Wischmeier et Mannering , 1969): la texture, la teneur en matière organique (MO), la minéralogie des argiles, les cations, les oxydes de Fe et Al, le CaCO₃.

* La chute des taux de MA accompagnant la mise en culture a déjà été signalée par Barthès et al (2000) pour des sols du Bénin, du Cameroun et du Mexique. Nous pensons que cette chute des taux de MA est normale et serait une conséquence de la dégradation de l'ensemble des propriétés physiques et chimiques des sols, entraînant une prépondérance des taux de mésoagrégats (ME) que nous avons constaté avec les parcelles cultivées. En effet, il est déjà établi que la mise en culture des sols tropicaux favorise une dégradation plus ou moins rapide de leurs propriétés, en particulier le statut organique et l'état structural : Feller (1977) a noté, au Sénégal oriental, une diminution significative du stock organique (20 %) et de la stabilité structurale, après respectivement trois et deux ans de culture . Plus récemment, Tonda et al (1995) ont noté en zone soudanienne du Burkina Faso, une perte de 33 % du taux originel de

matière organique en année de défriche. Ces auteurs signalent que quatre à cinq ans de culture suffisent pour réduire de moitié le taux originel de matière organique rendant l'horizon superficiel similaire à celui de profondeur.

* La résistance de la motte à la désagrégation ou l'importance du volume d'eau requis pour sa destruction est principalement liée à sa richesse en macroagrégats stables et en radicelles : coefficient de corrélation multiple, $R^2 = 0,99$ (Equation 4.2, donnée au point 43.33). Cela explique:

- le meilleur comportement des mottes de sol brun par rapport à celles des autres sols du bassin versant, notamment les sols ferrugineux tropicaux;
- pour un sol donné, la diminution de la résistance des mottes avec la mise en culture.

Le ruissellement des sols sous pluie simulée en laboratoire semble être très marqué par deux facteurs qui concourent à un relèvement net des coefficients par rapport à ceux mesurés sur parcelles de 100 m²:

- le remaniement favorisant forcément une péjoration de la cohésion;
- la dimension réduite de la boîte servant de parcelle de mesure (1/10 m²).

Quant à l'érosion mesurée dans ces conditions de laboratoire, sa nette faiblesse par rapport aux données de terrain peut être liée aux imperfections de notre démarche expérimentale, notamment la non récupération des pertes de terre par jaillissement (érosion splash). Cela peut même expliquer la faible érosion mesurée sur sol rouge par rapport au sol brun, contraire aux données de terrain. En effet, le sol rouge est nettement plus riche en mésoagrégats dont la perte par jaillissement est plus forte que celle des macroagrégats.

4.4. Conclusion

Les tests de stabilité des agrégats et des mottes se sont montrés pertinents pour les sols du bassin versant de Djitiko. Par contre la simulation de pluie en laboratoire a donné des résultats, en contradiction avec les deux premiers tests et les résultats de mesure de terrain. Les imperfections de notre démarche expérimentale semblent avoir beaucoup biaisé les résultats dans ce dernier test.

Les tests de stabilité des agrégats et des mottes que nous avons utilisé ici sont classiques, le deuxième étant très ancien. Cependant, en ce qui concerne le deuxième test, c'est à dire celui relatif à la motte, nous avons introduit la quantification du facteur "radicelle", un facteur dont

l'influence sur la stabilité de la motte est très importante. Le protocole de cette quantification des racelles peut être développé d'avantage.

CHAPITRE V

SPATIALISATION DU COMPORTEMENT HYDRODYNAMIQUE ET DE LA SUCCEPTIBILITE DES SOLS A L'EROSION

5.1 Introduction

L'étude et la modélisation des processus commandant le détachement, le transport et le dépôt des sédiments sont utilisées par la recherche géomorphologique en vue de prévoir l'évolution des formes du relief (Desmet et Govers, 1995). Dans la mesure où ces processus hydrologiques et d'érosion peuvent être responsables de dégâts importants pour les sociétés humaines (perte de productivité des terres et dégradation de la qualité des eaux, par exemple), leur étude doit viser aussi la mise au point d'outils d'aide aux décisions raisonnables pour l'aménagement des bassins versants. Dans cette perspective, la production d'informations spatialisées est nécessaire à l'échelle du terroir villageois, du bassin versant ou de la région agricole. Il s'agit d'une approche, qui a longtemps été négligée au profit de l'analyse fine des processus de ruissellement et d'érosion (De Noni et Viennot, 1996). 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 (Gaillard et al, 1998 ; Guillobez et al, 1998; Blanchard et al, 1999).

Dans notre étude sur le bassin versant de Djitiko, nos préoccupations d'analyse spatio temporelle de l'érosion des sols ont été les suivantes :

- la connaissance des productions actuelle et potentielle de sédiments ;
- la contribution relative des différentes zones du bassin versant à ces productions de sédiment;
- l'établissement du rapport entre sédiments produits et sédiments transférés à l'exutoire.

Dans l'ensemble il s'agit d'étudier un problème de changement d'échelle

5.2 Généralités sur la modélisation et la spatialisation de l'érosion des sols

52. 1 Les modèles d'érosion des sols et les hypothèses simplificatrices de la spatialisation.

De façon générale, les modèles d'érosion des sols (ex: USLE¹ , MUSLE² et WEPP³), ont été établies de façon empirique à partir de nombreuses mesures expérimentales mais ponctuelles (Bolinne, 1982, Roose, 1994; Bonn, 1998). Leur validité varient beaucoup varient beaucoup avec les conditions géographiques locales mais ils utilisent à peu près les mêmes paramètres physiques : pentes, énergie cinétique des pluies et ou du ruissellement, érodibilité des sols,

¹ Universal Soil Loss Equation

² Modified Universal Soil Loss Equation

³ Water Erosion Prediction Project

couvert végétal, pratiques antiérosives. Ces modèles servent le plus souvent à l'établissement de cartes où les pertes de sols sont exprimées en $t\ ha^{-1}\ an^{-1}$ ou en $mm\ an^{-1}$.

Cependant, ces modèles unidimensionnels fondés sur des mesures sur parcelles (de un à quelques dizaines de mètres carrés) ne peuvent être spatialisés à l'échelle d'une plus grande région qu'en faisant des hypothèses simplificatrices. Bolinne (1982) rappelle que l'USLE n'est pas destinée à prévoir l'érosion d'une portion de territoire (versant, bassin) où interviennent des phénomènes de dépôt, mais celle d'une parcelle, dans des conditions définies de culture. En ce qui concerne les hypothèses simplificatrices, Bonn (1998) en distingue quatre, relatives à la continuité du paysage, la distribution spatiale des pluies intenses, la précision des cartes pédologiques et l'effet des interventions humaines (pratiques agricoles de conservation des sols, rotation des cultures et mise en jachère).

52.2 Validation des modèles d'érosion des sols

La validation est une phase importante de la modélisation, en particulier dans celle du fonctionnement des écosystèmes (Coquillard et R.C. Hill 1997).

La validation des modèles d'érosion est faite à partir de mesures directes, envisageables à différentes échelles (parcelles, bassin versant). Elle est souvent difficile à cause du temps nécessairement long pour apprécier l'évolution des facteurs pertinents de contrôle : végétation, climat (Desmet et Govers, 1995). Ces auteurs estiment que les paysages agricoles des terrains montagneux offrent souvent l'opportunité de pouvoir faire des validations à un pas de temps court et cela pour deux raisons : la première est que la vitesse de l'érosion y est plusieurs fois plus élevée que sous végétation climaxique. La deuxième raison est que les processus d'érosion et de dépôt au cours des derniers siècles peuvent être déduits à partir du niveau de troncature des sols et la présence et l'épaisseur des dépôts colluviaux.

52.3 Cartographie des risques d'érosion

La cartographie des risques d'érosion utilise de plus en plus les moyens offerts par le développement de l'informatique. La démarche comporte, en général, 3 étapes :

- * l'acquisition de données et la création de couches d'informations spatialisées : elle porte sur les facteurs de l'érosion : l'érosivité des pluies, le couvert végétal, l'érodibilité des sols et la pente.
- * la combinaison des facteurs
- * la production de carte

Dans la cartographie de l'érosion, le développement actuel de l'informatique pose souvent des problèmes de qualité des informations produites. Le risque majeur dans ce domaine est l'exploitation abusive des moyens d'extrapolation de l'information.

5.3 Démarche de spatialisation utilisée dans le bassin versant de Djitiko

53.1 Définition des aires homogènes de production de sédiment

Le bassin versant a été découpé en "aires homogènes" en vue de pouvoir extrapoler les pertes en terre mesurées sur parcelles expérimentales (100 à 1000 m²). Le critère de découpage choisi est la notion de "susceptibilité des sols à l'érosion hydrique" qui dépend des matériaux pédologiques et de leur occupation, toute condition étant égale par ailleurs. Ainsi, la carte morphopédologique (1/50 000) donnée au chapitre 2, a servi de couche d'informations spatialisées de base. Il faut rappeler que le découpage morphopédologique s'appuie sur des considérations pédologiques et topographiques. Il a été complété par des informations relatives à l'occupation du sol, en particulier les pourcentages de surfaces cultivées et de jachères. Pour cela, nous avons utilisé une carte des états de surface (Diallo, 1995) complétée par des observations régulières au cours des campagnes d'expérimentations (1997 à 1999).

Ainsi, le bassin versant a été subdivisé en 4 principales zones de production de sédiments :

- zone à sols gravillonnaires (zone I)
- zone à sols ferrugineux tropicaux (zone II)
- zone à sol caillouteux (zone III)
- zone à matériaux d'apport colluvio-alluvial (zone IV).

Le tableau 5.1 et la carte de la figure 5.1 donnent respectivement les proportions et la localisation spatiale des 4 zones dans le bassin versant. Ce sont des surfaces hydrologiques dont les caractéristiques pédologiques et de dynamique saisonnière d'état de surface ont été discutées au chapitre 2, de même que leur utilisation agricole actuelle. Il est important de retenir :

* les jachères occupent 92 % de la superficie totale du bassin versant mais leur proportion diffère d'une zone à l'autre comme le montre le tableau 5.1. Cette forte proportion de jachère indique a priori, une faible pression agricole et une érosion faible. En effet, nos mesures sur parcelles ont montré des érosions faibles sous jachère quelque soit la zone du bassin versant (chapitre 3).

* les deux plus grandes zones (zone I et II), totalisant 79 % du bassin versant sont formées de matériaux normalement riches en argiles de la famille de la kaolinite (vieux matériaux ferrallitiques des sols gravillonnaires, zone I et matériaux ferrugineux de la zone II).

Tableau 5.1 : Les zones homogènes de production de sédiments dans le bassin versant de Djitiko

Zone	Types de sol observés	S.totale (ha)	S. jachère (ha)	S. culture (ha)	% jachère
I	UTS3 : sol gravillonnaire	4100	4080	20	99,5
II	UTS 4,5 et 6 : sols ferrugineux (rouge, jaune et beige)	4000	3930	70	98,3
III	UTS1 :sol caillouteux	960	730	230	76,0
IV	UTS 2 (sol brun vertique) et UTS7 (sol hydromorphe)	1270	760	510	59,8
Bassin versant		10330	9500	830	92,0

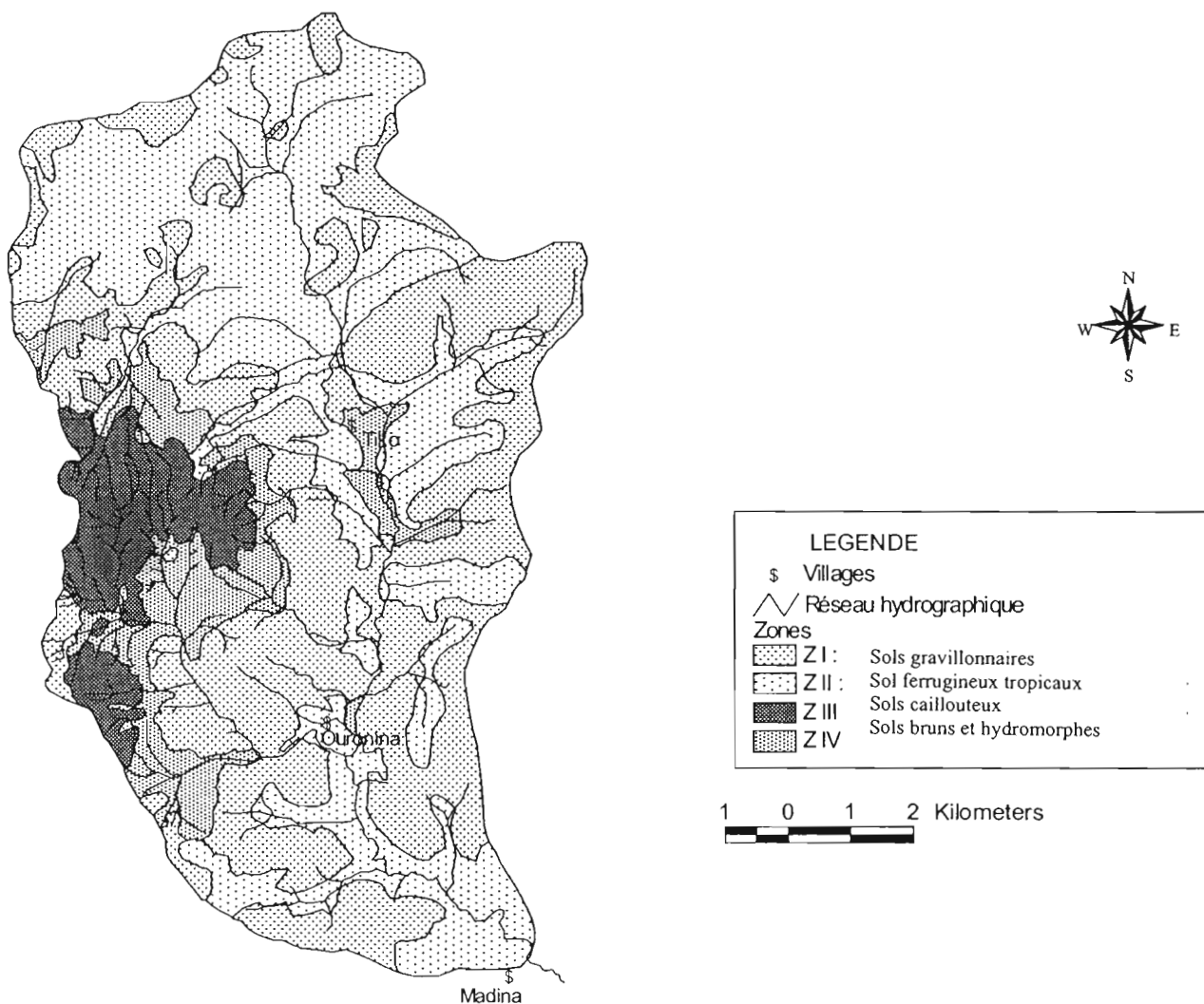


Figure 5.1 : Carte de zones homogènes de production de sédiment

53.2 Utilisation de données expérimentales sur l'érosion

Les mesures d'érosion utilisées sont celles qui ont été obtenues sur des parcelles de 100 m² et 1000 m², réparties entre jachères et cultures pendant les campagnes 1998 et 1999 (tableaux 5.2 et 5.3). Elles ont déjà été discutées au chapitre 3. Les sols gravillonnaires et caillouteux n'ayant pas été étudiés sous culture, nous avons dû estimer les valeurs d'érosion sous culture sur ces sols en faisant deux hypothèses simplificatrices :

h1 : l'érosion mesurée sur parcelle nue de sol gravillonnaire est peu différente de celle mesurée sous jachère de ce sol (effet des gravillons couvrant plus de 80 % de la surface). En admettant que la mise en culture avec labour aura un effet érosif plus ou moins similaire à la dénudation sur ces sols, nous avons retenu les mêmes valeurs d'érosion (celles mesurées sur parcelle nue).

h 2 : le sol caillouteux présente un matériau pédologique (composante fine) à stabilité très proche de celle du sol brun (chapitre 4). Cependant le premier étant couvert de cailloux à plus de 50%, résistera mieux que le second. A partir de ces considérations, nous avons retenu pour le labour sur sol caillouteux, la valeur de l'érosion mesurée avec la pratique du labour sur le sol brun, en la multipliant par un coefficient correcteur de 0,3. Ainsi : $E_{\text{sol caillouteux}} = E_{\text{sol brun}} \times 0,3$. Le facteur de correction permet de prendre en compte l'effet mulch des cailloux (Roose, 1994).

Tableau 5.2 : Erosions mesurées sous jachère en 1998 et 1999 (données utilisées pour la simulation)

Jachère de 100 m ²	Erosion (t ha ⁻¹ an ⁻¹)			
		1998	1999	Moy.
Jachère sur sol gravillonnaire	Totale	2,6	5,3	3,9
	MES	0,7	2,9	1,8
Jachère sur sol ferrugineux rouge	Totale	4,0	5,6	4,8
	MES	0,8	1,6	1,2
Jachère sur sol caillouteux	Totale	1,2	0,3	0,7
	MES	0,4	0,3	0,4
Jachère sur sol brun vertique	Totale	2,4	1,0	1,7
	MES	0,8	0,2	0,5

Tableau 5.3 : Erosions mesurées sous culture en 1998 et 1999 (données utilisées pour la simulation)

Parcelles cultivées	Erosion (t ha ⁻¹ an ⁻¹)			
		1998	1999	Moy.
Labour sur sol ferrugineux rouge (100 m ²)	Totale	15,8	21,0	18,4
	MES	2,0	4,2	3,1
Labour sur sol ferrugineux rouge (1000 m ²)	Totale	3,2	5,6	4,4
	MES	1,0	0,7	0,9
Labour sur sol gravillonnaire (100 m ²)*	Totale	4,4	8,1	6,3
	MES	0,7	3,2	2,0
Travail minimum sur sol ferrugineux rouge (100 m ²)	Totale	2,7	12	7,4
	MES	2,1	5,16	3,6
Travail minimum sur sol ferrugineux rouge (1000 m ²)	Totale	1,2	2,3	1,8
	MES	0,3	0,4	0,4
Labour sur sol brun vertique (100 m ²)	Totale	10,0	18,2	14,1
	MES	0,4	1,6	1,0
Labour sur sol brun vertique (1000 m ²)	Totale	1,4	9,5	5,5
	MES	0,2	0,6	0,4
Labour sur sol caillouteux (100 m ²)	Totale	3,0	2,9	3,0
	MES	0,1	0,3	0,2
Travail minimum sur sol brun vertique (100 m ²)	Totale	2,3	9,3	5,8
	MES	0,3	3,2	1,8
Travail minimum sur sol brun vertique(1000 m ²)	Totale	1,2	3,7	2,5
	MES	0,3	0,1	0,2

NB : Les érosions mesurées avec le labour sur sols gravillonnaires et caillouteux sont respectivement estimées d'après simplificatrices h1 et h2 précédemment expliquées

53.3 Simulations d'érosion

La production de sédiments sur l'ensemble du bassin versant de 103 km² est simulée à partir d'un modèle simple s'appuyant sur les cinq hypothèses ou scénarios (H1, H2, H3, H4 et H5) suivantes :

H1 : hypothèse d'homogénéité (au point de vue susceptibilité à l'érosion) des zones de production de sédiments définies;

H2 : les valeurs d'érosion mesurées sur parcelles et données aux tableau 5.2 et 5.3 sont représentatives des zones relatives;

H3 : le labour est le mode de préparation dominant actuel du sol dans le bassin versant.

H4 : dans les années à venir, l'intensification de l'agriculture sera importante et les paysans (dont le nombre augmentera avec un taux de 1,7 %/an) cultiveront essentiellement les sols bruns vertiques et ferrugineux qui s'y prêtent. Les sols gravillonnaires et caillouteux resteront sous jachère ou seront utilisés en partie pour l'arboriculture (production fruitière ou de bois d'œuvre). La pratique du labour restera générale sans qu'on ne l'associe de pratique antiérosive.

H5 : l'affectation des terres est identique à celle de l'hypothèse H4, mais le labour est accompagnée de mesures antiérosives (ex: bandes enherbées, agroforesterie) ou remplacé par la pratique du travail minimum du sol.

Les hypothèses H1, H2 et H3 sont suffisantes pour l'estimation de l'érosion actuelle dans le bassin versant. Cependant, l'estimation de l'érosion potentielle demande la prise en compte des hypothèses H4 et H5 selon le cas.

Pour une zone Z_n , la production de sédiment (P_s) est fonction du type de sol (S_n : gravillonnaire, rouge, caillouteux ou brun) et de son occupation ou mode d'utilisation (μ_i = jachère, labour conventionnel ou autre) multiplié par la superficie respective de la catégorie concernée.

Le modèle peut s'écrire :

$$P_s(Z_n) = \sum_i [E_{S_n}(\mu_i) \times S_{S_n}(\mu_i)] \quad \text{Equation 5.1}$$

$P_s(Z_n)$: production de sédiments de la zone n,

$E_{S_n}(\mu_i)$: érosion mesurée sur parcelle de sol représentative de la zone n avec le mode d'utilisation i,

$S_{S_n}(\mu_i)$: surface de la zone n avec le mode d'utilisation i.

Pour les campagnes 1998 et 1999, nous avons calculé pour l'ensemble du bassin versant, d'après l'équation 5.1:

- QTS_p : quantité totale de sédiments produits ;
- MES_p : matières en suspension produites.
- EP_{S1} : érosion potentielle au stade 1, c'est à dire quand l'utilisation des sols sera conforme à l'hypothèse H4;
- EP_{S2} : érosion potentielle au stade 2, c'est à dire quand l'utilisation des sols sera conforme à l'hypothèse H5.

53.4 Estimation de l'érosion à l'exutoire du bassin versant : les sorties de matières en suspension

Pour estimer les sorties de matières en suspension du bassin versant, nous avons utilisé les connaissances hydrologiques acquises de 1960 à 1995 (Molinier, 1969; Droux, 1999), en particulier les données relatives à l'écoulement et au transport de matières en suspension (MES). Il s'agit de données acquises à l'exutoire du bassin versant (pont de Madina sur la route Bamako-Kangaba). Les coefficients d'écoulement (Ke) établis à l'issue de 5 campagnes de mesure (au cours de la période 1960 à 1995) et donnés au tableau 5.4 montrent une moyenne (valeur interannuelle) de 8,5 %. Cette valeur est utilisée ici pour calculer les lames ruissellées (LR) au cours des campagnes 1998 et 1999 pour l'ensemble du bassin. Ces valeurs de LR doivent nous permettre de faire une estimation des quantités de terre érodée exportée du bassin versant au cours des deux campagnes considérées. En effet, (Droux, 1999) a trouvé une forte corrélation entre la lame ruissellée et la quantité de MES :

$$Y = 31,109 x \quad \text{Equation 5.2}$$

Y = quantité de MES en tonne

X = valeur de la lame ruissellée exprimée en millimètre.

Tableau 5.4 : Coefficient de ruissellement du bassin versant de Djitiko
D'après Molinier (1969) et Droux (1999)

Année	1960	1968	1994	1995	Moyenne	Ecartype
Coefficient d'écoulement (Ke)	9,1	8,8	6,7	9,4	8,5	1,1

D'après l'équation 5.2, nous avons calculé pour les campagnes 1998 et 1999, la quantité totale de sédiments transférés (QTS_T). Elle correspond à la quantité de matières en suspension qui parvient à l'exutoire du bassin versant.

5.4 Résultats

5.4.1 Erosion produite sur les versants (QTS_p) et érosion mesurée à l'exutoire du bassin versant (QTS_T)

Au chapitre 3, nous avons montré en détail les érosions mesurées sur parcelles de 100 et 1000 m². Il faut rappeler qu'elles varient nettement en fonction de l'occupation du sol (jachère, culture) et des techniques culturales (labour, travail minimum du sol) et d'une année à l'autre en fonction des caractéristiques pluviométriques.

Ici, nous présentons les valeurs d'érosion simulée pour l'ensemble du bassin versant (tableau 5.5) et cela deux échelles spatiales différentes: échelle bassin versant de 103 km² et échelle hectare.

* Echelle bassin versant

La supériorité de QTS_p (quantité totale de sédiments produits) par rapport à QTS_T (quantité totale de sédiments transférés) est nette : respectivement 46 401t an⁻¹ et 3 108t an⁻¹ (valeurs moyennes des deux campagnes). Notons aussi que QTS_T est nettement inférieure à MES_p (matières en suspension produites) dont la moyenne des deux campagnes est de 23 715t an⁻¹. Les valeurs de QTS_p , MES_p et QTS_T sont plus élevées en 1999 qu'en 1998, avec des différences plus importantes en ce qui concerne QTS_p et surtout MES_p :

$$QTS_p(1999)/QTS_p(1998) = 1,6$$

$$MES_p(1999)/MES_p(1998) = 3,4$$

Par contre les valeurs annuelles de QTS_T sont moins différentes (le rapport est de 1,4). Par ailleurs, les valeurs calculées pour QTS_T sont peu différentes de celles mesurées par Droux (1999) en 1994 et 1995 et en particulier suivant ses procédures 1 et 2⁴ (tableau 5.6).

* Echelle hectare

En ramenant à l'hectare les valeurs d'érosion calculées (tableau 5.5), le comportement jachère du bassin versant s'affiche :

⁴ Le flux de MES est calculé en effectuant le produit du volume total écoulé par la concentration moyenne pondérée, sur toute l'année hydrologique (procédure 1). Suivant la même démarche, le calcul est fait au pas de temps mensuel, le cumul des flux mensuels donnant la charge annuelle totale (procédure 2).

- la production de sédiment, $4,5 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ (moyenne des campagnes 1998 et 1999) est du même ordre de grandeur que l'érosion mesurée sous la jachère la plus vulnérable du bassin versant : jachère sur sol ferrugineux rouge.
- la quantité de sédiment transféré à l'hectare ($0,3 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$), reste nettement en dessous de la production de matières en suspension ($2,3 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) et est inférieure à toutes les valeurs mesurées sous jachère dans le bassin versant.

Les rapports entre sédiments produits à l'intérieur du bassin versant et sédiments transférés à l'exutoire sont considérables :

$$QTS_T = 1/14 QTS_P$$

$$QTS_T = 1/7 MES_P$$

QTS_P : quantité totale de sédiment produit

MES_P : matières en suspensions produites

QTS_T : quantité totale de sédiment transféré

Tableau 5.5 : Production et transfert de sédiment dans le bassin versant de Djitiko

Désignation	1998		1999		Moy.	
Erosion	BV	ha	BV	ha	BV	ha
QTS_P	36 012	3,5	56 790	5,5	46401	4,5
MES_P	10 700	1,0	36 729	3,6	23715	2,3
QTS_T	2 631	0,2	3 585	0,3	3108	0,3
$R1 = QTS_P / QTS_T$	14	17,5	16	18,4	15	14,9
$R2 = MES_P / QTS_T$	4	0,1	10	0,2	7	0,2
EP_{S1}	75 900	7,3	107 114	10,4	91507	8,9
EP_{S2}	13 278	1,3	59 811	5,8	36545	3,5

Tableau 5.6 : Erosion à l'exutoire du bassin versant de Djitiko

Années	Erosion mesurée (t an ⁻¹)*				Erosion calculée (t an ⁻¹) **
	P1	P2	P3	P4	
1994	2 422	2 032	1 572	1 410	
1995	2 855	2 300	1 707	1 486	
1998					2 631
1999					3 585
Moy.	2 639	2 166	1 640	1 448	3 108
Moy(94- 95)/(98-99)	0,8	0,7	0,5	0,5	

NB : * Mesures faites par Droux (1999)

** Nous avons fait les calculs en utilisant le modèle établi par Droux (1999). Il faut rappeler que ce modèle a été établi suite à des mesures de matière en suspension dans les échantillons prélevés à l'exutoire en 1994 et 1995.

54.2 Origine des sédiments actuellement produits dans le bassin versant

La contribution quantitative des différentes zones du bassin versant à la production de sédiments (QTSp et MES_p) est donnée aux tableaux 5.7 et 5.8 d'après nos calculs de production de sédiments pour les campagnes 1998 et 1999. Les contributions moyennes des différentes zones à la production de sédiments ont été : 44% pour la zone II à sols ferrugineux, 34 % pour la zone I à sol gravillonnaire, 18,5 % pour les formations colluvio-alluviales de la zone IV et seulement 3,5 % pour la zone III. Concernant, MES_p, la contribution de la zone I est plus élevée (environ 30 % en moyenne) que celle de chacune des trois autres zones qui ont pratiquement des contributions peu différentes (22 à environ 25 % en moyenne). On peut retenir que les sédiments du bassin versant proviennent principalement des matériaux kaoliniques (produits de démantèlement des vieilles cuirasses ferrallitiques, matériaux ferrugineux). Les analyses minéralogiques faites par Droux (1999), sur matières en suspension prélevées à l'exutoire, semblent confirmer cette origine (tableau 5.9).

Tableau 5.7 : Contribution des différentes zones du bassin versant à la production totale de sédiment

Année	QTSp	Zone I	Zone II	Zone III	Zone IV
	(Tonne)	(%)	(%)	(%)	(%)
1998	36 012	30	47	4	19
1999	56 790	38	41	3	18
Moyenne	46 401	34	44	3,5	18,5

Tableau 5.8 : Contribution des différentes zones du bassin versant à la production de matières en suspension

Année	QSP (Tonne)	Zone I (%)	Zone II (%)	Zone III (%)	Zone IV (%)
1998	10 700	27	31	15	27
1999	36 729	32	18	32	18
Moyenne	23 715	29,5	24,5	23,5	22,5

Tableau 5.9 : Compositions minéralogiques moyennes annuelles des MES à Djitiko
D'après Droux (1999)

Année de prélèvement des échantillons	Quartz (%)	Kaolinite (%)	Illite (%)	Interstratifiés (%)
1994	25	67,5	7	0,5
1995	25	62	10	3
Moyenne	25	64	9	2

54.3 Production potentiel de sédiment dans le bassin versant

Les valeurs de l'érosion potentielle au stade1 (EP_{S1}) et de l'érosion potentielle au stade2 (EP_{S2}) sont données au tableau 5.5. Au stade1 (totalité des zones II et IV affectée aux cultures annuelles, zones I et III sous couvert végétal permanent, pratique générale du labour sans mesure antiérosive), l'érosion (EP_{S1}) est une multiplication de l'érosion actuelle par deux : $EP_{S1} = 2 \text{ QTS}_p$. A l'échelle hectare, cette érosion est de $8,9 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. Ces sédiments sont produits à 80 % par la zone II à couverture pédologique ferrugineuse et à 20 % par la zone IV à matériaux colluvio-alluviaux. Au stade2 (même affectation des terres qu'au stade1, généralisation de pratiques antiérosives comme les bandes enherbées ou de la pratique du travail minimum du sol), l'érosion (EP_{S2}) diminue de façon considérable par rapport à l'érosion actuelle et à l'érosion au stade1: $EP_{S2} = 3,5 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ contre $4,5 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ pour l'érosion actuelle et $8,9 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ pour EP_{S1} . Les contributions respectives des zones II et IV à la production de sédiment reste inchangées, c'est à dire 80 % et 20 %.

54.4 Les risques d'érosion dans le bassin versant de Djitiko

A cause de la présence des affleurements cuirassés et de leurs produits de désagrégation (gravillons), 40 % du bassin versant sont faiblement vulnérables. Cependant, cette zone produit beaucoup de ruissellement et augmente le risque d'érosion pour les sols situés au contrebas (Zone II du bassin versant). Le risque d'érosion est fort pour 47 % du bassin versant et les sols concernés représentent 75% de ceux qui, à cause des caractères pédologiques

(notamment, épaisseur du solum et absence d'élément grossier) peuvent être retenus pour une intensification agricole à moyen et long terme.

5.5 Discussions

Transfert du ruissellement et des matériaux érodés.

La quantité totale de sédiments produits dans le bassin versant, c'est à dire l'érosion totale est sans commune mesure avec l'érosion mesurée à l'exutoire. Il semble exister un véritable problème de transfert des matériaux érodés à toutes les échelles spatiales, aussi bien dans les conditions d'écoulement en nappe que d'écoulement linéaire et concentré.

* Conditions d'écoulement en nappe et piégeage des sédiments. Ce type d'écoulement est dominant sur les parcelles d'érosion de 100 à 1000 m² et sur toute surface plane quelque soit ses dimensions. Nos tests de régression ont montré qu'aucune dimension (longueur, largeur, superficie) d'une portion d'espace, ne peut expliquer de façon satisfaisante l'érosion mesurée à la sortie de cet espace. Selon les mêmes tests, l'état de surface du sol explique mieux les érosions mesurées, donc le transfert des matériaux détachés. De façon, spécifique, il nous semble que la rugosité de la surface du terrain joue un rôle capital dans le transfert des matériaux détachés. La surface plus ou moins plane de la parcelle avec son écoulement en nappe est assimilable à un cours d'eau qui a, le long du profil longitudinal, des sections de profondeurs et de capacités d'encaissement différentes. Sur une telle surface, plus la rugosité est élevée, plus il existera de microdépressions encaissantes ou au contraire des micro-buttes qui piégeront les sédiments. En milieu cultivé, les facteurs d'irrégularité de la surface (traces laissées par les instruments aratoires, tas de litière issus du désherbage, traces laissées par la faune du sol) semblent être les éléments importants qui interfèrent pour déterminer la dynamique et la quantité de sédiments transférés. La plus forte irrégularité de la surface de nos parcelles de 1000 m² par rapport à celle de 100 m² serait responsable, plus que la taille de la parcelle, de la plus faible érosion mesurée (par exemple, en 1999, sur sol rouge labouré, 5,6 t ha⁻¹ an⁻¹ sur la grande parcelle contre 21,0 t ha⁻¹ an⁻¹ sur la petite). En milieu non cultivé du bassin versant et sur surface plane, les traces de l'activité faunique (petites cavités, termitières) et la couverture au ras du sol (couvert herbacé, débris végétaux) semblent principalement régler le transfert des matériaux érodés. Concernant la végétation herbacée, signalons qu'elle recouvre le sol à plus de 70 % dès la moitié de la saison pluvieuse. Cette végétation retient non seulement les sédiments grossiers, mais aussi les MES en favorisant le ralentissement des écoulements et la sédimentation.

* Conditions d'écoulement linéaire: accumulation des eaux de ruissellement et piégeage des sédiments

Le réseau d'écoulement linéaire incluant les rigoles, les ravines et le marigot Djitiko présente en de nombreux endroits de petites dépressions (de l'ordre de 5 m de long, 3 m de large et 1 à 3 m de profondeur). Ces dernières constituent des pièges à sédiments avec une incidence particulièrement nette en début de saison où elles peuvent recevoir des volumes importants d'eau chargée de MES.

Nous pensons que les matières en suspension, mesurées à l'exutoire du bassin versant, ne reflètent pas la dynamique actuelle de l'ensemble des versants mais la capacité de transport des eaux de ruissellement et de l'écoulement des ravines et du marigot Djitiko. Il existe un stock de sédiments fins qui est progressivement évacué vers le fleuve Niger et cela à un rythme qui dépend de la force disponible : celle des crues, liée en particulier à la quantité de pluies reçues et au coefficient de ruissellement.

Origine des sédiments du bassin versant

La majeure partie des sédiments est produite par les couvertures pédologiques ferrugineuses (en raison surtout de leur sensibilité à l'érosion et de leur proximité du lit du marigot) et les matériaux cuirassés (en raison de leur importante extension dans le bassin versant). Les matières mesurées à l'exutoire semblent également provenir essentiellement de ces zones. En effet, les analyses minéralogiques présentées au tableau 5.9 montrent des taux importants de kaolinite (55 à 75 %) et de quartz (19 à 34 %).

Dynamique des systèmes agraires et érosion potentielle

La croissance démographique actuelle (1,7 % /an) et les exigences d'intensification agricole auront, à moyen et long terme, des conséquences remarquables sur l'affectation des terres du bassin versant :

- les sols gravillonnaires et caillouteux qui se prêtent mal à la mécanisation ont commencé à être déclassés pour les cultures annuelles (chapitre 2), un processus qui se poursuit à un rythme élevé. Il en résultera une forte pression sur les sols épais (sols ferrugineux tropicaux, sol bruns vertiques et sols hydromorphes des zones II et IV).
- dans un premier temps, la pratique du labour sans mesure antiérosive se poursuivra. C'est plus tard qu'on peut espérer sur une maîtrise des meilleures techniques de gestion des sols et des eaux par les paysans.

Dans ces conditions d'agrosystèmes, les résultats de simulations d'érosion potentielle semblent être objectifs. L'augmentation sensible de l'érosion au stade1 (EPS1) s'explique par le fait que la totalité des zones I et IV est cultivée: il s'agit de sols sans élément grossier et plus exposés à l'érosion dès la mise en culture de la jachère (chapitres 2 et 3). L'évolution des techniques de production au stade2 est peut raisonnablement réduire l'érosion : en effet, les caractérisations d'état de surface (chapitre 2) et les mesures d'érosion présentées au chapitre 3 montrent que le travail minimum du sol, par exemple, permet d'assurer une bonne couverture du sol et de maintenir l'érosion à un niveau comparable à la dynamique sous jachère.

5.6 Conclusion

La production et le transfert des sédiments dans le bassin versant de Djitiko peuvent être étudiés avec des modèles simples. La production actuelle de sédiment est de $5,5 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ en moyenne . Cette perte en terre reflétant le bassin versant dans sa globalité, avec 92 % de jachère est nettement inférieure à ce qu'un paysan peut observer dans son champ : souvent plus de $20 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ d'après les résultats de mesure présentés au chapitre 3. L'essentielle de la production actuelle de sédiment est faite sur les sols gravillonnaires et les ferrugineux tropicaux.

A l'exutoire du bassin versant, l'impression de la faible érosion actuelle du bassin versant est encore plus forte. Seulement 7% des matériaux érodés parviennent à l'exutoire. Ce faible transfert des matériaux érodés s'explique par la microtopographie des surfaces planes, la présence de dépression dans les ravines, le développement important de la végétation herbacée peu de temps après l'installation des pluies. La compréhension des transferts de matériaux érodés dans un bassin versant exige une analyse topographique fine de la parcelle (jachère ou culture) et du réseau de drainage. Cela peut permettre d'évaluer la capacité de stockage de sédiment qui est une fonction du volume des microcavités (niveau parcelle) et des dépressions le long du réseau de drainage.

L'augmentation de la population conduira à une nette augmentation de l'érosion si les paysans continuent de pratiquer le labour sans mesures antiérosives. Par contre, l'introduction de techniques comme les bandes enherbées et le travail minimum du sol favoriseront une nette diminution par rapport au niveau actuel malgré l'extension des cultures.

CHAPITRE VI
REFLEXION SUR L'AMENAGEMENT DU MILIEU SOUDANIEN

6.1 Introduction

Depuis l'indépendance des Etats de l'Afrique occidentale (en 1960), des organismes nationaux de recherche et de développement se sont progressivement constitués avec, en ce qui concerne les pays francophones, la France comme partenaire privilégié (Piéri, 1989). Par la suite, de nombreux autres pays développés d'Europe (par exemple Pays Bas) et d'Amérique (Canada, USA) sont devenus des partenaires de programmes de développement rural. Par ailleurs, à partir des années 1980, de nombreuses ONG (organisme non gouvernemental) se sont constituées pour devenir des acteurs actifs du développement local en milieu rural.

En faisant le bilan des trente premières années de recherches et de développement agricoles au sud du Sahara, Piéri (1989) note qu'à côté de réels succès, les programmes ont connu aussi de douloureux échecs. Ces derniers semblent être enregistrés dès que l'on transpose directement à la zone soudanienne, des techniques d'intensification éprouvées dans les conditions de l'agriculture européenne. Ces constats ont conduit les organismes de coopération et de financement internationaux, régionaux ou bilatéraux à se poser de nombreuses questions sur l'adaptation des systèmes de production aux conditions tropicales (socioéconomiques et techniques). Il est devenu évident que les stratégies d'intervention ont besoin d'être mieux adaptées aux ressources et aux contraintes locales (ressources naturelles en particulier) et d'intégrer les savoirs locaux.

Notre prétention n'est pas de présenter ici, un plan achevé d'aménagement, mais de discuter certains aspects physiques de la mise en valeur du milieu soudanien. Les aspects socio-économiques sont d'importance capitale dans cette région, mais nous n'en discuteront pas spécialement.

6.2 Contraintes physiques de la mise en valeur agricole du domaine soudanien.

Les principales contraintes physiques du domaine soudanien sont relatives aux ressources en eau (régime pluviométrique et évapotranspiration, eaux de surface et de profondeur) et en sols (azote, matière organique, phosphore)

62.1. Contraintes liées aux ressources en eau

*** Le régime pluviométrique et l'évapotranspiration**

La première contrainte liée au régime pluviométrique est la longue saison sèche (5 à 6 mois) avec très peu d'apport d'eau. A l'opposé, il existe, le plus souvent, un excès d'eau en juillet, août et septembre.

La saison pluvieuse est caractérisée par de grandes variabilités spatiales et des irrégularités considérables des quantités (annuelles, mensuelles et journalières) de pluie et de leur fréquence. Par ailleurs, la durée de la saison est très variable d'une année à l'autre. Par exemple nous avons mesuré :

- des quantités annuelles de 912 mm pour l'année 1998 et 1354 mm pour l'année 1999;
- des pluies, seulement de mai à octobre en 1998 et d'avril à novembre en 1999;
- respectivement 164 et 300 mm en juillet et août 1998 contre 251 et 539 mm, respectivement en juillet et août 1999.

Sivakumar (1989) précise que le coefficient de variation des quantités annuelles de pluie pour les zones soudano-sahéliennes est de l'ordre de 15 à 30 % . Il faut signaler aussi que des périodes plus ou moins longues de déficit pluviométrique continu peuvent être observées. C'est le cas de la période incluant les années 1970 et 1980 où les précipitations annuelles ont considérablement diminué à partir du début des années 1970 (Hubert et Carbonel, 1987). Les déficits pluviométriques calculés pour la période 1961-1985 atteignent 10 à 15 % (Le Borgne, 1987).

L'évapotranspiration Peanman dépasse généralement 1700 mm an^{-1} . Une telle valeur favorise nettement l'épuisement des réserves hydriques du sol et une forte dessiccation des matériaux superficiels.

Le régime pluviométrique a des conséquences néfastes sur le comportement des écosystèmes et les stratégies paysannes à l'échelle parcellaire. En effet:

- la longue période sèche a des conséquences très nettes sur les processus physico-chimiques et biologiques qui interviennent dans le fonctionnement des écosystèmes (ex ralentissement des réactions d'hydrolyse dans les sols, prise en masse des matériaux superficiels et blocage de certaines formes de la vie biologique).
- les excès d'eau pendant la période juillet à septembre sont à l'origine d'un déséquilibre du bilan hydrique et d'importantes pertes de matières par ruissellement et par drainage vertical et oblique (Roose, 1980): en particulier, matière organique, bases échangeables et phosphore.

Les variabilités pluviométriques sont d'une grande importance pour le paysan soucieux de gérer ces événements sur la parcelle agricole. Les irrégularités de début de saison imposent souvent des semis à répétition, d'où des pertes de semences. Le déficit pluviométrique d'un mois peut compromettre les résultats agronomiques de la campagne, de même que l'arrêt brusque des pluies avant la fin du cycle cultural. A l'échelle interannuelle, le choix du matériel

végétal (en particulier choix de l'espèce et du cycle) pose de sérieux problèmes aux paysans : plus les cycles sont longs plus les espèces sont productives, à moins d'un accident de parcours (sécheresse à des périodes critiques)

*** Les ressources en eaux de surface et souterraines**

Une contrainte majeure au stockage des eaux de surface est la forte évapotranspiration qui favorise des pertes énormes. Cela pèse beaucoup sur les possibilités d'irrigation à partir des petits cours d'eau, accumulant pourtant de grandes quantités d'eau pendant les périodes excédentaires de juillet à septembre.

Les connaissances sur les eaux souterraines ont connu de nettes améliorations au cours des deux dernières décennies grâce à de nombreux projets chargés d'hydraulique villageoise et pastorale. Chapotard, (1989) donne certaines caractéristiques importantes de ces ressources :

- les aquifères sur le socle précambrien semblent être discontinus et profonds. Ils sont liés à la fracturation ou à l'altération de la roche, présentent des niveaux statiques proches de la surface et des débits exploitables ponctuellement faibles.
- les aquifères sur formations sédimentaires postprimaires se trouvent à un niveau statique variable, parfois assez profond. Les débits des forages sont de 10 à 200 m³ h⁻¹ ou plus

62.2 Les contraintes liées aux ressources en sol

Le faible taux de matière organique et la faible capacité d'échange des argiles sont à l'origine de nombreux problèmes de sol : instabilité structurale et mauvais comportement hydrodynamique en particulier. Comme l'ont montré les tests de laboratoire (Chapitre 4), même si les sols présentent une bonne stabilité structurale sous jachère, la mise en culture conduit rapidement à la dégradation de cette structure. Cela doit être prise en compte dans les stratégies de mise en culture.

6.3 Les stratégies traditionnelles dans l'agriculture et la gestion des ressources naturelles (cas du bassin versant de Djitiko)

63.1 Savoirs locaux relatifs à l'environnement physique

Dans les zones rurales du domaine soudanien en général, les paysans ont des connaissances assez précises de leurs ressources naturelles (sol et végétation en particulier). De tels savoirs, faisant partie des éléments fondamentaux de la culture des peuples (Warren et Cashman, 1991) ont longtemps constitué pour eux, l'unique référentiel dans les divers domaines d'activité. Dans l'organisation de l'espace, la part des réalités culturelles est d'une grande

importance et intéresse la géographie culturelle *stricto sensu* et l'ethnogéographie (Claval, 1992). Notons qu'aujourd'hui, les savoirs traditionnels connaissent une certaine dynamique au contact des autres sources de la connaissance. Leurs valeurs sont de plus en plus reconnues par les institutions de recherche et les organismes nationaux et internationaux de développement (Lévi Strauss 1962; Dupré, 1991; Barrau 1993; Warren, 1993; Diallo et Keita, 1995). Ils sont répertoriés et étudiés sous des vocables variés : sciences sauvages, ethnosciences, savoirs locaux et savoirs indigènes (*indigenous knowledge* des auteurs anglo-saxons). Leur utilisation possible dans un système d'information géographique pour le développement a commencé à être mise en évidence (Lawas et Luning, 1996).

Dans le bassin versant de Djitiko, nous avons pu nous rendre compte du réel intérêt des paysans à la connaissance de leurs ressources naturelles. Ainsi, la liste des typologies pédologiques données au chapitre 3 peut être facilement obtenue auprès de nombreux paysans d'au moins 30 ans. Concernant la discrimination des différents sols en rapport avec leur productivité, un aspect très important dans les rapports d'influence au village, les paysans retiennent essentiellement 3 critères : la sensibilité au déficit hydrique, le rythme de baisse de fertilité avec la mise en culture et enfin le potentiel d'enherbement. D'après le premier critère, le sol ferrugineux rouge de notre site expérimental est indexé comme mauvais sol. Par contre, le sol brun est signalé comme un sol ne présentant pas de problème hydrique et qui est très peu sensible à la baisse de fertilité. Il peut être seulement abandonné après des années de culture à cause de l'enherbement qui y est très préoccupant. Quant au sol gravillonnaire qui couvre environ 40 % du bassin versant, il est reconnu par tous comme un sol marginal, essentiellement affecté à la culture d'arachide (une spécialité féminine dans le milieu malinké).

Les connaissances relatives à la flore incluent de multiples aspects:

- la distribution spatiale des espèces dans le terroir, de même que leur relation avec les unités physiographiques;
- les valeurs médicinales et fourragères des différentes espèces;
- la qualité technologique des espèces : ainsi les espèces appropriées pour la confection des instruments domestiques (ex : mortier, pilon), la menuiserie et autres utilisations sont bien répertoriées.

63.2 La gestion de la biomasse végétale

63.2.1 La pratique des feux de brousse

Sur les terrains non cultivés, la biomasse végétale est systématiquement brûlée chaque année après l'arrêt des pluies, une pratique assez connue dans l'ensemble des régions de savane de l'Afrique occidentale et même ailleurs. Dans le bassin versant de Djitiko, les premiers feux sont allumés (mi octobre - novembre) sur les glacis cuirassés à sols gravillonnaires peu épais et à tapis herbacé très important. Cela pourrait s'expliquer par la rareté des champs dans cette unité de paysage et aussi par le dessèchement rapide de la végétation après arrêt des pluies (sol à très faible capacité de stockage de l'eau).

Les feux semblent être plus tardifs dans le cas des champs cultivés. En ce moment, l'essentiel des résidus des récoltes est exporté pour les besoins domestiques ou par les troupeaux bovins. Le reliquat et toute la litière sont complètement brûlés.

Les conséquences des feux de brousse sur l'environnement soudanien semblent être complexes :

- le feu réduit la diversité des espèces végétales et animales et réduit l'activité biologique, favorise l'augmentation du ruissellement et de l'érosion (Roose, 1980 et 1991). Il faut signaler que les effets du feu sont nettement atténués quand il est précoce. Ainsi, Roose a mesuré à Gonse (Burkina Faso) des coefficients de ruissellement annuel moyen de 1% sur parcelle intégralement protégée contre les feux, 10 % sur parcelle avec feux précoces et 73 % sur parcelle avec feux tardifs. Les érosions sur ces trois parcelles ont été respectivement $0,033 \text{ t ha}^{-1}$; $0,147 \text{ t ha}^{-1}$ et $0,344 \text{ t ha}^{-1}$.

- plus récemment, les chercheurs découvrent que le brûlis est probablement une partie du fonctionnement naturel des écosystèmes méditerranéens et qu'il est, en Afrique et en Asie, une stratégie complexe pour transformer les conditions naturelles en de meilleurs systèmes agropastoraux (Levang, 1984 cité par Roose et Barthès 2000). Le brûlis est souvent, le seul moyen pour les paysans pauvres de défricher le terrain, de diminuer la pression des parasites, d'augmenter le phosphore assimilable, les bases échangeables, le pH et de réduire la toxicité aluminique dans les sols acides (Nzila et Nyete ; Moreau et al, 1998).

63.2.2 La gestion des adventices sur parcelle cultivée

La biomasse issue des opérations de sarclage des cultures est très généralement laissée sur place, en formant des tas. Nous n'avons pas fait d'évaluation quantitative ou qualitative de cette biomasse. Cependant, il est facile de constater sur le terrain que la pratique favorise l'activité biologique et l'ouverture du sol. Des mesures, en zone soudanienne du Tchad, ont montré que la quantité de biomasse d'adventices (matière sèche) issue de sarclage peut atteindre $1,6 \text{ t ha}^{-1}$ (Ngamine et Altolna, 1998).

63.2.3 Le maintien de parcs arborés dans les champs

Certaines espèces végétales comme le karité (*Vitellaria paradoxa*) et le néré (*Parkia biglobosa*) sont protégées par les traditions et ne sont coupées que très rarement d'où leur présence dans les champs cultivés. Il s'agit d'espèces à fruit utile; la plus célèbre, le karité donne un beurre utilisé dans l'alimentation et le cosmétique. La densité de karité dans les champs, mesurée ailleurs dans la zone soudanienne du Mali, peut atteindre 17,4 arbres.ha⁻¹ (Traoré K, 2000) et améliore nettement la fertilité des sols.

63.3 Pratique de la jachère : moyens de restaurer la fertilité des terres

Rappelons que la jachère se définit aujourd'hui par l'état d'une terre temporairement sans culture, qui a plusieurs rôles (Sébillotte, 1991). Les pratiques de jachère semblent être diverses. En Afrique de l'Ouest, elles sont généralement influencées, par les pratiques foncières en vigueur, les réalités démographiques et les systèmes de production.

Dans le bassin versant de Djitiko, la mise en jachère reste une pratique générale et est décidée après l'observation d'une baisse notable des rendements ou d'une prolifération importante des adventices dans les champs. Cela se fait après 4 à 5 années de culture. Quant à la durée de la jachère, elle peut atteindre et dépasser 20 ans. Cependant certains champs mis en jachère peuvent être repris en partie au bout d'un, de deux ou trois ans pour l'installation de microparcelles d'arachide à la demande des paysannes. Ici, comme partout ailleurs, en zone soudanienne, la jachère joue le rôle de pâturage et de zone de prélèvement de bois de chauffe. Les plus anciennes jachères du bassin versant sont observées sur les sols caillouteux, les sols gravillonnaires et les sols ferrugineux jaunes, cela étant en rapport avec l'évolution des conditions d'utilisation des sols (chapitre 2).

Dans les jachères d'au moins 20 ans, nos mesures (matière organique, bases échangeables, ruissellement et érosion, stabilité des agrégats et des mottes) données aux chapitres 2, 3 et 4 attestent de bons comportements des sols en place. Cela est conforme aux résultats déjà obtenus dans différentes situations tropicales. D'après Feller et al (1991), les jachères, même de durée inférieure à cinq ans, permettent de maintenir dans une succession culture-jachère, des pools organiques, biologiques et minéraux à *turn-over* rapide, de lutter contre les adventices, voire les parasites des cultures. Roose (1991) trouve que la jachère de longue durée améliore les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol, mais remarque que les gains de production sont maigres en face de l'étendue des terres immobilisées. Il faut remarquer que les incidences de la jachère sur l'amélioration des propriétés du sol semblent

varier selon le contexte pédologique. Par exemple les variations de teneurs en carbone sont d'autant plus importantes que les sols sont riches en argile (Feller et al, 1991).

63.4 Les techniques spécifiques de lutte antiérosive

Les enquêtes dans le bassin versant ont montré que les pratiques traditionnelles sont rudimentaires (Keita, 1997). Cependant, les paysans sont conscients des dégâts causés par le ruissellement et l'érosion. La pratique dominante de lutte antiérosive est la construction de lignes de cailloux ou la mise en place de branches et troncs d'arbre dans les ravines, perpendiculairement au courant. Ces pratiques ont une efficacité très limitée.

6.4 Interventions des services techniques de l'Etat: évolution des pratiques agricoles et leurs incidences

De façon générale, au Mali, comme dans beaucoup d'autres pays d'Afrique et du monde en développement, les actions de vulgarisation agricole constituent un aspect particulièrement important des politiques nationales de développement rural. L'objectif est la modernisation de l'agriculture, entendue comme la substitution de techniques nouvelles de production à celles dites traditionnelles. Il s'agit d'amener les paysans à adopter les techniques mises au point par les instituts nationaux, étrangers et internationaux de recherche agronomique. Il s'agit également de les amener à accepter de nouveaux modes d'organisation socio-économique.

Dans la pratique, au Mali, la mise en application de la politique de développement rural a été confiée à des organismes nommés "Opérations de développement rural (ODR)". Sur un plan technique, une opération est généralement une intervention limitée dans le temps et dans l'espace, en vue de réaliser un objectif précis (Traoré N, 1979). Appliquée au développement agricole, l'opération est un ensemble d'actions constituant un ou plusieurs programmes orientés vers la réalisation d'objectifs de production conçus dans un cadre écologique et socio-économique défini et géré par un organisme autonome. Des objectifs secondaires (santé, éducation, amélioration du cadre de vie) sont souvent inclus. L'opération peut être centrée sur une seule culture ou sur une zone géographique sans référence à une spéculation agricole.

Dans le bassin versant du Djitiko et dans le reste de la haute vallée du Niger au Mali, l'Office de la Haute Vallée du Niger (OHVN) est chargé, depuis les années 1970, de la mise en œuvre de la politique de développement agricole de l'Etat. Le contenu des actions sur le terrain a fait l'objet de multiples remaniements que nous n'allons pas discuter ici. Nous discuterons plutôt de résultats techniques dont les principaux points notés dans le bassin versant expérimental sont :

* L'introduction de la culture commerciale du coton.

Elle a été accompagnée du développement de la culture attelée (traction bovine) et de possibilités d'approvisionnement en intrants agricoles (engrais minéraux et insecticides). Dans chacun des trois villages du bassin versant, un magasin géré par les paysans leur permet de se ravitailler en intrants agricoles sous forme de crédits de campagne. Par ailleurs, les villages sont organisés de façon à pouvoir constituer des stocks céréaliers en prévision de crise.

* Le développement de la pratique du labour à la charrue et ses conséquences

Cette technique est devenue le mode dominant de préparation du sol. Ainsi après destruction du couvert végétal naturel des jachères, les terres sont labourées à la charrue en début de saison des pluies. Nos résultats expérimentaux, donnés au chapitre 3, montrent clairement que le ruissellement et l'érosion dans ces conditions, c'est à dire sur une parcelle labourée, augmentent nettement et sont sans commune mesure avec le comportement de la jachère. En effet le ruissellement est multiplié par 1,2 à 2 et l'érosion par 4 à 8.

6.5 Propositions de mise en valeur en fonction de nos résultats

Il s'agit surtout de propositions à l'échelle du champ paysan. A ce niveau, la prise de décision est relativement moins contraignante et dépend beaucoup de la motivation de chaque exploitant. Tel n'est pas le cas des méthodes de lutte antiérosive, demandant la mobilisation de tout un village et qui semblent être de plus en plus désapprouvées par les paysans dans de nombreux villages des zones soudaniennes du Mali (Fané et al, 1999).

65.1 Amélioration de la gestion des jachères par adoption de feux précoces

La pratique généralisée des feux précoces est envisageable afin de limiter la destruction de la biomasse (végétale et animale). Les avantages à attendre sont l'amélioration des rôles de la jachère, en particulier, amélioration de la fertilité pour le cycle suivant de culture, augmentation du disponible fourrager. Cela peut diminuer également la pression sur les résidus de récolte.

65.2 Gestion de la matière organique dans les champs

La biomasse herbacée, vivante et à l'état de débris, assure sans doute une bonne couverture du sol et sa protection contre l'érosion. Cette biomasse permet aussi, à moyen et à long terme, d'améliorer le statut organique des sols. Pour bénéficier pleinement de tels effets :

- les adventices sarclées doivent être mieux gérées. Elles ne doivent pas être exportées des parcelles cultivées et les débris qui restent après la saison pluvieuse doivent être protégés

contre les feux de brousse. Ces actions requièrent la mise en place de pare feux (bande complètement nue) autour des zones de culture.

- les résidus de récolte ou ce qui en reste après le passage des troupeaux bovins doivent être également protégés des feux afin pouvoir jouer les rôles ci dessus cités pour les adventices.

65.3 Limitation du labour et adoption du travail minimum du sol

La pratique du labour mérite une réduction dans sa fréquence au profit du travail minimum du sol. En effet la deuxième technique peut réduire l'érosion au moins de moitié comme le montrent nos résultats présentés au chapitre 3. Par ailleurs ses avantages économiques, non calculés ici, sont trouvés intéressants dans le nord Cameroun (Boli, 1996)

65. 4 Les actions aux niveaux terroir villageois et bassin versant

Malgré les difficultés d'organisation pour l'aménagement d'un espace incluant tout un village ou groupe de village, des efforts sont à fournir à ces niveaux. En effet, de nombreuses actions sont indispensables à ces niveaux pour mieux les structurer : protection des berges, aménagement des pistes (qui se transforment facilement en ravines dans cette région), organisation de l'élevage et exploitation des ressources naturelles communautaires.

6.6 Conclusion

Le milieu soudanien , malgré les grandes difficultés liées aux ressources en eau (irrégularité des pluies, forte évaporation) et une faible fertilité naturelle du sol peut permettre le développement d'une agriculture durable. Pour cela, les pratiques conservatoires de l'eau et de la fertilité des sols doivent être convenablement appliquées à l'échelle du champ paysan, du terroir villageois et du bassin versant.

CONCLUSION GENERALE

Cette étude du ruissellement et de l'érosion hydrique dans un bassin versant de 103 km² a permis :

- la quantification du ruissellement , des pertes en terre et des pertes en éléments chimiques en milieu réel,
- l'identification au laboratoire d'indicateurs pertinents d'érodibilité des sols;
- l'établissement du rapport entre la production de sédiment à l'intérieur du bassin versant et le transfert de sédiment à l'exutoire.
- de faire enfin une réflexion sur l'aménagement du milieu soudanien.

Un préalable à l'interprétation des résultats expérimentaux a été la compréhension des principaux sols et de la dynamique spatio-temporelle des états de surface.

1.1. Un bassin versant essentiellement formé de sols indurés (40%) et de sols ferrugineux tropicaux (39%) avec des dynamiques spatio-temporelles très nettes des états de surface.

* La caractérisation des couvertures pédologiques du bassin versant, sur le terrain et au laboratoire, a permis de rendre compte de leurs caractéristiques et de leur distribution spatiale.

- Le sol gravillonnaire (sol peu évolué d'érosion sur cuirasse), localisé sur les glacis cuirassés (cuirasse ferrugineuse) occupe 40 % de la surface du bassin versant. Il s'agit d'un sol squelettique avec 60 à 70 % de gravillons, donc de faible valeur agricole.

- Les couvertures pédologiques ferrugineuses couvrent 39 % du bassin versant. Ils ont une épaisseur variable de 75 à plus de 100 cm. Ces sols profonds sont riches en limon et pauvre en matière organique. La couleur de l'horizon de surface permet de distinguer des sols jaunes, des sols rouges et des sols beiges.

- Le sol brun vertique, localisé dans la dépression , au pied des reliefs résiduels, couvre 11 % du bassin versant. La couche superficielle (0 -10 à 15 cm) contient en moyenne 26 % d'argile et 34 % de limon avec 4 % de matière organique. C'est un sol riche, très recherchée par les paysans dans le contexte actuel de développement de la culture du coton.

- Le sol caillouteux (régosol), localisé sur les reliefs résiduels, occupe 9 % de la surface du bassin versant. Il contient 45 % d'éléments grossiers en surface et repose, à partir de 40 cm de profondeur, sur de la roche faiblement altérée. Il est de moins en moins cultivé par les paysans, car non adapté à la culture mécanisée.

- Les sols hydromorphes, associés au lit majeur du Djitiko, couvre environ 1% du bassin versant. Ces sols sont riches en limon (plus de 50 % dans l'horizon des surface).

* En fin de saison sèche, tout juste avant les premières pluies, le bassin versant est très sec. Le taux de recouvrement de la surface du sol (tel que défini dans nos travaux : couvert végétal + litière), varie d'environ 30 à 40 % sous jachère et de 10 à 20 % en milieu cultivé. Qu'il s'agisse de jachère ou de milieu cultivé, le type de sol a une influence nette. Par ailleurs, les sols, quelle que soit l'occupation (jachère ou culture) sont principalement couverts de croûte et de pellicule au détriment des surfaces ouvertes. Le taux de surface ouverte varie de 5 à 42 % et permet de classer les sols du plus ouvert au plus fermé comme suit :

Sous jachère : Sol rouge (SR) > Sol brun (SB) = Sol caillouteux (SC) > Sol gravillonnaire (SG)

Sous culture : Labour /SB > Travail minimum /SR > Travail minimum /SB > Labour /SR

Dès le milieu de la saison pluvieuse, le taux de recouvrement du sol dépasse 60 à 80 % dans toutes les situations et les taux de surface ouverte vont de 31 à 93 % selon le type le sol (à part le sol gravillonnaire où le taux est de 2%). Pour cette période, le classement est le suivant :

Sous jachère : SB > SC > SR > SG

Sous culture : Travail minimum/SR > Travail minimum/SB > Labour/SR > Labour/SB

La réorganisation superficielle des matériaux pédologiques fait que les premières pluies trouvent des surfaces hydrologiques fermées surtout en milieu cultivé.

1.2. Ruissellement et pertes en terre, à une échelle spatiale donnée sont fonctions (du type de sol, de l'occupation et des techniques culturales)

* Sous jachère, le coefficient de ruissellement annuel moyen (KRAM) varie de 10 % sur sol caillouteux à 41 % sur sol gravillonnaire. Les sols brun vertique et ferrugineux rouge sont comporte de façon similaire (KRAM = 22%). La plus forte érosion (moyenne des deux années) est mesurée sur sol ferrugineux rouge : $4,8 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ Il est suivi par le sol gravillonnaire ($3,9 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$). Pendant la même période les érosions mesurées sur sol caillouteux et sol brun vertique sont nettement plus faibles : respectivement $0,7$ et $1,7 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$.

* Influence des techniques culturales sur le ruissellement et l'érosion

Les mesures faites sur parcelles labourées et sur parcelles cultivées avec le travail minimum du sol, montrent que :

- le labour donne 40 à 50 % de ruissellement contre 13 % à 23 % pour le travail minimum du sol;
- le labour favorise environ 2 à 5 fois plus d'érosion que le travail minimum du sol;

1.3. Les tests de stabilité des agrégats et des mottes sont des indicateurs pertinents d'érodibilité des sols du bassin versant.

Ces tests permettent respectivement de déterminer le taux de macroagrégats stables à l'eau (MA) et le volume d'eau (V) nécessaire pour désagréger la motte. Les tests de régression nous ont permis de noter :

- une corrélation positive entre le taux de macroagrégats stables d'un sol et sa teneur en matière organique
- que le volume d'eau nécessaire pour désagréger une motte dépend du taux de macroagrégats stables du sol en place et du poids des racelles.

$$Y = 261,2 X + 11,82$$

Y = taux de macroagrégats stables en g kg⁻¹ de sol

X = taux de carbone en g kg⁻¹ de sol

$$V = 0,27 MA + 50,5 PR - 244,2$$

V = volume d'eau en mL

MA = taux de macroagrégats en g kg⁻¹ de sol,

PR = poids des racelles en g kg⁻¹ de sol,

1.4. La production et le transfert des sédiments dans le bassin versant peuvent être étudiés avec des modèles simples:

* La production de sédiment dans l'ensemble du bassin versant est donnée par :

$$Ps(Z_n) = \sum_i [E_{Sn}(mu_i) \times S_{Sn}(mu_i)]$$

Ps (Z_n) : production de sédiments de la zone n,

E_{Sn}(mu_i): érosion mesurée sur parcelle de sol représentative de la zone n avec le mode d'utilisation i,

S_{Sn} (mu_i) : surface de la zone n avec le mode d'utilisation i.

* La sortie de sédiment à l'exutoire du bassin versant est donnée par :

$$Y = 31,109 X$$

Y = quantité de MES en tonnes

X = valeur de la lame ruisselée exprimée en millimètres

* Production actuelle et production potentielle de sédiment

La production actuelle de sédiment pour l'ensemble du bassin versant est estimée à 46 401 t an⁻¹ soit 4, 5 t ha⁻¹ an⁻¹. La majeure partie de ces sédiments sont produits sur sol gravillonnaire (du fait de sa grande extension) et sol ferrugineux (du fait de son extension et de sa sensibilité).

La production potentielle de sédiment est estimée à 8,9 t ha⁻¹ an⁻¹ dans un premier temps et seulement à 3, 5 t ha⁻¹ an⁻¹ dans un deuxième temps. Dans ces deux cas, on admet une augmentation de la population et une nouvelle affectation des terres selon laquelle toutes les cultures sont pratiquées sur sols ferrugineux tropicaux, sol brun vertique et sol hydromorphe du lit majeur du Djitiko (les sols marginaux, caillouteux et gravillonnaires sont maintenus sous couvert végétal permanent). Dans le premier cas, le labour est pratiqué sans mesure conservatoire des sols ; dans le deuxième cas, les pratiques antiérosives (comme le travail minimum du sol, les bandes enherbées) sont généralisées.

* Rapport entre production et transfert de sédiment

La différence entre sédiments produits à l'intérieur du bassin versant et sédiments transférés à l'exutoire (calculés d'après les modèles présentés) est considérable :

$$QTS_T = 1/14 QTS_p$$

$$QTS_T = 1/7 MES_p$$

QTS_p : quantité totale de sédiment produit

MES_p : matières en suspensions produites

QTS_T : quantité totale de sédiment transféré

1.5. Pour une meilleure gestion des sols et des eaux, des actions spécifiques sont nécessaires à chacune des deux échelles spatiales (terroir villageois ou bassin versant d'une part et champ paysan d'autre part).

* Echelle terroir villageois ou bassin versant.

Le risque d'érosion de chaque unité de paysage doit être pris en compte dans les décisions d'aménagement et d'affectation des terres. Les feux de brousse doivent être mieux réglementés, en particulier, la pratique des feux précoces doit être respectée.

* Echelle du champ paysan.

La pratique du labour doit être limitée (la fréquence de la pratique peut être diminuée). La pratique du travail minimum du sol ou des bandes enherbées sont envisageables pour améliorer la gestion des eaux et réduire les pertes en terres à l'échelle du champ paysan

1.6 Perspectives de recherche

*** Pour une meilleure compréhension des transferts de matériaux solides**

Il semble envisageable de déterminer pour chaque surface hydrologique, une capacité de stockage des sédiments. Une telle capacité est fonction du volume des creux non linéaires. Ce dernier correspond, sur une parcelle, à l'ensemble des microdépressions liées à la rugosité et à l'obstruction par l'activité faunique et les débris végétaux. Il correspond, à l'échelle bassin versant, à l'ensemble des dépressions qui accumulent les matériaux.

*** Pour une meilleure compréhension des pertes d'éléments chimiques par ruissellement et érosion**

Les mesures peuvent être conduites sur des parcelles de 100 m² en prenant le soin de faire des répétitions.

*** Pour une meilleure cartographie des risques d'érosion**

Les possibilités d'utiliser les critères de stabilité des agrégats du sol et des mottes dans les systèmes d'information géographique méritent d'être approfondies.

BIBLIOGRAPHIE

- AFES. (1992). Référentiel Pédologique. Principaux sols d'Europe. Editions INRA Paris : 222 p.
- ASSELINE J., VALENTIN C. (1978). Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol. 15 (4), p 321-349.
- BAISE D., JABIOL B. (1995). Guide pour la description des sols Editions INRA, Paris : 375 p.
- BARRAU J. (1993). Les savoirs naturalistes et la naissance de l'ethnoscience. In La science sauvage Des savoirs populaires aux ethnosciences. Eds du Seuil: p 16-25
- BARTHES B. (1998). Stabilité structurale : méthode développée au Laboratoire d'étude du comportement des sols cultivés (LCSC). ORSTOM, Montpellier.
- BEAUDET G. (1978). Essai sur la zonation et la signification géomorphologique des cuirasses ferrugineuses en Afrique Occidentale. Travaux et documents de géographie tropicale n°33, p 34- 42.
- BERGSMA E., CHARMA P., GIBBONS F., HURNI H., MOLDENHAUEUR W.C., PANICHAPONG S. (1996). Terminology for soil erosion and conservation. Grafish Service centrum, Wageningen : 313p
- BLANC PAMMARD C. (1986). Dialoguer avec le paysage ou comment l'espace écologique est vu et pratiqué par les communautés rurales des hautes terres malgachess, in Chatelin Y et Riou G. (éds). Milieux et paysages. Paris, Masson , p 17-33
- BLANC PAMMARD C (1990) "Lecture du paysage, une proposition méthodologique". La dégradation des paysages en Afrique de l'Ouest Editions ORSTOM, p 269-280
- BLANCHARD E., KING C., LE BISSONNAIS Y., BOURGUIGNON A., SOUCHERE 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 , p 181-199.

BOLI Z. (1996). Fonctionnement des sols sableux et optimisation des pratiques culturales en zone soudanienne humide du Nord Cameroun (expérimentation au champ en parcelles d'érosion à Mbissiri). Thèse de doctorat, Université de Dijon :343 p.

BOLI Z ., BEP A., ROOSE E. (1991). Enquête sur l'érosion en région cotonnière du Nord Cameroun. Bull. Réseau Erosion n°11 p 127-138

BOLLINE A. (1982). Etude et prévision de l'érosion des sols limoneux cultivés en moyenne Belgique. Thèse de doctorat de l'Université de Liège : 356 p + annexe.

BONN F. (1998). La spatialisation des modèles d'érosion des sols à l'aide de la télédétection et des SIG : possibilités, erreurs et limites. Sécheresse n°3, vol 9, p 185- 192

BRUNET- MORET Y., CHAPERON P., LAMAGAT J.P., MOLINIER M. (1986.). Monographie hydrologique du fleuve Niger. Tome 1, Niger supérieur. Paris : Editions ORSTOM; 396 p

BOULET R. (1970). La géomorphologie et les principaux types de sols en Haute Volta septentrionale. Cah. O.R.S.T.O.M., sér Pédol. ,vol. VIII, n°3-1970: 245-271

CARRE P. (1972). Quelques aspects des apports fluviaux de matériaux solides en suspension vers le Tchad. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol. IX(1), 19-45.

CASENAVE C., VALENTIN C. (1989). Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. Paris : Editions ORSTOM, 229 p

CENSIER C., OLIVRY J.C. (1995). Distribution de la granulométrie et de la minéralogie de la charge de fond sableuse du bassin de l'Oubangui (RCA) : implications sur l'origine de la dynamique sédimentaire des alluvions de l'Oubangui. In Jean-Claude Olivry et Jacques Boulègue. Grands Bassins Fluviaux Périallantiques : Congo, Niger, Amazone;. Actes du

colloque PEGI, INSU-CNRS-ORSTOM, Paris, France, du 22 au 24 novembre : 159-169.

CENSIER C., OLIVRY J.C.? BRICQUET J.P. (1995). Les apports détritiques terrigènes dans la cuvette lacustre du Niger entre Mopti et Kona (Rép. du Mali. In Jean-Claude Olivry et Jacques Boulègue. Grands Bassins Fluviaux Périalantiques : Congo, Niger, Amazone; . Actes du colloque PEGI, INSU-CNRS-ORSTOM, Paris, France, du 22 au 24 novembre : 305-315.

CHAPOTARD J.M. (1989). L'usage des ressources en eau pour l'agriculture en zone soudano- sahélienne. *in soil, crop and water management in sudano-sahelian zon Niamey, 11-16 January*. Patancheru, Andhra Pradesh : ICRISAT, 1987, p 39-54

CHEVALIER P. (1996). Les bassins versants de recherche tropicaux : historique des études menées par l'Orstom. In L'hydrologie tropicale : géoscience et outil pour le développement (Actes de conférence à la mémoire de Jean Rodier, 2- 4 mai 1995 à Paris). IAHS Publ n° 228, p 13-23

CLAVAL P. (1992). Champ et perspectives de la géographie culturelle. Géographie et cultures n° 1, p 7-38

COQUILLARD P., R.C. HILL D. (1997). Modélisation et simulation d'écosystèmes. Des modèles déterministes aux simulations à évènements discrets. Masson, Paris : 273 p

COLLINET J. (1988). Comportements hydrodynamiques et érosifs des sols de l'Afrique de l'Ouest : évolution des matériaux et des organisations sous simulation de pluies. Thèse de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg, 513 p.

C.P.C.S. (1967). Classification des sols. Edition 1967. Travaux de la commission de Pédologie et Cartographie des sols, Multigr : 92 p

DABIN B., MAIGNIEN R. (1979). Les principaux sols d'Afrique de l'ouest et leurs potentialités agricoles. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol*; vol. XVII, n°4 : 235-257 .

- DARS R. (1961). Les formations sédimentaires et les dolérites du Soudan Occidental .
Mémoire du BRGM, N°, Paris :
- DE NONI G., VIENNOT M. (1996). La cartographie de l'érosion en Equateur : intérêt de
l'approche dans un programme de conservation des sols. Bulletin du Réseau Erosion,
n° 16, p 310-324
- DE R., SINGH S.P. (1981). Management practices for intercropping . In Proceedings of the
international workshop on intercropping ,10-13 jan 1979, Hyderabad, India. ICRISAT,
Patancheru : p17-24
- DESMET P.J.J., GOVERS G. (1995). GIS-based simulation of erosion and deposition
patterns in an agricultural landscape : a comparaison of models results with soil map
information. Catena 25, p 389-401.
- DIALLO D. (1995). Hydrodynamique et érosion hydriques des sols en zone de savane
humide (Bassin versant de Djitiko, Mali). Mémoire D.E.S., Université des Sciences et
Techniques du Languedoc, Montpellier : 82 p
- DIALLO D., KEITA D. (1995). Un système paysan de classement des sols de la
zone agroécologique du Djitoumou (Mali). *Cah. Agri*; 4, p 371-5.
- DIALLO D., ROOSE E., BARTHES B., KHAMSOUK B., ASSELINE J. (1998a). Recherche
d'indicateurs d'érodibilité des sols dans le bassin versant de Djitiko (Haut Bassin du
Niger au Sud Mali). Bull. Réseau Erosion 18, p 336-347
- DIALLO D., KEITA D., KONE M. (1998 b). Approche de recherche sur les classifications
paysannes des sols. *Rév. Malienne de Sc. Et Tech.* n° 4, p 54-63
- DIALLO D., ROOSE E., BARTHES B. (1999). Comparaison de tests d'érodibilité des sol en
laboratoire et de mesure sur parcelles d'érosion dans le bassin versant de Djitiko (zone
soudanienne du Mali-sud). Bul.19 du Réseau Erosion :168 -175

- DIALLO D., ORANGE D., ROOSE E., MOREL A. (2000). Potentiel de production de sédiments dans le bassin versant de Djitiko (zone soudanienne du Mali-sud). Bulletin Réseau Erosion , sous presse.
- DNGM., ORSTOM., CNRS. (1986). Cuirasses latéritiques et minéralisation aurifères de la région de Kangaba au Mali: cartographie, pétrographie, minéralogie, géochimie et télédétection. Rapport de première phase. Strasbourg-Bamako : 131 p + annexes
- DNHE. (1992). Synthèse hydrogéologique du Mali. Rapport DNHE: p40
- DROUX J.P. (1999). Hydrologie et flux de matières solides particulières et dissoutes sur petits bassins versants du bassin du fleuve Niger au Mali (bassins versants du Dounfing, de Djitiko et de Bélékoni). Thèse de Doctorat de l'Université Louis Pasteur - Strasbourg 1 : 304 p
- DROUX J.P., IETTON M., OLIVRY J.C. (1997). Transports de matières en suspension sur petits bassins versants au Mali : influence des surfaces cultivées . In : Human Impact on Erosion and Sédimentation (Proceedings of Rabat Symposium S6, April, 1997), IAHS Publ. n° 245, p 57-64
- DUBREUIL (1972). Recueil des données de base des bassins représentatifs et expérimentaux. Années 1951- 1969. Editions ORSTOM, Paris : 915 p
- DUCHAUFOR P. (1997). Abrégé de Pédologie, 5è édition, Masson : 291 p
- DUPRE G. (1991). Savoirs paysans et développement. Edit.Karthala,ORSTOM, Paris : 600 p
- ESTEVE M. et RAJOT J.L. (1999). Un exemple de cartographie de l'aptitude au ruissellement en région sahélienne : Sama Dey, Niger. Journal des sciences hydrologiques, 44 (2), p 297-311.

- FANE N; BA L; DERLON J.P (1999). Evolution des stratégies d'intervention LAE en fonction des attentes paysannes en zone cotonnière au Mali Sud. Bull. n°19 du Réseau Erosion : 235 - 247
- FEIZOURE C.T., CENSIER C., LANG J., OLIVRY C. (1995). Evolution interannuelle de la dynamique sédimentaire d'une barre sableuse d'un fleuve de régime tropical humide : le site de Pama sur l'Oubangui (RCA). In Jean-Claude Olivry et Jacques Boulègue. Grands Bassins Fluviaux Périatlantiques : Congo, Niger, Amazone;. Actes du colloque PEGI, INSU-CNRS-ORSTOM, Paris, France, du 22 au 24 novembre :171-197.
- FELLER C. (1977). Evolution des sols de défriche dans la région des Terres neuves (Sénégal oriental. II. Aspects biologiques et caractéristiques de la matière organique. Cah ORSTOM, sér pédol 15, p 291-301
- FELLER C., LAVELLE P; ALBRECHT A., NICOLARDOT B. (1993). La jachère et le fonctionnement des sols tropicaux : rôle de l'activité biologique et des matières organiques. Quelques éléments de réflexion. Editions ORSTOM, Collection Colloques et Séminaires, Paris , p 16-32.
- GAC J.Y. (1980). Geochemistry of tropical landscape on granitic rock : the lake Chad basin . In : Proc. III Symposium on Water Rock Interaction (Edmonton, Canada, juillet 1980), tome 1, 8-10.
- 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, p 431- 436.
- GALLAIRE R. (1995). Données sur les transports du Niger moyen entre Kandadji et Niamey. . In Jean-Claude Olivry et Jacques Boulègue. Grands Bassins Fluviaux Périatlantiques : Congo, Niger, Amazone ; . Actes du colloque PEGI, INSU-CNRS-ORSTOM, Paris, France, du 22 au 24 novembre : 317-332

- GUILLOBEZ S., LOMPO F., DE NONI G. (1998). Le suivi de l'érosion au Burkina Faso. Utilisation d'un modèle cartographique. Bulletin, Réseau Erosion, p 450-459
- GIRAUDY F. (1995). Annuaire statistique 94/95. Résultats de l'enquête agricole permanente. CMDT, Bamako
- GOURCY L. (1994). Fonctionnement hydrogéochimique de la cuvette lacustre du fleuve Niger (Mali) : Bilans et suivi des flux hydriques, particuliers et dissous et des flux de méthane. Thèse de doctorat, Université Paris-Sud : 271 p
- HENIN S. (1976). Cours de physique du sol, vol. 1 ORSTOM , Paris : 159p
- HUBERT P., CARBONEL J.P. (1993). Approche statistique de l'aridification de l'Afrique de l'Ouest. Journal of Hydrology, vol.95, p 165-183.
- HUDSON N. W. (1996). Mesures de terrain de l'érosion et de l'écoulement des eaux de surface. Bulletin pédologique de la FAO : 153 p
- HUDSON N. W. 1983 Soil conservation. Batsford. 324 p
- JOIGNEREZ A., GUIGUEN N. (1992) : Evaluation des ressources en eau non pérennes du Mali. ORSTOM-PNUD-DNHE, Bamako, 3 vol., 354 p
- KEITA I. (1997). Analyse des perceptions paysannes de la dégradation des sols et de la gestion de la fertilité et de la biomasse. Mémoire de fin d'étude d'ingénieur, IPR/IFRA de Katibougou : 45 p
- KEMPER W.D., ROSENAU R.C. (1986). Aggregate stability and size distribution. In : Klute (Ed.) Methods of soil analysis , part 1. Agronomy Monograph n°9, ASA-SSSA, Madison, WI.

- KILLIAN J. (1974). Etude du milieu physique en vue de son aménagement- conceptions de travail- méthodes cartographiques. *L'Agron. Trop.*, vol 29 (2-3), p 141-153
- LAFFORGUE A. (1977). Inventaire et examen des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration sur parcelles. *Cahiers ORSTOM, série Hydrologie*, vol XIV, 4 . p. 229-344.
- LAFFORGUE A., CASENAVE A. (1980). Derniers résultats obtenus en zone tropicale sur les modalités de transfert pluie-débit par l'emploi de simulateurs de pluie. *La houille Blanche*, n° 4-5, p 243-249.
- LAMACHERE J.M. (1991). Aptitude au ruissellement et à l'infiltration d'un sol sableux fin après sarclage. In "Soil Water Balance in the Sudano-Sahelian Zone", *Proceedings of the Niamey Workshop*, February, IAHS Publ. n°199, p. 109-119.
- LAMACHERE J.M. (1995). Variabilité spatio-temporelle des états de surface en zones sahéenne et soudanienne (Burkina Faso) : effets sur le ruissellement et sa modélisation. *Journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier*, 13-14 septembre 1994.
- LAMACHERE J.M., PUECH C. (1995). Cartographie des états de surface par télédétection et prédétermination des crues des petits bassins versants en zones sahéenne et tropicale sèche. In *L'hydrologie tropicale : géoscience et outil pour le développement (Actes de conférence à la mémoire de Jean Rodier , 2- 4 mai 1995 à Paris)*. IAHS Publ. n° 238, p 235 -248
- LAMACHERE J.M., PUECH C. (1995). Télédétection et régionalisation de l'aptitude au ruissellement et à l'infiltration des sols en Afrique sahéenne et nord-soudanienne. In *Régionalisation en Hydrologie. Application au développement (Huitièmes journées hydrologiques de l'ORSTOM)*, Editions ORSTOM, Collection Colloques et Séminaires, Paris , p 205-228.
- LARAQUE J.P., BRIQUET J.P., OLIVRY J.C. BERTHELOT M. (1995). Transports solides et dissous du fleuve Congo (Bilan de six années d'observation). In Jean-Claude Olivry

et Jacques Boulègue. Grands Bassins Fluviaux Périatlantiques : Congo, Niger, Amazone ; . Actes du colloque PEGI, INSU-CNRS-ORSTOM, Paris, France, du 22 au 24 novembre : 133-145.

LAWAS C.M., LUNING H.A. (1996). Farmers' knowledge and GIS. Indigenous knowledge and Development Monitor. Vol 4-1 : 8-11 p

LE BORGNE. (1987). La dégradation actuelle du climat en Afrique, entre Sahara et Equateur. In : La dégradation des Paysages en Afrique de l'Ouest, p 17-36.

LE BISSONNAIS Y. (1988). Analyse des mécanismes de désagrégation et de la mobilisation des particules de terre sous l'action des pluies.. Thèse de doctorat de l'Université d'Orléans : 221 p

LE BISSONNAIS Y. et LE SOUDER C. (1995). Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. Etude et Gestion des sols 2 (1) : 43-56

LEVI STRAUSS C. (1992). La pensée sauvage. Paris, plon : 380 p

LOZET J., MATHIEU C. (1986). Dictionnaire de Science du sol. Technique et Documentation. Lavoisier, Paris : 269 p

MIETTON M. (1998). Dynamique de l'interface lithosphère-atmosphère au Burkina Faso. L'érosion en zone de savane. Thèse de doctorat d'Etat, Université de Grenoble 1, EDITEC, Caen, 511 p + annexes.

MICHEL P. (1973) . Etude géomorphologique des bassins des fleuves Sénégal et Gambie, tome 2. Editions ORSTOM, Paris : 715 p

MICHEL P. (1978). Cuirasses bauxitiques et ferrugineuses d'Afrique Occidentale - Aperçu chronologique. Travaux et documents de géographie tropicale n°33 :12-32.

- MICHEL JP., FAIRBRIGE (1992). Dictionnaire des Sciences de la Terre, 2^e édition, Masson, Paris, 299 p
- MOLINIER P. (1969). Etude hydrologique des bassins versants du Djitiko et du Barraro. Rapport définitif, ORSTOM : 61 p.
- MOREAU R., NZILA J D., NYETE B. (1986) La pratique de l'écobuage *maala* et ses conséquences sur l'état du sol au Congo : 8p Communication au 16^e congrès international de la science du sol
- MOREL A. (2000). Erosion et aménagement dans les régions de montagne au nord et au sud du Sahara : étude comparée. Bulletin n° 19 du Réseau Erosion : 26-36.
- MOREL A., MAILLO L. (1997). Les phénomènes érosifs en montagne, de part et d'autre de la Méditerranée : perception, recherches, applications. Montagnes Méditerranéennes, n°5, p 9-13
- NEARING M.A., GOVERS G., NORTON D.L. (1999). Soil Sci. Soc. Am. J. 1829- 1835
- NGAMINE J., ALTOLNA M (1998). Flux de biomasse et gestion de la fertilité. Etude de cas dans trois terroirs agropastoraux du sud du Tchad. *In* Actes de l'atelier : Les flux de biomasse et la gestion de la fertilité à l'échelle des terroirs, 5-6 mai 1998; Montpellier, France, p 13- 25
- NOUVELOT J.F. (1972). Le régime des transports solides dans divers cours d'eau du Cameroun de 1969 à 1971. Cah . ORSTOM, sér. Hydrol. IX (1), 19-45.
- NOUVELOT J.F. (1993). Guide des pratiques hydrologiques sur les petits bassins versants ruraux en Afrique tropicale et équatoriale. CIEH-ORSTOM : 539 p.
- NZILA J.D., NYETE B. (1986). Pratiques culturelles paysannes au congo : influence de l'écobuage sur l'évolution de la fertilité des sols de la vallée du Niari. Communication au 16^e congrès international de la science du sol

- OLIVRY J.C. (1977). Transports solides au Cameroun. In : Erosion and Mater Transport in Inland Waters (Actes du Colloque de Paris, juillet 1977), 134 -131
- OLIVRY J.C., Briquet JP., Bamba F. , Diarra M. (1995a). Le régime hydrologique du Niger supérieur et le déficit des deux dernières décennies. In Jean-Claude Olivry et Jacques Boulègue. Grands Bassins Fluviaux Périatlantiques : Congo, Niger, Amazone ; . Actes du colloque PEGI, INSU-CNRS-ORSTOM, Paris, France, du 22 au 24 novembre : 251- 266
- OLIVRY J.C., GOURCY L., TOURE M. (1995b). Premiers résultats sur la mesure des flux de matières dissoutes et particulaires dans les apports du Niger au Sahel. In Jean-Claude Olivry et Jacques Boulègue. Grands Bassins Fluviaux Périatlantiques : Congo, Niger, Amazone;. Actes du colloque PEGI, INSU-CNRS-ORSTOM, Paris, France, du 22 au 24 novembre : 281- 292
- ORANGE D., OLIVRY J.C., CENSIER C. (1995). Variations et bilans des flux de matières particulaires et dissoutes de l'Oubangui à Bangui. In Jean-Claude Olivry et Jacques Boulègue. Grands Bassins Fluviaux Périatlantiques : Congo, Niger, Amazone;. Actes du colloque PEGI, INSU-CNRS-ORSTOM, Paris, France, du 22 au 24 novembre : 147-158
- PIERI C. (1989). Fertilité des terres de savane. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricole au sud du Sahara. Paris : Ministère de la coopération et CIRAD-IRAT, 444 p.
- PICOUET C. (1999). Géodynamique d'un hydrosystème tropical peu antropisé. Le bassin supérieur du Niger et son delta intérieur. Thèse de doctorat de l'Université Montpellier II, Sciences et Techniques du Languedoc : 350 p + annexes (70 p).
- PIRT. (1983). Les ressources terrestres au Mali. Vol II. Rapport technique. New York, Tippetts-Abbet- Mc Carthy-Stratton.

- POURRUT P., DUBEE G. (1962). Etude hydrologique des bassins versants expérimentaux de Kangaba. Rapport de la campagne 1960, ORSTOM : 61 p.
- PUECH C. (1993) Détermination des états de surface par télédétection pour caractériser les écoulements des petits bassins versants. Application à des bassins en zone méditerranéenne et en zone tropicale sèche. thèse de doctorat de l'Université Joseph Fournier- Grenoble
- RUELLAN A., DOSSO. (1993). Regards sur le sol. Editions Foucher, Paris : 192 p.
- ROOSE E. (1977). Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest. Vingt ans de mesure en petites parcelles expérimentales. Editions ORSTOM, Paris : 107p.
- ROOSE E. (1981). Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale. Etude expérimentale des transferts hydrologiques et biologiques de matières sous végétations naturelles ou cultivées. Thèse de doctorat es. Sc. de l'Université d'Orléans, Travaux et Documents de l'ORSTOM, Paris : 567p.
- ROOSE E., PIO J. (1984). Runoff, erosion and soil fertility restauration in the Mossi Plateau Procceding of Harare Symposium, AISH publication n° 144 : 485-498.
- ROOSE E. (1987). Gestion conservatoire des eaux et de la fertilité des sols dans les paysages soudano-sahéliens de l'Afrique occidentale *in soil, crop and water management in sudano-sahelian zon Niamey, 11-16 January*. Patancheru, Andhra Pradesh : ICRISAT, 1987, p 55-72 .
- ROOSE E. (1993). Capacité des jachères à restaurer la fertilité des sols pauvres en zone soudano-sahélienne d'Afrique Occidentale. Editions ORSTOM, Collection Colloques et Séminaires, Paris, p 233-244
- ROOSE E. (1994). Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Bulletin Pédologique de la FAO, N° 70 : 420 p.

- ROOSE E., DE NONI, G. (1998). Apport de la recherche à la lutte antiérosive. Bilan mitigé et nouvelle approche. *Etude et gestion des sols*, 5,3, P 181-194
- ROOSE E., BARTHES B. (2000). Organic matter management for soil conservation and productivity restoration in Africa : a contribution from Francophone research. accepté par *Nutrient lyching in Agrosystems*, 28 p
- SEBILLOTTE M. (1993). La jachère. Eléments pour une théorie. Editions ORSTOM, Collection Colloques et Séminaires, Paris , p 89-111
- SIVAKUMAR M.V.K. (1989). Agroclimatic aspects of rainfed Agriculture in the Sudano-Sahelian Zone. *Proceedings of an international workshop : Soil, crop, and water management systems for rainfed agriculture in the Sudano-Sahelian Zone* (11-16 janvier 1987), ICRISAT Sahelian Center Niamey, Niger , p 17-38
- SNELDER et BRYAN (1995). The use of rainfall simulation tests to assess the influence of vegetation density on soil loss on degraded rangelands in the Baringo District, Kenya. *Catena* 25, p 105-116
- STARR G.C., LAL R., MALONE R., HOTHEM D., OWENS L. KIMBLE J. (2000). Modeling soil carbon transported by water erosion process. *Land Degrad. Develop.* II: 83-91
- STOOP W.A (1981). Cereal-based intercropping systems for the West African semi-arid tropics. In *Proceedings of the international workshop on intercropping*, 10-13 jan 1979, Hyderabad, India. ICRISAT, Patancheru : p 61-68
- TRAORE K. (2000). Le parc à karité (*Vitellaria paradoxa* -Gaertner f.) et fertilité des sols de la zone Mali-sud. DEA National de Sciences du Sol, Université Henry Poincare, Nancy : 20 p

- TRAORE N. (1979). Le développement rural. L'expérience du Mali Série "Causeries débats du Centre Djoliba, Bamako :77 p
- TRICART J. (1974). De la géomorphologie à l'étude écographique intégrée. L'Agron. Trop., vol 29 (2-3) : 122-132.
- TRICART J., KILLIAN J. (1979). L'Eco-Géographie . Hérodote, Paris :325 p
- TONDA S J-B., BERTRAND R., MOLLET J-M., PAPY F. (1995). Dégradation des sols en Agriculture minière au Burkina Faso. Cahiers Agricultures, vol 4, n°5 : 363- 9
- VALET S., SARR P.S. (1998). Le report hydrique comme principal critère de prédiction du rendement en zone soudanienne. Bulletin Réseau Erosion n° 18 , p 174-196
- VIRMANI S.M., REDDY S.J., BOSE M.N.S. (1980) Manuel de climatologie pluviale de l'Afrique Occidentale: Données pour des stations sélectionnées. Andhra Pradesh : ICRISAT, 51 p.
- WARREN D..M. (1992). A preliminary analysis of indigenous soil classification and management systems in four ecozones of Nigeria. IITA, ARCIK, Ibadan, Nigeria, 28p
- WARREN D..M.(1993). Indigenous knowledge and suitable agriculture and rural development in Africa: Policy issues and strategies for the twenty-first century. Annual meeting of the African Studies Association. Boston, 9p + annexes
- WISCHMEIER W.H and SMITH D.D (1978). Predicting rainfall erosion losses- A guide to conservation planning. USDA, Agriculture handbook n° 537 : 58 p
- YAYOCK J.Y (1981). Crops and cropping patterns of the savanna region of Nigeria : the Kaduna situation. In Proceedings of the international workshop on intercropping, 10-13 jan 1979, Hyderabad, India. ICRISAT, Patancheru : p 69- 77
- ZANARDI C. 2000 . Etude geomorphologique du bassin versant de Djitiko. Mémoire de maîtrise, IGA, UJF: 81 p

–

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Situation géographique du bassin versant de Djitiko	
Figure 1.2 : Les zones bioclimatiques de l'Afrique Occidentale	10
Figure 1.3 : Précipitations mensuelles à Kangaba	12
Figure 1.4 : Localisation des coupes géologiques interprétés	15
Figure 1.5: Carte des affleurements dans le bassin versant de Djitiko	18
Figure 1.6 : Carte géomorphologique du bassin versant de Djitiko	22
Figure 2.1 : Schéma des profils pédologiques du bassin versant de Djitiko	39
Figure 2.2 : Carte morphopédologique du bassin versant de Djitiko	53
Figure 2.3: Toposéquences caractéristiques du bassin versant de Djitiko	54
Figure 3.1 : Hydrographie et équipement hydrométrique du bassin versant de Djitiko	72
Figure 3.2: Localisation des parcelles expérimentales dans le bassin versant	74
Figure 3.3 : Schéma d'une parcelle d'érosion	75
Figure 3.4 :Pluies mensuelles de Djitiko et Kangaba	80
Figure 3.5: Relation entre hauteur de pluie individuelle et R_{USA}	81
Figure 3.6 : Ruissellement sous jachère dans le bassin versant de Djitiko (valeurs moyennes des campagnes 1998 et 1999)	84
Figure 3.7 : Ruissellement sur parcelle nue dans le bassin versant de Djitiko (valeurs moyennes des campagnes 1998 et 1999)	84
Figure 3.8: Ruissellement sous culture sur sol brun vertique (valeurs moyennes des campagnes 1998 et 1999)	85
Figure 3.9: Ruissellement sous culture sur sol ferrugineux rouge (valeurs moyennes des campagnes 1998 et 1999)	85
Figure 3.10: Erosion sous jachère et sur parcelle nue (moyennes des valeurs mesurées en 1998 et 1999)	86
Figure 3.11 : Erosion sur sol ferrugineux rouge en fonction de	88

l'occupation (moyenne des valeurs mesurées sur parcelle de 100 m², campagnes 1998 et 1999).

Figure 3.12 : Evolution de la teneur en carbone soluble des eaux de ruissellement au cours de la saison des pluies 1998 (cas de la jachère sur sol ferrugineux)	90
Figure 3.13 : Pertes de carbone et d'azote sur sol brun et sol ferrugineux rouge (mesures de la campagne 1998)	101
Figure 4.1 : Ruissellement mesurée en milieu réel et au laboratoire	122
Figure 5.1 : Carte des zones homogènes de production de sédiment	130

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Revue des définitions des zones climatiques sahéliennes et soudaniennes	9
Tableau 1.2 : Pluviométrie annuelle dans le bassin versant de Djitiko	12
Tableau 1.3 : Analyse fréquentielle des précipitations annuelles aux stations de Bamako et Kangaba	12
Tableau 1.4 : Paramètres climatiques à la station de Bamako	13
Tableau 1.5 : Caractéristiques lithologiques des formations géologiques de la zone soudanienne du Mali	14
Tableau 1.6 :Géochimie et minéralogie des formations superficielles de la région de Kangaba	17
Tableau 1.7 : Coefficient d'écoulement du bassin versant de Djitiko	24
Tableau 1.9 Flux spécifiques de matières sur le bassin versant de Djitiko	24
Tableau 1.9 Flux spécifiques de matières dans le bassin du Niger	24
2.1	
Tableau 2.1 : Les unités typologiques de sol (UTS) du bassin versant de Djitiko	33
Tableau 2.2 : Caractéristiques granulométriques de la couche superficielle (0-10 cm) du sol brun vertique du bassin versant de Djitiko	39
Tableau 2.3 : Caractéristiques granulométriques de la couche superficielle (0-10 cm) du sol gravillonnaire du bassin versant de Djitiko	40
Tableau 2.4 : Distribution des surfaces élémentaires sous jachère en fonction du type de sol, en début de saison	54
Tableau 2.5 : Dynamique de recouvrement des sols sous jachère pendant la saison Pluvieuse	56
Tableau 2.6 : Dynamique de recouvrement des sols sur parcelles de culture pendant la saison pluvieuse	56
Tableau 2.7 : Comparaison des dynamiques de recouvrement du sol sous jachère et en milieu cultivé	57
Tableau 2.8 : Dynamique des surfaces ouvertes du sol sous jachère pendant la saison pluvieuse	58

Tableau 2.9 : Dynamique des surfaces ouvertes du sol en milieu cultivé pendant la saison pluvieuse	58
Tableau 2.10 : Comparaison des dynamiques des surfaces ouvertes du sol sous jachère et en milieu cultivé	58
Tableau 3.1: Hydrographie et équipement hydrométrique du bassin versant de Djitiko	72
Tableau 3.2 : Caractéristiques des parcelles d'érosion	75
Tableau 3.2: Hauteur de pluie individuelle (H) et l'agressivité pluviale (R_{USA})	80
Tableau 3.3 : Valeurs moyennes de R_{USA} pour quelques classes de pluies individuelle	81
Tableau 3.4 : Indice d'agressivité pluviale (R_{USA}) calculé pour le bassin versant de Djitiko	81
Tableau 3.5 : Caractéristiques du ruissellement sur le bassin versant de Djitiko (résultats des mesures des campagnes 1998 et 1999)	82
Tableau 3.6 : Taux de matières en suspension (MES) dans les pertes en terre sur parcelles expérimentales (moyennes des campagnes 1998 et 1999)	86
Tableau 3.7 : Pertes en terre sur parcelles cultivées (campagnes 1998 et 1999)	87
Tableau 3.8 : Comparaison des pertes en terre mesurées sur parcelles cultivées et jachère (moyenne des campagnes 1998 et 1999)	88
Tableau 3.9: Qualité des eaux de ruissellement du bassin versant de Djitiko (valeurs moyennes des mesures faites pendant la campagne 1998)	90
Tableau 3.10 : Teneurs des sédiments en carbone et azote (valeurs moyennes de la campagne 1998)	91
Tableau 3.11 : Teneurs des sédiments en bases échangeables et phosphore assimilable (campagne 1998)	92
Tableau 3.11 : Pertes de carbone et d'azote par ruissellement et érosion (mesures de la campagne 1998)	93
Tableau 3.13 : Pertes de bases échangeables et phosphore assimilable ruissellement et érosion (mesures de la campagne 1998)	94
Tableau 4.1 : Origine des échantillons prélevés en 1997 pour les études de comportement en laboratoire	104

ANNEXES

ANNEXE I

Résultats d'analyses géochimiques et minéralogiques des formations superficielles dans la région de Kangaba (d'après, DNGM, ORSTOM et CNRS, 1998)

Tableau I-1 : Teneurs géochimiques et minéralogiques des cuirasses

Eléments	Moyenne	Valeur minimale	Valeur maximale	Nombre d'échantillon
SiO ₂	33,0	10,70	81,80	484
Al ₂ O ₃	19,02	7,80	31,40	484
Fe ₂ O ₃	43,90	1,30	70,50	484
TiO ₂	0,89	0,37	1,77	484
MgO	0,20	0,20	0,40	484
K ₂ O	0,37	0,20	1,80	484
MnO	0,03	0,01	2,11	484
quartz	11,98	0,00	72,50	484
gibbsite	1,74	0,00	28,53	484
kaolinite	45,27	19,75	68,61	484
goethite	14,67	0,00	50,32	484
hématite	30,69	0,00	53,67	484

Tableau I-2 : Teneurs géochimiques et minéralogiques des sols gravillonnaires

Elements	Moyenne	Valeur minimale	Valeur maximale	Nombre d'échantillon
SiO ₂	58,76	19,80	86,30	288
Al ₂ O ₃	17,01	6,00	26,50	288
Fe ₂ O ₃	18,74	1,00	59,80	288
TiO ₂	1,34	0,57	1,79	288
MgO	0,23	0,20	0,40	288
K ₂ O	0,38	0,20	1,50	288
MnO	0,02	0,01	0,58	288
quartz	37,74	0,00	79,24	288
gibbsite	0,02	0,00	3,18	288
kaolinite	43,04	15,19	67,09	288
goethite	7,67	0,63	30,93	288
hématite	11,84	0,07	41,65	288

Tableau I-3 : Teneurs géochimiques et minéralogiques des sols de flats

Eléments	Moyenne	Valeur minimale	Valeur maximale	Nombre d'échantillon
SiO ₂	75,01	18,30	85,60	245
Al ₂ O ₃	13,32	6,90	21,90	245
Fe ₂ O ₃	4,40	1,00	55,20	245
TiO ₂	1,50	0,64	1,81	245
MgO	0,20	0,20	0,30	245
K ₂ O	0,25	0,20	0,30	245
MnO	0,02	0,01	0,77	245
quartz	59,39	1,00	76,98	245
gibbsite	0,07	0,00	9,56	245
kaolinite	33,60	17,47	55,44	245
goethite	2,43	0,00	20,27	245
hématite	2,21	0,00	41,54	245

Annexe II-1: Méthodes d'analyses des sols au laboratoire

1 Granulométrie : Méthode par sédimentation à la pipette sur granulomètre automatique Texsol (selon la norme NF X31-107)

- Destruction de la matière organique avec de l'eau oxygénée.
- Mise en suspension à l'aide d'un mélange hexamétaphosphate de sodium et de bicarbonate de sodium.
- Prélèvement des fractions fines ($<2\mu$, $2-20\mu$ et $20-50\mu$) à la pipette.
- Obtention des sables par tamisages humide après élimination des fractions fines.

pH: Le pH eau est mesuré dans un rapport sol/eau de 1/2,5 après 2h30 de contact. Le pH KCl est mesuré dans un rapport sol/solution KCl 1,0N de 1/2,5 après 2h30 de contact.

2 Carbone organique : Dosage du carbone total par combustion sur analyseur élémentaire THERMOQUEST CN 2100.

- Mesure par chromatographie gaz
- Calcul de la matière organique en multipliant le carbone par un facteur de 1,724

3 Azote total : (Méthode DUMAS)

- Détermination par combustion sur analyseur élémentaire THERMOQUEST CN 2100.
- Mesure par chromatographie gaz.

4 Complexe d'échange : Méthode au chlorure de cobaltihexamine

- Echange dans un rapport sol/solution de 1/20 pendant 2h
- Mesure du pH sur une aliquote non filtrée
- Dosage des différents éléments par ICP Varian (Vista)
- CEC obtenue par différence entre le cobalt apporté et le cobalt restant en solution
- H est calculé par rapport au pH de l'extrait.

5 Complexe d'échange : Méthode à l'acétate d'ammonium 1,0N à pH 7,00 par percolation

- Dosage des bases échangeables Ca, Mg, K et Na par ICP-AES sur appareil simultané JY 50 (JOBIN-YVON)
- Après élimination de l'excès d'ammonium par l'alcool éthylique absolu, déplacement de l'ammonium par une solution de chlorure de sodium 1,0 M et dosage de l'ammonium par colorimétrie sur auto analyseur Technicon.

6 Phosphore assimilable : Méthode Olsen modifiée Dabin

- Extraction dans un rapport sol/solution de bicarbonate de sodium 0,5 N de 1/50 pendant 1 heure.

- Dosage du phosphore par méthode colorimétrique au bleu de molybdène sur analyseur automatique. Intégral plus de Alliance Instruments à 800 nm

ANNEXE II-2

Résultats d'analyses classiques des sols au laboratoire

II-2-1. UTS1 : Sol caillouteux

Résultats d'analyse du profil représentatif

Horizons	0-10	10-20
Humidité		
pF2,5 (%)	25,6	29,7
pF3,0(%)	19,7	22,9
pF4,2(%)	12,5	16
Granulométrie (%)		
Argile	19,7	28,4
Limon fin	9,5	12,1
Limon grossier	21,4	20
Sable fin	17,6	16,2
Sable grossier	31,8	23,3
Matière organique		
C (g g ⁻¹)	9,73	6,63
N (g g ⁻¹)	0,67	0,47
C/N	14,5	14,1
Phosphore Olsen-Dabin	9,39	8,17
Complexe absorbant		
Ca éch. meq./100	8,7	2,04
Mg " "	3	0,7
K " "	0,4	0,12
Na " "	0,2	0,02
Mn" "	0	0,02
Al " "	0	0,06
H " "	0	0
PH cobalt	6,1	5,66
S (Ca, Mg, K, Na) meq./100	12,4	2,88
CEC	14,3	13,8
S/CEC	86,4	86,7

II-2-2. UTS2 : Sol brun vertique

II-2-2.1. Résultats d'analyse du profil représentatif

	Horizons	0-28	28-40	40-90
Humidité				
pF2,5 (%)		47,5	30,7	33,7
pF3,0(%)		30,8	23,1	26,1
pF4,2(%)		23,8	36,1	18,9
Granulométrie				
Argile		26,1	23,5	29,8
Limon fin		31,7	15,9	15
Limon grossier		24,2	29,9	19,2
Sable fin		11,9	13,8	24,8
Sable grossier		6	16,9	11,3
Matière organique				
C (g g ⁻¹)		22,9	5,4	3,2
N (g g ⁻¹)		1,5	0,4	0,2
C/N		15,3	13,5	16,0
Phosphore Olsen-Dabin		9,7	4,6	11,8
Complexe absorbant				
Ca éch. meq./100		18,5	8,7	7,7
Mg " "		6,2	4,8	5,6
K " "		0,4	0,1	0,2
Na " "		0,0	0,0	0,1
Mn" "		0,0	0,0	0,0
Al " "		0,0	0,0	0,0
H " "		0,0	0,0	0,0
PH cobalt		6,0	6,3	6,0
S (Ca, Mg, K, Na) meq./100		25,1	13,6	13,5
CEC "		27,1	15,4	15,6
S/CEC		92,7	88,4	86,4

II-3.2. Résultats d'analyses d'échantillons moyens de surface (0-10cm)
prélevés dans une jachère d'au moins 20 ans

	Echantillon moyen n°1	Echantillon moyen n°2	Echantillon moyen n°3
Humidité			
pF2,5 (%)	22,7	19,2	24,2
pF3,0(%)	17,2	14,7	17,1
pF4,2(%)	11,2	10,0	12,8
Granulométrie	19,4	16,5	14,3
Argile	9,9	8	10,4
Limon fin	21,3	21,2	23,4
Limon grossier	18,6	19,6	22,2
Sable fin	30,7	34,6	29,8
Sable grossier			
Matière organique			
C (g g ⁻¹)			
N (g g ⁻¹)			
C/N			
Phosphore Olsen-Dabin	12,5	19,8	15,7
Complexe absorbant			
Ca éch. meq./100	5,1	4,04	4,6
Mg " "	2,1	1,65	1,6
K " "	0,2	0,34	0,4
Na " "	0,0	0,1	0,0
Mn" "	0,0	0,0	0,0
Al " "	0,0	0,0	0,0
H " "	0,0	0,0	0,0
PH cobalt	6,7	6,3	6,5
S (Ca, Mg, K, Na) meq./100	7,5	6,1	6,5
CEC "	8,1	6,9	7,4
S/CEC	92,2	88,6	87,6

II-4 UTS 5 : Sol Ferrugineux tropical lessivé rouge

II-4.1. Résultats d'analyse du profil représentatif

	Horizons	0-15	15-30	30-90	90-100
Humidité					
pF2,5 (%)		34	33,6	31,8	33
pF3,0 (%)		25,3	23,5	22,5	22,7
pF4,2 (%)		17,1	16,4	16,2	16,5
Granulométrie					
Argile		25,1	30,1	34,3	34
Limon fin		21,2	20,1	12,6	14,2
Limon grossier		37,8	36	33,3	28,3
Sable fin		13,6	11,7	14,7	20,5
Sable grossier		2,3	2,2	5,2	3
Matière organique					
C		11,5	6,5	3	2,6
N		0,7	0,4	0,2	0,2
C/N		16,4	16,3	15,0	13,0
Phosphore Olsen-Dabin		6,03	11,99	4,06	5,58
Complexe absorbant					
Ca éch. meq./100		6,9	5,2	4,1	4,1
Mg " "		3,8	3,2	2,7	2,8
K " "		0,1	0,1	0,1	0,1
Na " "		0	0,1	0	0,1
Mn" "		0,1	0,2	0,1	0,1
Al " "		0	0	0	0
H " "		0	0	0	0
PH cobalt					
S (Ca, Mg, K, Na) meq./100		10,8	8,5	6,9	7,1
CEC "		13,1	10,8	9	8,1
S/CEC %		82,4	79	76,2	87,3

II-4.2. Résultats d'analyses d'échantillons moyens de surface (0-10cm)
prélévés dans une jachère d'au moins 20 ans

	Echantillon moyen n°1	Echantillon moyen n°2	Echantillon moyen n°3
Humidité			
pF2,5 (%)	26,5	25,6	28,7
pF3,0(%)	20,9	20,1	22,1
pF4,2(%)	13,9	14,8	18,7
Granulométrie			
Argile	33,6	36,8	36,4
Limon fin	13	11,3	14,5
Limon grossier	27,1	23,3	22,4
Sable fin	16	15,2	14,9
Sable grossier	10,2	13,5	11,9
Matière organique			
C (g g ⁻¹)			
N (g g ⁻¹)			
C/N			
Phosphore Olsen-Dabin	21,8	7,7	6,1
Complexe absorbant			
Ca éch. meq./100	4,6	4,38	4,5
Mg " "	2,9	2,98	3,1
K " "	0,2	0,4	0,4
Na " "	0,0	0,0	0,0
Mn" "	0,0	0,0	0,0
Al " "	0,0	0,0	0,0
H " "	0,0	0,0	0,0
PH cobalt	5,7	5,7	5,5
S (Ca, Mg, K, Na) meq./100	7,8	7,8	8,0
CEC "	8,5	8,8	9,2
S/CEC	91,7	88,2	87,1

II-4.3. Résultats d'analyses d'échantillons moyens de surface (0-10cm)
prélévés sur parcelles cultivées par les paysans

	Echantillon moyen n°1	Echantillon moyen n°2	Echantillon moyen n°3
Humidité			
pF2,5 (%)	26,6	25,6	30,8
pF3,0(%)	18,6	17,4	22,5
pF4,2(%)	12,1	9,2	13,3
Granulométrie			
Argile	21,9	20,1	20,4
Limon fin	13,3	12,9	19,6
Limon grossier	36	38,9	34,7
Sable fin	20,6	19,5	22
Sable grossier	8,2	8,6	3,4
Matière organique			
C (g g ⁻¹)			
N (g g ⁻¹)			
C/N			
Phosphore Olsen-Dabin	7,6	6,2	7,3
Complexe absorbant			
Ca éch. meq./100	2,4	2,15	3,76
Mg " "	1,3	1,14	1,76
K " "	0,3	0,2	0,1
Na " "	0,0	0,0	0,0
Mn" "	0,1	0,1	0,2
Al " "	0,0	0,0	0,0
H " "	0,0	0,0	0,0
PH cobalt	5,0	5,0	5,0
S (Ca, Mg, K, Na) meq./100	4,0	3,5	5,8
CEC "	4,1	4,0	6,9
S/CEC	96,5	88,8	83,6

II-5 UTS 7 : Sol hydromorphe

Résultats d'analyse du profil représentatif

	Horizons	0-23	23-55	55-90
Humidité				
pF2,5 (%)		39,6	33,4	34,5
pF3,0 (%)		24,9	21,7	23,6
pF4,2 (%)		20,4	14,4	17,4
Granulométrie				
Argile		22,5	24,8	29,7
Limon fin		18,3	14,9	15,6
Limon grossier		39,3	33,7	26,3
Sable fin		15,8	22,0	23,2
Sable grossier		4,2	4,7	5,1
Matière organique				
C				
N				
C/N				
Phosphore Olsen-Dabin		8,54	5,88	4,79
Complexe absorbant				
Ca éch. meq./100		6,0	4,5	4,8
Mg " "		3,4	3,1	3,9
K " "		0,5	0,1	0,1
Na " "		0,0	0,0	0,1
Mn" "		0,3	0,2	0,1
Al " "		0,0	0,0	0,0
H " "		0,0	0,0	0,0
PH cobalt		5,6	4,8	4,9
S (Ca, Mg, K, Na) meq./100		10,0	7,7	8,9
CEC "		11,6	9,3	10,9
S/CEC %		86,0	82,7	82,1

II-4.2. Résultats d'analyses d'échantillons moyens de surface (0-10cm)
prélévés dans une jachère d'au moins 20 ans

	Echantillon moyen n°1	Echantillon moyen n°2	Echantillon moyen n°3
Humidité			
pF2,5 (%)	26,5	25,6	28,7
pF3,0(%)	20,9	20,1	22,1
pF4,2(%)	13,9	14,8	18,7
Granulométrie			
Argile	33,6	36,8	36,4
Limon fin	13	11,3	14,5
Limon grossier	27,1	23,3	22,4
Sable fin	16	15,2	14,9
Sable grossier	10,2	13,5	11,9
Matière organique			
C (g g ⁻¹)			
N (g g ⁻¹)			
C/N			
Phosphore Olsen-Dabin	21,8	7,7	6,1
Complexe absorbant			
Ca éch. meq./100	4,6	4,38	4,5
Mg " "	2,9	2,98	3,1
K " "	0,2	0,4	0,4
Na " "	0,0	0,0	0,0
Mn" "	0,0	0,0	0,0
Al " "	0,0	0,0	0,0
H " "	0,0	0,0	0,0
PH cobalt	5,7	5,7	5,5
S (Ca, Mg, K, Na) meq./100	7,8	7,8	8,0
CEC "	8,5	8,8	9,2
S/CEC	91,7	88,2	87,1

II-4.3. Résultats d'analyses d'échantillons moyens de surface (0-10cm)
prélevés sur parcelles cultivées par les paysans

	Echantillon moyen n°1	Echantillon moyen n°2	Echantillon moyen n°3
Humidité			
pF2,5 (%)	26,6	25,6	30,8
pF3,0(%)	18,6	17,4	22,5
pF4,2(%)	12,1	9,2	13,3
Granulométrie			
Argile	21,9	20,1	20,4
Limon fin	13,3	12,9	19,6
Limon grossier	36	38,9	34,7
Sable fin	20,6	19,5	22
Sable grossier	8,2	8,6	3,4
Matière organique			
C (g g ⁻¹)			
N (g g ⁻¹)			
C/N			
Phosphore Olsen-Dabin	7,6	6,2	7,3
Complexe absorbant			
Ca éch. meq./100	2,4	2,15	3,76
Mg "	1,3	1,14	1,76
K "	0,3	0,2	0,1
Na "	0,0	0,0	0,0
Mn"	0,1	0,1	0,2
Al "	0,0	0,0	0,0
H "	0,0	0,0	0,0
PH cobalt	5,0	5,0	5,0
S (Ca, Mg, K, Na) meq./100	4,0	3,5	5,8
CEC "	4,1	4,0	6,9
S/CEC	96,5	88,8	83,6

II-2-5 UTS 7 : Sol hydromorphe
Résultats d'analyse du profil représentatif

Horizons	0-23	23-55	55-90
Humidité			
pF2,5 (%)	39,6	33,4	34,5
pF3,0 (%)	24,9	21,7	23,6
pF4,2 (%)	20,4	14,4	17,4
Granulométrie			
Argile	22,5	24,8	29,7
Limon fin	18,3	14,9	15,6
Limon grossier	39,3	33,7	26,3
Sable fin	15,8	22,0	23,2
Sable grossier	4,2	4,7	5,1
Matière organique			
C			
N			
C/N			
Phosphore Olsen-Dabin	8,54	5,88	4,79
Complexe absorbant			
Ca éch. meq./100	6,0	4,5	4,8
Mg " "	3,4	3,1	3,9
K " "	0,5	0,1	0,1
Na " "	0,0	0,0	0,1
Mn " "	0,3	0,2	0,1
Al " "	0,0	0,0	0,0
H " "	0,0	0,0	0,0
PH cobalt	5,6	4,8	4,9
S (Ca, Mg, K, Na) meq./100	10,0	7,7	8,9
CEC "	11,6	9,3	10,9
S/CEC %	86,0	82,7	82,1

Annexe III-1 : quelques caractéristiques des pluies enregistrées sur le bassin versant de Djitiko(campagne 1999)

Date averse	hauteur totale mm	Durée mn	hauteur de même intensité mm	Intensité partielle mm.h ⁻¹	Energie unitaire par cm	Energie totale
13/06/1999	H =24,1	6	0,6	6	191	114,6
		12	1,0	5	184	184
		5	2,7	32	255	680
		4	4,0	60	280	1120
		3	1,5	29	251	363,95
		3	1,4	28	250	350
		13	1,3	6	191	248,3
		13	3,9	18	233	908,7
		13	7,8	36	260	2028
		72,0	24,1			5997,6
		9	1,4	9	206	278,1
		2	1,0	29	251	242,6
		2	1,3	40	264	352,0
14/06/1999	H = 28,5	5	7,1	85	289	2047,1
		5	5,8	69	285	1638,8
		6	3,2	32	255	816,0
		10	1,8	11	214	392,3
		20	2,7	8	202	538,7
		13	0,4	2	148	64,1
		20	2,7	8	202	538,7
		5	0,6	7	197	114,9
		7	0,4	3	163	57,1
		18	0,3	1	121	36,3
		122,0	28,5			7116,6
		3	0,2	3	163	24,5
		10	1,7	10	210	350,0
20/06/1999	H = 58,3	10	7,0	42	266	1862,0
		5	7,9	95	289	2287,9
		12	14,0	70	286	4004,0
		10	12,7	76	289	3660,7
		3	3,6	71	286	1015,3
		10	3,3	20	237	790,0
		8	1,3	10	210	280,0
		23	0,8	2	148	113,5
		20	4,0	12	217	868,0
		15	0,8	3	163	122,3
		5	0,2	2	148	24,7
		8	0,1	1	121	16,1
		16	0,5	2	148	78,9
		20	0,3	1	121	40,3
		178,0	58,3			15538,1
24/06/1999	H = 50,5	15	15,3	61	280	4270,0
		10	15,0	90	289	4335,0
		17	8,8	31	254	2231,0
		18	9,0	30	253	2277,0
		12	0,4	2	148	59,2
		12	0,2	1	121	24,2
		9	1,7	11	214	353,1
		12	0,2	1	121	24,2
		105,0	50,5			13573,7
Date averse	hauteur totale mm	Durée mn	hauteur de même intensité mm	Intensité partielle mm.h ⁻¹	Energie unitaire par cm	Energie totale
		6	4,2	42	266	1117,2
		5	9,6	115	289	2769,6

Annexes

		10	11,7	70	286	3336,7
		10	3,0	18	233	699,0
		115	9,6	5	184	1763,3
		10	1,3	8	202	269,3
		20	1,7	5	184	306,7
		5	0,7	8	202	134,7
		5	0,4	5	184	76,7
		3	0,5	9	206	92,7
		26	2,6	6	191	496,6
26/06/1999	H = 45,2	215,0	45,2			11062,4
Date averse	hauteur totale mm	Durée mn	hauteur de même intensité mm	Intensité partielle mm.h ⁻¹	Energie unitaire par cm	Energie totale
		12	22,0	110	289	6358,0
		10	13,5	81	289	3901,5
		10	6,5	39	263	1709,5
		14	7,2	31	254	1837,3
		12	2,4	12	217	520,8
		12	1,6	8	202	323,2
		10	1,5	9	206	309,0
		8	2,7	20	237	632,0
		7	2,1	18	233	489,3
		8	2,3	17	231	523,6
		5	0,7	8	202	134,7
		16	2,4	9	206	494,4
		17	2,8	10	210	595,0
		15	0,5	2	148	74,0
29/06/1999	H = 68,2	156,0	68,2			17902,2
		4	0,1	2	148	19,7
		8	1,6	12	217	347,2
		6	0,1	1	121	12,1
		7	0,6	5	184	107,3
		8	1,2	9	206	247,2
		12	3,4	17	231	785,4
		3	1,2	24	244	292,8
		12	1,6	8	202	323,2
		9	0,5	3	163	73,4
		11	1,8	10	210	385,0
		3	0,4	8	202	80,8
		8	0,4	3	163	65,2
		7	1,4	12	217	303,8
		5	0,6	7	197	114,9
		7	1,8	15	226	395,5
		3	4,5	90	289	1300,5
		6	2,4	24	244	585,6
		5	1,6	19	235	372,1
		7	0,5	4	175	81,7
		7	0,1	1	121	14,1
01/08/1999	H = 25,7	138,0	25,7			5907,5
Date averse	hauteur totale mm	Durée mn	hauteur de même intensité mm	Intensité partielle mm.h ⁻¹	Energie unitaire par cm	Energie totale
		10	0,7	4	175	116,7
		12	0,4	2	148	59,2
		20	0,3	1	121	40,3
		40	1,3	2	148	197,3
		8	0,5	4	175	93,3
		5	0,7	8	802	534,7
		3	2,4	47	270	634,5
		2	1,0	30	253	253,0
		2	0,8	24	244	195,2
		8	0,8	6	191	152,8
		5	0,3	3	163	40,8
		20	1,0	3	163	163,0
		5	0,6	7	197	114,9
		10	0,7	4	175	116,7
		30	0,5	1	121	60,5
02/08/1999	H = 11,9	180,0	11,9			2772,9

Annexes

Date averse	hauteur totale mm	Durée mn	hauteur de même intensité mm	Intensité partielle mm.h ⁻¹	Energie unitaire par cm	Energie totale
		10	0,7	4	175	116,7
		10	2,2	13	220	476,7
		10	0,7	4	175	116,7
		10	0,8	5	184	153,3
		12	4,0	20	237	948,0
		5	4,0	48	271	1084,0
		11	0,2	1	121	22,2
		15	2,5	10	210	525,0
		5	1,0	12	217	217,0
		5	7,1	85	289	2047,1
		5	2,1	25	246	512,5
		5	4,8	58	278	1343,7
		5	3,9	47	270	1057,5
		20	21,0	63	267	5607,0
		25	0,4	1	121	50,4
11/08/1999	H = 55,4	153,0	55,4			14277,7

Date averse	hauteur totale mm	Durée mn	hauteur de même intensité mm	Intensité partielle mm.h ⁻¹	Energie unitaire par cm	Energie totale
		6	0,6	6	191	114,6
		12	1,0	5	184	184
		5	2,7	32	255	680
		4	4,0	60	280	1120
		3	1,5	29	251	363,95
		3	1,4	28	250	350
		13	1,3	6	191	248,3
		13	3,9	18	233	908,7
		13	7,8	36	260	2028
13/06/1999	H =24,1	72,0	24,1			5997,6
		9	1,4	9	206	278,1
		2	1,0	29	251	242,6
		2	1,3	40	264	352,0
		5	7,1	85	289	2047,1
		5	5,8	69	285	1638,8
		6	3,2	32	255	816,0
		10	1,8	11	214	392,3
		20	2,7	8	202	538,7
		13	0,4	2	148	64,1
		20	2,7	8	202	538,7
		5	0,6	7	197	114,9
		7	0,4	3	163	57,1
		18	0,3	1	121	36,3
14/06/1999	H = 28,5	122,0	28,5			7116,6
		3	0,2	3	163	24,5
		10	1,7	10	210	350,0
		10	7,0	42	266	1862,0
		5	7,9	95	289	2287,9
		12	14,0	70	286	4004,0
		10	12,7	76	289	3660,7
		3	3,6	71	286	1015,3
		10	3,3	20	237	790,0
		8	1,3	10	210	280,0
		23	0,8	2	148	113,5
		20	4,0	12	217	868,0
		15	0,8	3	163	122,3

Annexes

		5	0,2	2	148	24,7
		8	0,1	1	121	16,1
		16	0,5	2	148	78,9
		20	0,3	1	121	40,3
20/06/1999	H = 58,3	178,0	58,3			15538,1
		15	15,3	61	280	4270,0
		10	15,0	90	289	4335,0
		17	8,8	31	254	2231,0
		18	9,0	30	253	2277,0
		12	0,4	2	148	59,2
		12	0,2	1	121	24,2
		9	1,7	11	214	353,1
		12	0,2	1	121	24,2
24/06/1999	H = 50,5	105,0	50,5			13573,7
Date averse	hauteur totale mm	Durée mn	hauteur de même intensité mm	Intensité partielle mm.h ⁻¹	Energie unitaire par cm	Energie totale
		6	4,2	42	266	1117,2
		5	9,6	115	289	2769,6
		10	11,7	70	286	3336,7
		10	3,0	18	233	699,0
		115	9,6	5	184	1763,3
		10	1,3	8	202	269,3
		20	1,7	5	184	306,7
		5	0,7	8	202	134,7
		5	0,4	5	184	76,7
		3	0,5	9	206	92,7
		26	2,6	6	191	496,6
26/06/1999	H = 45,2	215,0	45,2			11062,4
		12	22,0	110	289	6358,0
		10	13,5	81	289	3901,5
		10	6,5	39	263	1709,5
		14	7,2	31	254	1837,3
		12	2,4	12	217	520,8
		12	1,6	8	202	323,2
		10	1,5	9	206	309,0
		8	2,7	20	237	632,0
		7	2,1	18	233	489,3
		8	2,3	17	231	523,6
		5	0,7	8	202	134,7
		16	2,4	9	206	494,4
		17	2,8	10	210	595,0
		15	0,5	2	148	74,0
29/06/1999	H = 68,2	156,0	68,2			17902,2
		4	0,1	2	148	19,7
		8	1,6	12	217	347,2
		6	0,1	1	121	12,1
		7	0,6	5	184	107,3
		8	1,2	9	206	247,2
		12	3,4	17	231	785,4
		3	1,2	24	244	292,8
		12	1,6	8	202	323,2
		9	0,5	3	163	73,4
		11	1,8	10	210	385,0
		3	0,4	8	202	80,8
		8	0,4	3	163	65,2
		7	1,4	12	217	303,8
		5	0,6	7	197	114,9
		7	1,8	15	226	395,5
		3	4,5	90	289	1300,5
		6	2,4	24	244	585,6
		5	1,6	19	235	372,1
		7	0,5	4	175	81,7
		7	0,1	1	121	14,1
01/08/1999	H = 25,7	138,0	25,7			5907,5

Annexes

Date averse	hauteur totale mm	Durée mn	hauteur de même intensité mm	Intensité partielle mm.h ⁻¹	Energie unitaire par cm	Energie totale
		10	0,7	4	175	116,7
		12	0,4	2	148	59,2
		20	0,3	1	121	40,3
		40	1,3	2	148	197,3
		8	0,5	4	175	93,3
		5	0,7	8	802	534,7
		3	2,4	47	270	634,5
		2	1,0	30	253	253,0
		2	0,8	24	244	195,2
		8	0,8	6	191	152,8
		5	0,3	3	163	40,8
		20	1,0	3	163	163,0
		5	0,6	7	197	114,9
		10	0,7	4	175	116,7
		30	0,5	1	121	60,5
02/08/1999	H = 11,9	180,0	11,9			2772,9
		10	0,7	4	175	116,7
		10	2,2	13	220	476,7
		10	0,7	4	175	116,7
		10	0,8	5	184	153,3
		12	4,0	20	237	948,0
		5	4,0	48	271	1084,0
		11	0,2	1	121	22,2
		15	2,5	10	210	525,0
		5	1,0	12	217	217,0
		5	7,1	85	289	2047,1
		5	2,1	25	246	512,5
		5	4,8	58	278	1343,7
		5	3,9	47	270	1057,5
		20	21,0	63	267	5607,0
		25	0,4	1	121	50,4
11/08/1999	H = 55,4	153,0	55,4			14277,7

ANNEXE III- 2 : Ruissellement et érosion mesurés sur parcelles expérimentales
dans le bassin versant
De Djitiko (1998 et 1999)

Tableau III-2.1 : Résultats des mesures faites au cours de la campagne 1998

Sols	Parcelles	N°	Occupation	Sup.	KRAM	KR max	E.Totale	S*100/E.T	Pi sec	Pi humide
				m2	%	%	t ha ⁻¹ an ⁻¹	%	mm	mm
Ferrugineux rouge	RN	1	Nue	100	48,7	95	30,0	11	7	9
"	RJ	3	Jachère	100	26,1	65	4,0	19	10,3	9,7
"	RL1000	4	Culture/labour	1000	32,2	95	3,2	31	<4,5	9,7
"	RL100	5	Culture/labour	100	40,1	88	15,8	12	<10	9,7
"	RM1000	6	Culture/travail minimum	1000	34,6	92	3,5	52		
"	RM100	7	Culture/travail minimum	100	26,3	67	2,7	27	10	11
Gravillonnaire	GN	8	Nue	100	40,7	84	4,4	48	10	14
"	GJ	9	Jachère	100	28,2	61	2,6	28	17	10
Brun vertique	BN	10	Nue	100	23,0	58	22,7	6	17	9
"	BJ	11	Jachère	100	16,4	50	2,4	34	17	10
"	BL1000	12	Culture/labour	1000	9,6	30	1,4	15	17	12
"	BL100	13	Culture/labour	100	21,4	74	10,0	4	18	9
"	BM1000	15	Culture/travail minimum	1000	11,7	36	1,2	27	21	12
"	BM100	16	Culture/travail minimum	100	12,9	54	2,3	14	21	12
Caillouteux	Jachère	18	Savane		13,3	42	1,2	32	32	

Tableau III-2.2: Résultats des mesures faites au cours de la campagne 1999

Sols	Parcelles	N°	Occupation	Sup.	KRAM	KR max	E.Totale	S*100/E.T	Pi sec	Pi humide
				m2	%	%	t ha ⁻¹ an ⁻¹	%	mm	mm
Ferrugineux rouge	RN	1	Nue	100	42,2	84,7	57,5	15,5	17	4
"	RJ	2	Jachère	100	17,7	49	5,6	28,6	17	6,5
"	RL1000	3	Culture/labour	1000	32,5	85,7	5,6	13	19	9
"	RL100	4	Culture/labour	100	50,2	83,6	21	20	19	9
"	RM1000	5	Culture/travail minimum	1000	23,9	68	2,3	18,2	19	9
"	RM100	7	Culture/travail minimum	100	23,2	94,6	12	43	19	9
Gravillonnaire	GN	8	Nue	100	43,3	94,8	8,1	39	15,8	5
"	GJ	9	Jachère	100	54,1	98,9	5,3	36,5	15,8	6
Brun vertique	BN	10	Nue	100	42,2	85,8	69,5	14	15,7	7,1
"	BJ	11	Jachère	100	26,8	62,7	1	21,7	15,7	7,1
"	BL1000	12	Culture/labour	1000	24,2	93,7	9,5	5,6	15,7	15,5
"	BL100	13	Culture/labour	100	33,3	97,3	18,2	9	33,3	14
"	BM1000	14	Culture/travail minimum	1000	21,3	92,3	3,7	3,3	15,7	14
"	BM100	15	Culture/travail minimum	100	39,8	88,2	9,7	35	34	16
Caillouteux	Litho S	16	Jachère		7,0	36,7	0,3	100		

ANNEXE III-3 : Résultats d'analyse des eaux de ruissellement, des sédiments et les pertes d'éléments chimiques

Pertes d'éléments chimiques par ruissellement et érosion des sols

Campagne : 1998

Parcelle : jachère sur sol caillouteux

1. Pertes d'éléments chimiques sous forme soluble par les eaux de ruissellement

Périodes de la campagne expérimentale	Vol. ruisselé (litre) sur 100 m ²	C		N		Ca		Mg		K		Na		P	
		teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte
		mg.L ⁻¹	kg.ha ⁻¹	mg.L ⁻¹	kg.ha ⁻¹	mg.L ⁻¹	kg.ha ⁻¹	mg.L ⁻¹	kg.ha ⁻¹	mg.L ⁻¹	kg.ha ⁻¹	mg.L ⁻¹	kg.ha ⁻¹	mg.L ⁻¹	kg.ha ⁻¹
P1(04/5 - 29/6)	2009	1,2	0,24	0,24	0,05	7,44	1,49	1,68	0,34	25,16	5,05	5,72	1,15	0,03	0,01
P2 (30/6 - 31/7)	3307	1,2	0,40	0,01	0,00	9,88	3,27	3,85	1,27	22,96	7,59	5,09	1,68	0,01	0,00
P3 (01/8 - 31/8)	4454	3,3	1,47	0,19	0,08	12,30	5,48	1,78	0,79	8,43	3,75	1,90	0,85	0,05	0,02
P4(01/9 - 12/10)	862	1,7	0,15	0,4	0,03	13,51	1,16	1,41	0,12	8,01	0,69	1,96	0,17	0,01	0,00
Total	10632		2,25		0,17		11,40		2,53		17,09		3,85		0,03

2. Pertes d'éléments chimiques sous forme solide par le transport des sédiments grossiers (terres de fond)

Périodes de la campagne expérimentale	Perte en terre (Kg ha ⁻¹) : fraction terre de fond	C		N		Ca		Mg		K		Na		P ass.	
		teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte
		mg.g ⁻¹	kg.ha ⁻¹	mg.g ⁻¹	kg.ha ⁻¹	még/100	kg.ha ⁻¹	még/100	kg.ha ⁻¹	még/100	kg.ha ⁻¹	még/100	kg.ha ⁻¹	ppm	kg.ha ⁻¹
P1(04/5 - 29/6)	255	12,05	3,07	0,77	0,20	10,35	0,53	5,48	0,17	0,47	0,05	0,04	0,00	10,43	0,00
P2 (30/6 - 31/7)	50	34,92	1,75	1,87	0,09	16,76	0,17	8,11	0,05	1,31	0,03	0,14	0,00	22,11	0,00
P3 (01/8 - 31/8)	500	26,47	13,24	1,48	0,74	26,11	2,61	4,78	0,29	4,13	0,81	0,39	0,04	21,37	0,00
P4(01/9 - 12/10)	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	805		18,05		1,03		3,31		0,50		0,88		0,05		0,00

3. Pertes d'éléments chimiques sous forme solide par le transport des matières en suspension (MES)

Périodes de la campagne expérimentale	Perte en terre (Kg) sur 100 m ² : matières en suspension	C		N		Ca		Mg		K		Na		P ass.	
		teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte
		mg.g ⁻¹	kg.ha ⁻¹	mg.g ⁻¹	kg.ha ⁻¹	mg.g ⁻¹	kg.ha ⁻¹	mg.g ⁻¹	kg.ha ⁻¹	mg.g ⁻¹	kg.ha ⁻¹	mg.g ⁻¹	kg.ha ⁻¹	ppm	kg.ha ⁻¹
P1(04/5 - 29/6)	87	36,63	3,19	2,57	0,09	11,53	0,20	2,4	0,03	0,47	0,02	0,04	0,00	74,33	0,00
P2 (30/6 - 31/7)	172	36,97	6,36	2,34	0,09	15,31	0,53	4,66	0,10	1,31	0,09	0,14	0,01	57,8	0,00
P3 (01/8 - 31/8)	101	48,53	4,90	2,87	0,14	17,17	0,35	2,1	0,03	4,13	0,16	0,39	0,01	94,13	0,00
P4(01/9 - 12/10)	0	0		0		0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Total	360		14,45		0,32		1,07		0,15		0,27		0,02		0,01

Pertes d'éléments chimiques par ruissellement et érosion des sols

Campagne : 1998

Parcelle : jachère sur sol brun vertique

1. Pertes d'éléments chimiques sous forme dissoute par les eaux de ruissellement

Périodes de la campagne expérimentale	Vol. ruisselé (litre) sur 100 m ²	C		N		Ca		Mg		K		Na		P (ICP)	
		teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte
		ppm	kg.ha ⁻¹	mg.L ⁻¹	kg.ha ⁻¹	mg.L ⁻¹	kg.ha ⁻¹	mg.L ⁻¹	kg.ha ⁻¹	mg.L ⁻¹	kg.ha ⁻¹	mg.L ⁻¹	kg.ha ⁻¹	mg.L ⁻¹	kg.ha ⁻¹
P1(04/5 - 29/6)	2750	2,1	0,58	0,87	0,24	29,09	8,00	4,76	1,31	21,16	5,82	6,55	1,80	0,03	0,01
P2 (30/6 - 31/7)	3576	1,8	0,64	0,01	0,00	7,01	2,51	1,07	0,38	8,48	3,03	0,87	0,31	0,03	0,01
P3 (01/8 - 31/8)	4409	0,9	0,40	0,83	0,37	23,25	10,25	3,45	1,52	10,08	4,44	5,41	2,39	0,02	0,01
P4(01/9 - 12/10)	5510	1,6	0,88	0,81	0,45	15,08	8,31	2,05	1,13	6,93	3,82	3,98	2,19	0	0,00
Total	16245		2,50		1,06		29,07		4,34		17,11		6,69		0,03

2. Pertes d'éléments chimiques sous forme solide par le transport des sédiments grossiers (terres de fond)

Périodes de la campagne expérimentale	Perte en terre (Kg ha ⁻¹) : fraction terre de fond	C		N		Ca		Mg		K		Na		P ass.	
		teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte
		mg.g ⁻¹	kg.ha ⁻¹	mg.g ⁻¹	kg.ha ⁻¹	még/10 ⁰	kg.ha ⁻¹	még/10 ⁰	kg.ha ⁻¹	még/10 ⁰	kg.ha ⁻¹	még/10 ⁰	kg.ha ⁻¹	ppm	kg.ha ⁻¹
P1(04/5 - 29/6)	540	40,74	22,00	2,45	1,32	20,24	2,19	5,58	0,36	1,04	0,22	0,07	0,01	27,7	3,44
P2 (30/6 - 31/7)	375	57,16	21,44	3,13	1,17	32,4	2,43	5,71	0,26	1,65	0,24	0,11	0,01	98,14	8,46
P3 (01/8 - 31/8)	600	33,79	20,27	1,7	1,02	38,23	4,59	2,32	0,17	0,92	0,22	0,05	0,01	94,62	13,06
P4(01/9 - 12/10)	25	45,62	1,14	2,98	0,07	24,14	0,12	3,85	0,01	0,79	0,01	0,08	0,00	52,57	0,30
Total	1540		64,85		3,59		9,32		0,80		0,68		0,03		25,26

3. Pertes d'éléments chimiques par le transport des matières en suspension (MES)

Périodes de la campagne expérimentale	Perte en terre (Kg) sur 100 m ² : matières en suspension	C		N		Ca		Mg		K		Na		P ass.	
		teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte
		mg.g ⁻¹	kg.ha ⁻¹	mg.g ⁻¹	kg.ha ⁻¹	még/10 ⁰	kg.ha ⁻¹	még/10 ⁰	kg.ha ⁻¹	még/10 ⁰	kg.ha ⁻¹	még/10 ⁰	kg.ha ⁻¹	ppm	kg.ha ⁻¹
P1(04/5 - 29/6)	271	35,13	9,52	2,07	0,56	17,05	0,92	3,74	0,12	0,71	0,08	0,05	0,00	64,52	4,02
P2 (30/6 - 31/7)	416	93,35	38,83	5,63	2,34	22,9	1,91	1,68	0,08	0,11	0,02	0,26	0,02	398,9	38,17
P3 (01/8 - 31/8)	29	34,25	0,99	2,56	0,07	22,9	0,13	1,68	0,01	0,11	0,00	0,26	0,00	774,9	5,17
P4(01/9 - 12/10)	103	76,03	7,83	6,05	0,62	22,9	0,47	1,68	0,02	0,11	0,00	0,26	0,01	61,49	1,46
Total	819		57,18		3,60		3,43		0,23		0,10		0,04		48,81

Pertes d'éléments chimiques par ruissellement et érosion des sols

Campagne 1998

Parcelle : Labour sur sol brun vertique

1. Pertes d'éléments chimiques sous forme dissoute par les eaux de ruissellement

Périodes de la campagne expérimentale	Vol. ruisselé (litre) sur 100 m ²	C		N		Ca		Mg		K		Na		P (ICP)	
		teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte
		ppm	kg.ha ⁻¹	mg.L ⁻¹	kg.ha ⁻¹	mg.L ⁻¹	kg.ha ⁻¹	mg.L ⁻¹	kg.ha ⁻¹	mg.L ⁻¹	kg.ha ⁻¹	mg.L ⁻¹	kg.ha ⁻¹	mg.L ⁻¹	kg.ha ⁻¹
P1(04/5 - 29/6)	1830		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00
P2 (30/6 - 31/7)	5500		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00
P3 (01/8 - 31/8)	7160	2,4	1,72	1,52	1,09	12,18	8,72	1,84	1,32	5,3	3,79	2,46	1,76	0,03	0,02
P4(01/9 - 12/10)	5200	1,6	0,83	2,37	1,23	30,52	15,87	4,83	2,51	6,11	3,18	3,38	1,76	0,09	0,05
Total	19690		2,55		2,32		24,59		3,83		6,97		3,52		0,07

2. Pertes d'élément chimiques sous forme solide par le transport des sédiments grossiers (terres de fond)

Périodes de la campagne expérimentale	Perte en terre (Kg ha ⁻¹) : fraction terre de fond	C		N		Ca		Mg		K		Na		P ass.	
		teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte
		mg.g ⁻¹	kg.ha ⁻¹	mg.g ⁻¹	kg.ha ⁻¹	még/10 ⁰	kg.ha ⁻¹	még/10 ⁰	kg.ha ⁻¹	még/10 ⁰	kg.ha ⁻¹	még/10 ⁰	kg.ha ⁻¹	ppm	kg.ha ⁻¹
P1(04/5 - 29/6)	250		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00
P2 (30/6 - 31/7)	6250		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00
P3 (01/8 - 31/8)	1600	23,35	3,84	1,52	2,43	14,42	4,61	1,05	0,20	0,35	0,22	0,02	0,01	32,58	0,00
P4(01/9 - 12/10)	1500	29,33	2,40	1,77	2,66	28,58	8,57	5,12	0,92	1,03	0,60	0,08	0,03	50,72	0,00
Total	9600		6,24		5,09		13,19		1,12		0,82		0,03		0,00

3. Pertes d'éléments chimiques par le transport des matières en suspension (MES)

Périodes de la campagne expérimentale	Perte en terre (Kg) sur 100 m ² : matières en suspension	C		N		Ca		Mg		K		Na		P ass.	
		teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte
		mg.g ⁻¹	kg.ha ⁻¹	mg.g ⁻¹	kg.ha ⁻¹	még/10 ⁰	kg.ha ⁻¹	még/10 ⁰	kg.ha ⁻¹	még/10 ⁰	kg.ha ⁻¹	még/10 ⁰	kg.ha ⁻¹	ppm	kg.ha ⁻¹
P1(04/5 - 29/6)	191		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00
P2 (30/6 - 31/7)	110		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00
P3 (01/8 - 31/8)	34	35,95	1,22	2,5	0,09	24,29	0,17	2,3	0,01	1,17	0,02	0,16	0,00	284,5	0,01
P4(01/9 - 12/10)	41	40,13	1,65	2,45	0,10	36,87	0,30	4,38	0,02	1,88	0,03	0,17	0,00	112,1	0,00
Total	376		2,87		0,19		0,47		0,03		0,05		0,00		0,01

Pertes d'éléments chimiques par ruissellement et érosion des sols

Campagne : 1998

Parcelle : Travail minimum sur sol brun vertique

1. Pertes d'éléments chimiques sous forme dissoute par les eaux de ruissellement

Périodes de la campagne expérimentale	Vol. ruisselé (litre) sur 100 m ²	C		N		Ca		Mg		K		Na		P (ICP)	
		teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte
		ppm	kg.ha ⁻¹	mg.L ⁻¹	kg.ha ⁻¹	mg.L ⁻¹	kg.ha ⁻¹	mg.L ⁻¹	kg.ha ⁻¹	mg.L ⁻¹	kg.ha ⁻¹	mg.L ⁻¹	kg.ha ⁻¹	mg.L ⁻¹	kg.ha ⁻¹
P1(04/5 - 29/6)	1828	1,8	0,33	0,87	0,16	14,98	2,74	3,73	0,68	5,03	0,92	0,97	0,18	0,3	0,05
P2 (30/6 - 31/7)	4303	1,8	0,77	0,87	0,37	14,98	6,45	3,73	1,61	5,03	2,16	0,97	0,42	0,3	0,13
P3 (01/8 - 31/8)	2260	1,3	0,29	0,27	0,06	14,98	3,39	3,73	0,84	5,03	1,14	0,97	0,22	0,3	0,07
P4(01/9 - 12/10)	4442	0,8	0,36	0,97	0,43	18,42	8,18	2,39	1,06	7,32	3,25	1,19	0,53	0,01	0,00
Total	12833		1,75		1,03		20,75		4,19		7,47		1,34		0,26

2. Pertes d'éléments chimiques sous forme solide par le transport des sédiments grossiers (terres de fond)

Périodes de la campagne expérimentale	Perte en terre (Kg ha ⁻¹) : fraction terre de fond	C		N		Ca		Mg		K		Na		P ass.	
		teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte
		mg.g ⁻¹	kg.ha ⁻¹	mg.g ⁻¹	kg.ha ⁻¹	még/100	kg.ha ⁻¹	még/100	kg.ha ⁻¹	még/100	kg.ha ⁻¹	még/100	kg.ha ⁻¹	ppm	kg.ha ⁻¹
P1(04/5 - 29/6)	250	26,84	6,71	1,71	0,43	26,57	1,33	5,7	0,17	0,72	0,07	0,72	0,04	40,2	0,00
P2 (30/6 - 31/7)	560	26,84	15,03	1,71	0,96	26,57	2,98	5,7	0,38	0,72	0,16	0,72	0,09	40,2	0,00
P3 (01/8 - 31/8)	515	26,84	13,82	1,71	0,88	26,57	2,74	5,7	0,35	0,72	0,14	0,72	0,09	40,2	0,00
P4(01/9 - 12/10)	350	28,17	9,86	1,85	0,65	35,43	2,48	2,52	0,11	0,93	0,13	0,08	0,01	58,79	0,00
Total	1675		45,42		2,91		9,52		1,01		0,50		0,23		0,00

3. Pertes d'éléments chimiques par le transport des matières en suspension (MES)

Périodes de la campagne expérimentale	Perte en terre (Kg) sur 100 m ² : matières en suspension	C		N		Ca		Mg		K		Na		P ass.	
		teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte
		mg.g ⁻¹	kg.ha ⁻¹	mg.g ⁻¹	kg.ha ⁻¹	még/100	kg.ha ⁻¹	még/100	kg.ha ⁻¹	még/100	kg.ha ⁻¹	még/100	kg.ha ⁻¹	ppm	kg.ha ⁻¹
P1(04/5 - 29/6)	164	47,87	7,85	3,13	0,51	37,94	1,24	5,98	0,12	1,44	0,09		0,00	108,5	0,01
P2 (30/6 - 31/7)	453	47,87	21,69	3,13	1,42	37,94	3,44	5,98	0,33	1,44	0,25	0,1	0,01	108,5	0,01
P3 (01/8 - 31/8)	27	38,45	1,04	2,91	0,08	2,91	0,02	2,91	0,01	2,91	0,03	0,14	0,00	841,2	0,03
P4(01/9 - 12/10)	25	38,45	0,96	2,91	0,07	2,91	0,01	2,91	0,01	2,91	0,03		0,00	661,8	0,03
Total	669		31,54		2,08		4,71		0,46		0,41		0,01		0,07

Pertes d'éléments chimiques par ruissellement et érosion des sols

Campagne : 1998

Parcelle : jachère sur sol gravillonnaire

1. Pertes d'éléments chimiques sous forme dissoute par les eaux de ruissellement

Périodes de la campagne expérimentale	Vol. ruisselé (litre) sur 100 m ²	C		N		Ca		Mg		K		Na		P (ICP)	
		teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte
		ppm	kg.ha ⁻¹	mg.L ⁻¹	kg.ha ⁻¹	mg.L ⁻¹	kg.ha ⁻¹	mg.L ⁻¹	kg.ha ⁻¹	mg.L ⁻¹	kg.ha ⁻¹	mg.L ⁻¹	kg.ha ⁻¹	mg.L ⁻¹	kg.ha ⁻¹
P1(04/5 - 29/6)	3154	2,1	0,66	0,89	0,28	29,92	9,44	3,73	1,18	18,34	5,78	2,3	0,73	0,17	0,05
P2 (30/6 - 31/7)	3635	5,3	1,93	0,87	0,32	29,55	10,74	3,69	1,34	18,26	6,64	2,55	0,93	0,22	0,08
P3 (01/8 - 31/8)	10111	1,1	1,11	0,84	0,85	8,23	8,32	0,93	0,94	5,11	5,17	2,15	2,17	0,03	0,03
P4(01/9 - 12/10)	8212	4,5	3,70	0,18	0,15	11,47	9,42	0,9	0,74	3,75	3,08	0,91	0,75	0,09	0,07
Total	25112		7,40		1,59		37,92		4,20		20,67		4,57		0,24

2. Pertes d'éléments chimiques sous forme solide par le transport des sédiments grossiers (terres de fond)

Périodes de la campagne expérimentale	Perte en terre (Kg ha ⁻¹) : fraction terre de fond	C		N		Ca		Mg		K		Na		P ass.	
		teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte
		mg.g ⁻¹	kg.ha ⁻¹	mg.g ⁻¹	kg.ha ⁻¹	még/10 0	kg.ha ⁻¹	még/10 0	kg.ha ⁻¹	még/10 0	kg.ha ⁻¹	még/10 0	kg.ha ⁻¹	ppm	kg.ha ⁻¹
P1(04/5 - 29/6)	400	44,49	17,80	1,95	0,09	39,59	3,17	2,86	0,14	1,22	0,19	0,07	0,01	61,27	0,00
P2 (30/6 - 31/7)	510	45,57	23,24	2,51	0,11	25,39	2,59	3,41	0,21	0,66	0,13	0,11	0,01	41,64	0,00
P3 (01/8 - 31/8)	550	33,98	18,69	2,03	0,07	23,4	2,57	2,26	0,15	0,55	0,12	0,05	0,01	41,20	0,00
P4(01/9 - 12/10)	400	24,27	9,71	1,42	0,03	20,66	1,65	1,5	0,07	0,47	0,07	0,08	0,01	43,4	0,00
Total	1860		69,43		0,30		9,98		0,57		0,51		0,03		0,01

3. Pertes d'éléments chimiques sous forme solide par le transport des matières en suspension (MES)

Périodes de la campagne expérimentale	Perte en terre (Kg) sur 100 m ² : matières en suspension	C		N		Ca		Mg		K		Na		P ass.	
		teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte	teneur	Perte
		mg.g ⁻¹	kg.ha ⁻¹	mg.g ⁻¹	kg.ha ⁻¹	még/10 0	kg.ha ⁻¹	még/10 0	kg.ha ⁻¹	még/10 0	kg.ha ⁻¹	még/10 0	kg.ha ⁻¹	ppm	kg.ha ⁻¹
P1(04/5 - 29/6)	266	45,7	12,16	2,81	0,13	14,8	0,79	1,13	0,04	0,53	0,05	0,05	0,00	102,6	0,00
P2 (30/6 - 31/7)	207	50,68	10,49	2,91	0,15	18,05	0,75	2,57	0,06	0,63	0,05	0,08	0,00	72,24	0,00
P3 (01/8 - 31/8)	181	36,24	6,56	2,71	0,10	5,08	0,18	0,76	0,02	0,89	0,06	0,29	0,01	208,5	0,01
P4(01/9 - 12/10)	56	50,23	2,81	4,11	0,21	5,08	0,06	0,76	0,01	0,89	0,02	0,29	0,00	327	0,02
Total	710		32,02		0,58		1,78		0,12		0,19		0,02		0,03

Pertes d'éléments chimiques par ruissellement et érosion des sols**Campagne : 1998**

Parcelle : jachère sur sol ferrugineux rouge

1. Pertes d'éléments chimiques sous forme dissoute par les eaux de ruissellement

Périodes de la campagne expérimentale	Vol. ruisselé (litre) sur 100 m ²	C		N		Ca		Mg		K		Na		P (ICP)	
		teneur mg.L ⁻¹	Perte kg.ha ⁻¹	teneur mg.L ⁻¹	Perte kg.ha ⁻¹	teneur mg.L ⁻¹	Perte kg.ha ⁻¹	teneur mg.L ⁻¹	Perte kg.ha ⁻¹	teneur mg.L ⁻¹	Perte kg.ha ⁻¹	teneur mg.L ⁻¹	Perte kg.ha ⁻¹	teneur mg.L ⁻¹	Perte kg.ha ⁻¹
P1(04/5 - 29/6)	3629	4,9	1,78	0,74	0,27	24,39	8,85	2,91	1,06	11,65	4,23	2,7	0,98	0,32	0,12
P2 (30/6 - 31/7)	4523	4,2	1,90	0,42	0,19	17,8	8,05	2,23	1,01	4,36	1,97	0,97	0,44	0,04	0,02
P3 (01/8 - 31/8)	10307	3,9	4,02	0,71	0,73	5,51	5,68	0,89	0,92	3,04	3,13	0,61	0,63	0,02	0,02
P4(01/9 - 12/10)	5317	3,7	1,97	0,35	0,19	6,08	3,23	0,87	0,46	2,92	1,55	1,33	0,71	0,07	0,04
Total	23776		9,66		1,38		25,81		3,44		10,89		2,75		0,19

2. Pertes d'éléments chimiques sous forme solide par le transport des sédiments grossiers (terres de fond)

Périodes de la campagne expérimentale	Perte en terre (Kg ha ⁻¹) : fraction terre de fond	C		N		Ca		Mg		K		Na		P ass.	
		teneur mg.g ⁻¹	Perte kg.ha ⁻¹	teneur mg.g ⁻¹	Perte kg.ha ⁻¹	teneur méq/100	Perte kg.ha ⁻¹	teneur méq/100	Perte kg.ha ⁻¹	teneur méq/100	Perte kg.ha ⁻¹	teneur méq/100	Perte kg.ha ⁻¹	teneur ppm	Perte kg.ha ⁻¹
P1(04/5 - 29/6)	1150	11,16	12,83	0,75	0,86	6,38	1,47	2,59	0,36	0,53	0,24	0,05	0,01	11,35	0,00
P2 (30/6 - 31/7)	750	28,99	21,74	1,86	1,40	11,83	1,77	2,88	0,26	0,53	0,16	0,03	0,01	29,43	0,00
P3 (01/8 - 31/8)	1100	20,66	22,73	1,27	1,40	13,57	2,99	2,12	0,28	0,49	0,21	0,14	0,04	100,18	0,00
P4(01/9 - 12/10)	330	14,38	4,75	0,89	0,29	11,63	0,77	1,76	0,07	0,34	0,04	0,02	0,00	21,48	0,00
Total	3330		62,05		3,95		6,99		0,97		0,65		0,06		0,00

3. Pertes d'éléments chimiques sous forme solide par le transport des matières en suspension (MES)

Périodes de la campagne expérimentale	Perte en terre (Kg) sur 100 m ² : matières en suspension	C		N		Ca		Mg		K		Na		P ass.	
		teneur mg.g ⁻¹	Perte kg.ha ⁻¹	teneur mg.g ⁻¹	Perte kg.ha ⁻¹	teneur méq/100	Perte kg.ha ⁻¹	teneur méq/100	Perte kg.ha ⁻¹	teneur méq/100	Perte kg.ha ⁻¹	teneur méq/100	Perte kg.ha ⁻¹	teneur ppm	Perte kg.ha ⁻¹
P1(04/5 - 29/6)	298	24,46	7,29	1,81	0,04	13,28	0,79	0,91	0,03	0,71	0,08	0,08	0,01	80,59	0,00
P2 (30/6 - 31/7)	264	25,38	6,70	1,73	0,04	8,73	0,46	1,34	0,04	0,49	0,05	0,08	0,00	50,38	0,00
P3 (01/8 - 31/8)	118	24,44	2,88	2,17	0,05	2,22	0,05	0,41	0,01	0,45	0,02	0,11	0,00	151,3	0,00
P4(01/9 - 12/10)	69	21,74	1,50	1,97	0,04	2,22	0,03		0,00		0,00		0,00	151,3	0,00
Total	749		18,37		0,18		1,34		0,08		0,15		0,01		0,01

Pertes d'éléments chimiques par ruissellement et érosion des sols

Campagne : 1998

Parcelle : Labour sur sol ferrugineux rouge

1. Pertes d'éléments chimiques sous forme soluble par les eaux de ruissellement

Périodes de la campagne expérimentale	Vol. ruisselé (litre) sur 100 m ²	C		N		Ca		Mg		K		Na		P	
		teneur mg.L ⁻¹	Perte kg.ha ⁻¹	teneur mg.L ⁻¹	Perte kg.ha ⁻¹	teneur mg.L ⁻¹	Perte kg.ha ⁻¹	teneur mg.L ⁻¹	Perte kg.ha ⁻¹	teneur mg.L ⁻¹	Perte kg.ha ⁻¹	teneur mg.L ⁻¹	Perte kg.ha ⁻¹	teneur mg.L ⁻¹	Perte kg.ha ⁻¹
P1(04/5 - 29/6)	187	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
P2 (30/6 - 31/7)	4582	0,9	0,41	0,66	0,15	0	0,00	1,9	0,87	6,21	2,85	1,17	0,00	0,02	0,01
P3 (01/8 - 31/8)	17640	0,7	1,23	1,1	1,94	6,31	11,13	0,94	1,66	3,59	6,33	0,76	0,00	0,02	0,04
P4(01/9 - 12/10)	8429	1	0,84	0,87	0,73	4,42	3,73	0,76	0,64	3,63	3,06	0,57	0,00	0,04	0,03
Total	30838		2,49		2,82		14,86		3,17		12,24		0,00		0,08

2. Pertes d'éléments chimiques sous forme solide par le transport des sédiments grossiers (terres de fond)

Périodes de la campagne expérimentale	Perte en terre (Kg ha ⁻¹) : fraction terre de fond	C		N		Ca		Mg		K		Na		P ass.	
		teneur mg.g ⁻¹	Perte kg.ha ⁻¹	teneur mg.g ⁻¹	Perte kg.ha ⁻¹	teneur méq/100	Perte kg.ha ⁻¹	teneur méq/100	Perte kg.ha ⁻¹	teneur méq/100	Perte kg.ha ⁻¹	teneur méq/100	Perte kg.ha ⁻¹	teneur ppm	Perte kg.ha ⁻¹
P1(04/5 - 29/6)	50	17,21	0,86	1,34	0,07	25,08	0,25	4,19	0,03	0,74	0,01	0,08	0,00	41	0,00
P2 (30/6 - 31/7)	7750	39,97	309,77	2,84	22,01	6,97	10,80	1,08	1,00	0,34	1,03	0,04	0,07	13,25	0,00
P3 (01/8 - 31/8)	4950	8,92	44,15	0,72	3,56	9,81	9,71	0,66	0,39	0,24	0,46	0,03	0,03	12,71	0,00
P4(01/9 - 12/10)	1150	6,02	6,92	0,44	0,51	6,19	1,42	0,71	0,10	0,24	0,11	0,01	0,00	14,38	0,00
Total	13900		361,71		26,15		22,19		1,52		1,61		0,11		0,00

3. Pertes d'éléments chimiques sous forme solide par le transport des matières en suspension (MES)

Périodes de la campagne expérimentale	Perte en terre (Kg) sur 100 m ² : matières en suspension	C		N		Ca		Mg		K		Na		P ass.	
		teneur mg.g ⁻¹	Perte kg.ha ⁻¹	teneur mg.g ⁻¹	Perte kg.ha ⁻¹	teneur méq/100	Perte kg.ha ⁻¹	teneur méq/100	Perte kg.ha ⁻¹	teneur méq/100	Perte kg.ha ⁻¹	teneur méq/100	Perte kg.ha ⁻¹	teneur ppm	Perte kg.ha ⁻¹
P1(04/5 - 29/6)	67		0,00		0,00	13,71	0,18	0,57	0,00	0,66	0,02	0,06	0,00	61,49	0,00
P2 (30/6 - 31/7)	825	12,16	10,03	0,99	0,82	1,38	0,23	0,55	0,05	0,3	0,10	0,04	0,01	30,38	0,00
P3 (01/8 - 31/8)	797	13,59	10,83	1,25	1,00	1,03	0,16	0,22	0,02	0,21	0,07	0,07	0,01	78,2	0,00
P4(01/9 - 12/10)	223	14,42	3,22	1,25	0,28	1,56	0,07	0,29	0,01	0,25	0,02	0,05	0,00	77,09	0,00
Total	1912		24,08		2,09		0,65		0,09		0,20		0,02		0,00

Pertes d'éléments chimiques par ruissellement et érosion des sols

Campagne : 1998

Parcelle : Travail minimum sur sol rouge

1. Pertes d'éléments chimiques sous forme soluble par les eaux de ruissellement

Périodes de la campagne expérimentale	Vol. ruisselé (litre) sur 100 m ²	C		N		Ca		Mg		K		Na		P (ICP)	
		teneur mg.L ⁻¹	Perte kg.ha ⁻¹	teneur mg.L ⁻¹	Perte kg.ha ⁻¹	teneur mg.L ⁻¹	Perte kg.ha ⁻¹	teneur mg.L ⁻¹	Perte kg.ha ⁻¹	teneur mg.L ⁻¹	Perte kg.ha ⁻¹	teneur mg.L ⁻¹	Perte kg.ha ⁻¹	teneur mg.L ⁻¹	Perte kg.ha ⁻¹
P1(04/5 - 29/6)	518	1	0,05	0,05	0,00	11,48	0,59	1,1	0,06	6,84	0,35	0,99	0,05	0	0,00
P2 (30/6 - 31/7)	2480	1,6	0,40	1,78	0,44	30,87	7,66	2,44	0,61	13,05	3,24	2,7	0,67	0,01	0,00
P3 (01/8 - 31/8)	7460	0,9	0,67	0,85	0,63	20,49	15,29	1,02	0,76	6,69	4,99	1,16	0,87	0,02	0,01
P4(01/9 - 12/10)	9800	0,6	0,59	0,58	0,57	11,47	11,24	0,39	0,38	4,9	4,80	1,27	1,24	0	0,00
Total	20258		1,71		1,65		34,78		1,81		13,38		2,83		0,02

2. Pertes d'éléments chimiques sous forme solide par le transport des sédiments grossiers (terres de fond)

Périodes de la campagne expérimentale	Perte en terre (Kg ha ⁻¹) : fraction terre de fond	C		N		Ca		Mg		K		Na		P ass.	
		teneur mg.g ⁻¹	Perte kg.ha ⁻¹	teneur mg.g ⁻¹	Perte kg.ha ⁻¹	teneur méq/100	Perte kg.ha ⁻¹	teneur méq/100	Perte kg.ha ⁻¹	teneur méq/100	Perte kg.ha ⁻¹	teneur méq/100	Perte kg.ha ⁻¹	teneur ppm	Perte kg.ha ⁻¹
P1(04/5 - 29/6)	52	8,03	0,42	0,57	0,03	5,73	0,06	0,72	0,00	0,27	0,01	0,04	0,00	18,83	0,00
P2 (30/6 - 31/7)	900	12,77	11,49	0,85	0,77	22,5	4,05	2,26	0,24	0,69	0,24	0,07	0,01	39,53	0,00
P3 (01/8 - 31/8)	900	34,56	31,10	1,98	1,78	12,1	2,18	1,08	0,12	0,36	0,13	0,03	0,01	19,01	0,00
P4(01/9 - 12/10)	100	13,74	1,37	0,86	0,09	11,23	0,22	1,12	0,01	0,37	0,01	0,01	0,00	23,01	0,00
Total	1952		44,39		2,66		6,51		0,38		0,39		0,02		0,00

3. Pertes d'éléments chimiques sous forme solide par le transport des matières en suspension (MES)

Périodes de la campagne expérimentale	Perte en terre (Kg) sur 100 m ² : matières en suspension	C		N		Ca		Mg		K		Na		P ass.	
		teneur mg.g ⁻¹	Perte kg.ha ⁻¹	teneur mg.g ⁻¹	Perte kg.ha ⁻¹	teneur méq/100	Perte kg.ha ⁻¹	teneur méq/100	Perte kg.ha ⁻¹	teneur méq/100	Perte kg.ha ⁻¹	teneur méq/100	Perte kg.ha ⁻¹	teneur ppm	Perte kg.ha ⁻¹
P1(04/5 - 29/6)	170	34,09	5,80	2,52	0,43	11,23	0,38	1,25	0,03	0,67	0,04	0,07	0,00	135,81	0,00
P2 (30/6 - 31/7)	200	17,78	3,56	1,45	0,29	11,23	0,45	1,25	0,03	0,67	0,05	0,07	0,00	54,19	0,00
P3 (01/8 - 31/8)	150	15,51	2,33	1,28	0,19	3,51	0,11	0,43	0,01	0,31	0,02	0,05	0,00	77,32	0,00
P4(01/9 - 12/10)	216	17,99	3,89	1,7	0,37	3,51	0,15	0,43	0,01	0,31	0,03	0,05	0,00	146,4	0,00
Total	736		15,56		1,28		1,09		0,07		0,14		0,01		0,01

ANNEXE IV

Résultats des tests de laboratoire sur le comportement des sols du bassin versant de Djitiko

Tableau IV-1 : Résultats des tests de stabilité des mottes prélevés dans les jachères d'au moins 20 ans

Rouge jachère					Brun jachère		
N°motte	P.motte (air)	P. motte (étuve)	V	V/P	N°motte	P.motte (air)	P. motte (étuve)
1	4,04	3,98	115,80	29,10	1	4,01	3,82
2	3,96	3,90	211,50	54,23	2	4,03	3,84
3	4,05	3,99	55,80	13,98	3	3,95	3,76
4	3,90	3,84	23,00	5,99	4	3,98	3,79
5	3,91	3,85	77,50	20,13	5	4,06	3,87
6	3,94	3,88	22,10	5,70	6	4,01	3,82
7	3,96	3,90	267,00	68,46	7	4,03	3,84
8	3,83	3,77	232,50	61,67	8	3,90	3,72
9	4,02	3,96	42,50	10,73	9	4,06	3,87
10	3,86	3,80	57,50	15,13	10	4,00	3,81
11	4,00	3,94	160,00	40,61	11	4,04	3,85
12	4,01	3,95	31,90	8,08	12	4,00	3,81
13	4,05	3,99	75,50	18,92	13	4,10	3,91
14	4,08	4,02	169,80	42,24	14	4,08	3,89
15	3,99	3,93	27,00	6,87	15	3,97	3,78
16	4,00	3,94	112,10	28,45	16	3,92	3,74
17	3,98	3,92	192,10	49,01	17	4,11	3,92
18	3,99	3,93	227,00	57,76	18	3,93	3,75
19	4,09	4,03	483,60	120,00	19	3,88	3,70
20	3,90	3,84	86,00	22,40	20	3,95	3,76
21	3,98	3,92	201,00	51,28	21	4,07	3,88
22	4,03	3,97	587,50	147,98	22	3,87	3,69
23	4,08	4,02	66,20	16,47	23	3,97	3,78
24	3,91	3,85	205,00	53,25	24	4,08	3,89
25	4,00	3,94	407,50	103,43	25	4,02	3,83
26	3,98	3,92	560,50	142,98	26	3,98	3,79
27	4,04	3,98	166,40	41,81	27	3,96	3,77
28	4,09	4,03	98,60	24,47	28	3,87	3,69
29	4,05	3,99	40,00	10,03	29	3,88	3,70
30	3,78	3,72	75,40	20,27	30	3,97	3,78
Moy	3,98	3,92	169,28	43,05	Moy	3,99	3,80
ET	0,08	0,08	155,38	39,25	ET	0,07	0,07
CV	1,94	1,97	91,79	91,19	CV	1,75	1,75

Tableau IV- 2 : Résultats des tests de stabilité des mottes prélevés dans les champs paysans de 5 ans de culture

Rouge culture 1997					Brun culture 1997			
N°motte	P.motte (air)	P. motte (étuve)	V	V/P	N°motte	P.motte (air)	P. motte (étuve)	V
1	3,97	3,92	31	7,91	1	4,06	3,87	30,5
2	4,05	4,00	36	9,01	2	4,07	3,88	23,5
3	3,87	3,82	26	6,81	3	4,07	3,88	14
4	3,97	3,92	22	5,61	4	3,96	3,77	32,4
5	4,07	4,02	67	16,68	5	3,94	3,75	19
6	4,05	4,00	29,5	7,38	6	3,95	3,76	21,5
7	3,55	3,50	25	7,14	7	3,9	3,72	18
8	3,97	3,92	30,97	7,90	8	3,97	3,78	11,52
9	3,89	3,84	32	8,33	9	3,92	3,74	26
10	3,85	3,80	32	8,42	10	4,07	3,88	30,2
11	4,06	4,01	18,5	4,62	11	3,8	3,62	21
12	3,97	3,92	22,9	5,84	12	4,07	3,88	56
13	3,94	3,89	30,7	7,89	13	3,9	3,72	12
14	4,03	3,98	21,1	5,30	14	4,07	3,88	21,5
15	4,04	3,99	16,9	4,24	15	4,01	3,82	15,7
16	4,00	3,95	39,5	10,01	16	3,9	3,72	21
17	4,04	3,99	34	8,53	17	4,07	3,88	45,5
18	3,81	3,76	20,5	5,45	18	3,85	3,67	30,8
19	4,06	4,01	17,5	4,37	19	3,87	3,69	32
20	3,97	3,92	25,2	6,43	20	4,05	3,86	32,9
21	3,90	3,85	50	12,99	21	4,05	3,86	16,7
22	4,00	3,95	17,5	4,43	22	3,98	3,79	18,3
23	3,99	3,94	23,1	5,87	23	3,96	3,77	30
24	4,06	4,01	31,2	7,79	24	4,05	3,86	41,16
25	3,97	3,92	44,1	11,25	25	3,85	3,67	30,5
26	3,97	3,92	30,2	7,71	26	4,03	3,84	27
27	4,00	3,95	24,2	6,13	27	4,08	3,89	32
28	3,95	3,90	14	3,59	28	4,03	3,84	32
29	4,08	4,03	51	12,66	29	4	3,81	25
30	4,08	3,89	39,2	10,08	30	4,03	3,84	47,8
Moy	3,97	3,92	30,09	7,68	Moy	3,99	3,80	27,18
ET	0,11	0,10	11,67	2,92	ET	0,08	0,08	10,59
CV	2,67	2,63	38,78	38,06	CV	2,04	2,04	38,95

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
CHAPITRE I: LE SITE DE L'ETUDE (BASSIN VERSANT DE DJITIKO)	5
1.1 Introduction	5
1.2 Localisation géographique et étendue du bassin versant de Djitiko	6
1.3 Environnement physique du bassin versant de Djitiko	8
1.4 Environnement humain du bassin versant de Djitiko	24
1.5 Conclusions	27
CHAPITRE II : CARACTERISATION DES UNITES MORPHOPEDOLOGIQUES ET DES ETATS DE SURFACE DU BASSIN VERSANT DE DJITIKO	28
2.1 Introduction	29
2.2 Les unités morphopédologiques	29
2.3 Caractérisation des états de surface du bassin versant de Djitiko	50
2.7 Conclusions	61
CHAPITRE III: ETUDE EXPERIMENTALE DE L'EROSION ET DU RUISSELLEMENT SUR PARCELLES	64
3.1 Introduction	65
3.2 Généralités sur l'érosion hydrique des sols	65
3.3 Dispositifs expérimentaux et méthodes utilisées dans le bassin versant de Djitiko	70
3.4 Résultats	78
3.5 Discussion	94
3.6 Conclusions	97
CHAPITRE IV : RECHERCHE D'INDICATEURS D'ERODIBILITE DES SOLS EN LABORATOIRE	99
4.1 Introduction	100
4.2 Généralités	100
4.3 Les indicateurs d'érodibilité des sols du bassin versant de Djitiko	103
4.4 Conclusions	116
CHAPITRE V: SPATIALISATION DU COMPORTEMENT HYDRODYNAMIQUE ET LA SUCCEPTIBILITE DES SOLS A L'EROSION	118
5.1 Introduction	119
5.2. Généralités sur la modélisation et la spatialisation de l'érosion des sols	119
5.3 Démarche de spatialisation utilisée dans le bassin versant de Djitiko	121
5.4 Résultats	127

5.5 Discussion	131
5.6 Conclusions	140
CHAPITRE VI : REFLEXION SUR L'AMENAGEMENT DU MILIEU SOUDANIEN	134
6.1 Introduction	135
6.2 Contraintes physiques de la mise en valeur agricole du domaine soudanien	135
6.3 Les stratégies traditionnelles dans l'agriculture et la gestion des ressources naturelles (cas du bassin versant de Djitiko)	137
6.4 Interventions des services techniques de l'état : évolution des pratiques agricoles et leurs incidences	141
6.5 Propositions de mise en valeur en fonction de nos résultats	142
6.6 Conclusions	143
CONCLUSION GENERALE	144
BIBLIOGRAPHIE	157
LISTE DES FIGURES	165
LISTE DES TABLEAUX	170
ANNEXES	171
ANNEXE I: Géochimie et minéralogie des formations superficielles	172
ANNEXE II-1: Méthodes d'analyse des sols au laboratoire	174
ANNEXE II-2 : Résultats d'analyses classiques des sols au laboratoire	176
ANNEXE III-1 : Caractéristiques des pluies enregistrées sur le bassin versant de Djitiko	186
ANNEXE III-2 : Ruissellement et érosion mesurés sur parcelles expérimentales	191
ANNEXE III-3 : Résultats d'analyses des eaux de ruissellement et des sédiments et les pertes d'éléments chimiques	193
ANNEXE IV : Résultats des tests de comportement des sols en laboratoire	201

RESUME

Cette étude caractérise le ruissellement et l'érosion hydrique dans un bassin versant de 103 km² du domaine soudanien au Mali et cela en fonction des types de sol, de leur occupation et des techniques culturales. Les expérimentations sur parcelles (100 à 1000m²) ont été complétées par des études de comportement des sols en laboratoire. A partir de ces informations, le problème du transfert des matériaux érodés des versants vers l'exutoire du bassin versant a été abordé.

Pour les deux campagnes de mesure, la valeur moyenne du coefficient annuel de ruissellement sous jachère est plus élevée sur sol gravillonnaire cuirassé (42 %) et plus faible sur sol caillouteux (10 %). Les valeurs enregistrées sur sol ferrugineux tropical et sol brun vertique sont du même ordre (22 %). Avec la mise en culture de ces deux derniers sols, le coefficient de ruissellement annuel peut atteindre 45 % dans le cas du labour et 18 % avec la pratique du travail minimum du sol.

L'érosion varie de 0,3 à 5,6 t ha⁻¹ an⁻¹ sur parcelle de 100 m², sous jachère en fonction de l'année et du type de sol. La mise en culture avec la pratique du labour favorise une nette augmentation de l'érosion : 10 à 20 t ha⁻¹ an⁻¹. Par contre avec la pratique du travail minimum du sol, l'érosion reste à un niveau comparable à ce qui est observé sous jachère. A l'échelle de la parcelle de 100 m² et quelle que soit l'occupation du sol

Les pertes de carbone et d'azote se font principalement sous forme solide, alors que les pertes en bases échangeables (Ca, Mg, K et Na) sont nettement plus importantes sous forme dissoute.

Les études de laboratoire ont montré que les tests de stabilité des agrégats et des mottes sont de bons indicateurs d'érodibilité des sols. Ces informations semblent être appropriées pour la cartographie des risques d'érosion.

Les sédiments produits dans le bassin versant sont transférés à l'exutoire dans la proportion de 7% , le reste des matériaux érodés restant piégés dans le paysage. Déjà d'une parcelle de 100 m² à une parcelle de 1000 m², installées côte à côte, l'érosion mesurée peut diminuer considérablement (rapport variable de 2 à 5).

L'aménagement en agriculture soudanienne doit beaucoup insister sur la gestion de la biomasse à l'échelle parcellaire en limitant au maximum la pratique du labour.