

Académie de Montpellier  
Université Montpellier II  
Sciences et techniques du Languedoc

Institut Français de Recherche Scientifique  
pour le Développement en Coopération  
ORSTOM

**D. E. S**  
**Sciences de l'eau et aménagement**

**Mémoire**

**HYDRODYNAMIQUE ET EROSION HYDRIQUE DES  
SOLS EN ZONE DE SAVANE HUMIDE  
(Bassin versant du Djitiko, MALI)**

Par

Drissa DIALLO

Présenté le 28 septembre 1995 devant le jury composé de :

**C. BOCQUILLON**

**M. BORNANT**

**J. M. LAMACHERE**

**J.M. MASSON**

## AVANT-PROPOS

A l'occasion de la présentation de ce mémoire, je voudrais remercier :

Monsieur le professeur C. BOCQUILLON, qui m'a accepté dans sa filière de formation à l'Université de Montpellier II. J'ai bénéficié d'un enseignement théorique de qualité.

Monsieur J. M. LAMACHERE. Il m'a fait profiter de ses expériences en hydrodynamique des bassins versants soudano-sahéliens. De la préparation de la mission de terrain jusqu'au traitement des données et à la réalisation du présent rapport, j'ai bénéficié de son entière disponibilité.

Messieurs M. BORNANT et J.M. MASSON qui ont consacré une partie de leur temps au jugement de ce travail.

Je dois beaucoup à Monsieur J.C. OLIVRY, représentant de l'ORSTOM au Mali. Après m'avoir accepté à l'ORSTOM dans le cadre de cette formation, il s'est toujours montré attentif à son bon déroulement. Il m'a proposé le sujet de ce mémoire.

Le travail de terrain au Mali a été marqué par l'entière disponibilité de J.P DROUX. Je l'en remercie. A cette phase, V. BASTIEN, également en stage au centre ORSTOM de Bamako, a été pleinement associée au travail. Je lui en suis reconnaissant.

A l'ORSTOM, Montpellier, je remercie :

Monsieur P CARRE du centre ORSTOM de Montpellier. Il s'est constamment occupé de moi en vue du bon déroulement de mon stage.

E.ROOSE et R. CHAUME pour les appuis et les encouragements qu'ils m'ont donnés.

Tous ceux qui m'ont aidé et qui ne sont pas cités ici.

<b>SOMMAIRE</b>	<b>pages</b>
<b>INTRODUCTION</b>	4
<b>PREMIERE PARTIE : MILIEU D'ETUDE</b>	6
1.1 Caractéristiques régionales : le Niger supérieur	7
1.1.1 Géologie	
1.1.2 Géomorphologie et relief	
1.1.3 Climat	
1.1.4 Couverture végétale	
1.1.5 Données agroécologiques	
1.2 Bassin versant du Djitiko	15
1.2.1 Caractéristiques physiques	
1.2.2 Relief et hypsométrie	
1.2.3 Equipements, données pluviométriques et hydrologiques	
<b>DEUXIEME PARTIE : CARACTERISATION DES COUVERTURES PEDOLOGIQUES DU BASSIN VERSANT DU DJITIKO</b>	<b>21</b>
2.1 Le concept de couverture pédologique	22
2.2 Quelques aspects méthodologiques de l'étude des couvertures pédologiques	22
2.3 Démarche utilisée pour la caractérisation des couvertures pédologiques du bassin versant du Djitiko	24
2.4 Les sols inventoriés	25
2.4.1 Description	
2.4.2 Rattachement des sols à des systèmes existants	
2.4.3 Répartition spatiale des couvertures pédologiques	
<b>TROISIEME PARTIE : CARACTERISATION DES ETATS DE SURFACE DU BASSIN VERSANT DU DJITIKO</b>	<b>32</b>
3.1 La cartographie des états de surface	

	<b>pages</b>
3.1.1 Méthodologie	
3.1.2 Application au bassin versant du Djitiko	
3.2 La description des surfaces élémentaires	39
3.2.1 Méthodologie	
3.2.2 Les surfaces élémentaires du bassin versant du Djitiko	
3.3 La description des états de surface	47
3.3.1 Méthodologie	
3.3.2 Les états de surface du bassin versant du Djitiko	
3.4 La caractérisation hydrodynamique des états de surface	53
3.4.1 Les paramètres hydrodynamiques du sol	
3.4.2 Influence des états de surface sur l'hydrodynamique superficielle	
3.4.3 Les équations hydrodynamiques du sol	
3.4.4 Les équations hydrodynamiques associées aux unités cartographiques	
<b>QUATRIEME PARTIE : ETUDE DE LA SENSIBILITE DES SOLS A L' EROSION HYDRIQUE</b>	64
4.1 Aperçu sur l'érosion hydrique des sols et son évaluation	65
4.1.1 Quelques définitions	
4.1.2 Les formes d'érosion hydrique	
4.1.3 Quelques aspects méthodologiques de la mesure et de l'étude de érosion hydrique	
4.2 Essai de caractérisation et d'estimation de l'érosion hydrique dans le bassin versant du Djitiko	69
4.2.1 Les observations de terrain	
4.2.2 Application du modèle de WISCHMEIER et SMITH	
<b>CONCLUSION GENERALE</b>	76
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	79

## Introduction

Dans la zone soudano-sahélienne d'Afrique où se situe le Mali, on enregistre, depuis deux décennies, une crise de la production alimentaire et une dégradation de l'environnement naturel. Les populations, en particulier celles du milieu rural, sont conscientes de ces réalités qu'elles vivent tous les jours (MONIMART, 1989).

Les manifestations de la dégradation environnementale sont de plus en plus étudiées et mises en évidence par les institutions de recherche :

- 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 % pour les parties subhumides et 25 à 30 % pour les parties arides et semi-arides (LE BORGNE, 1987).

- Les apports des grands fleuves à la zone sahéenne se sont réduits de 40 % en moyenne et les lacs présentent de très bas niveaux, voire même un assèchement total pour certains d'entre eux (SIRCOULON, 1987). Il semble que la situation actuelle se distingue des événements déficitaires antérieurs par ses conséquences durables sur les régimes hydrologiques de basses-eaux par l'épuisement des aquifères (OLIVRY, 1983; OLIVRY, 1987).

- De nombreux experts sont préoccupés par la baisse de fertilité et l'érosion des sols de l'espace agricole. Ils craignent une dégradation quasi irréversible du patrimoine foncier et végétal (PIERI, 1989).

Dans ces conditions, il n'est pas étonnant que les projections démographiques (augmentation considérable de la population) et économiques du continent africain et en particulier de la zone soudano-sahélienne ne permettent pas, a priori, d'espérer sur une évolution favorable de l'environnement naturel et de la production alimentaire.

Dans ce contexte, l'Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération (ORSTOM) et le Centre National de Recherche Scientifique et Technologique (CNRST) du Mali ont élaboré un projet de recherche pluridisciplinaire (CNRST et ORSTOM, 1992) : Environnement et Qualité des Apports du Niger au Sahel (EQUANIS). Ce projet est conforme à la thématique de l'Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS) et au Programme Environnement Géosphère Intertropical (PEGI).

Les propositions du projet EQUANIS sont :

- La surveillance du milieu et de la qualité des eaux pour déceler des altérations majeures du système.

- Caractériser l'environnement des bassins versants en rattachant cette caractérisation aux conditions climatiques et aux impacts anthropiques.
- L'établissement du bilan global et des exportations de matières minérales et organiques.
  - Modéliser le fonctionnement biohydrogéodynamique des zones intertropicales peu humides à sèches.
  - Modéliser le bilan hydrique dans le Delta intérieur du Niger à partir des pertes en eau et de l'évolution des concentrations de la matière dissoute pour une détermination des relations surface inondée/durée d'inondation.
  - Etablir de relations entre la ressource hydrique et les ressources biotiques à partir des stations de référence et de zones tests pour ces dernières (société / milieu / ressource).

Conformément à ces propositions, plusieurs programmes de recherche ont été élaborés. Notre présente étude s'inscrit dans le programme Erosion et Environnement du bassin supérieur du Niger et concerne le petit bassin versant du Djitiko situé en rive gauche du fleuve Niger, en amont de Bamako.

**Plus précisément, l'objectif était de proposer une évaluation de la sensibilité au ruissellement et à l'érosion hydrique sur ce bassin (100 km<sup>2</sup>) de la zone de savane humide du Mali.**

**Par l'observation des traits morphopédologiques et des états de surface, la phase de reconnaissance "naturaliste" effectuée sur le terrain (début juin-mi juillet) se proposait d'abord de situer le contexte local par rapport aux typologies pertinentes identifiées par les spécialistes. Pour cette partie de l'Afrique de l'Ouest nous nous référons en particulier à Casenave et Valentin pour les états de surface et le ruissellement, Roose pour l'érosion.**

**Par la suite les potentiels de ruissellement et l'érosion ont été évalué d'après les résultats de ces auteurs et de Lamachère.**

Ce travail a conduit au présent rapport comportant :

- une première partie qui traite des généralités sur le bassin supérieur du fleuve Niger,
- une deuxième partie relative à la caractérisation des couvertures pédologiques du bassin du Djitiko,
- une troisième partie qui porte sur la caractérisation et la cartographie des états de surface du bassin du Djitiko et sur leur aptitude au ruissellement.
- une quatrième partie relative à l'évaluation des risques d'érosion hydrique.

**Première partie**

**Le milieu d'étude**

## 1.1. Caractéristiques régionales : le Niger Supérieur

Le Niger supérieur va de la source du fleuve, en Guinée, au barrage de Markala au Mali (BRUNET-MORET et al, 1986). Il constitue, avec la cuvette lacustre, le Niger moyen et le Niger inférieur les quatre principaux cours du fleuve. Il s'étend entre les latitudes  $8^{\circ} 35'$  et  $14^{\circ} 00' N$  et les longitudes  $4^{\circ} 00' W$  et  $11^{\circ} 30' W$  (Figure 1.1). Le bassin supérieur du Niger est limité au nord-ouest par le plateau Mandingue qui vient longer le fleuve, à l'ouest par le massif du Fouta Djallon, au sud-ouest par les nombreuses chaînes d'origine géologique très différente qui viennent s'y raccorder. Au sud, la limite avec les bassins des fleuves côtiers, de la Sassandra et du Bandama (Côte d'Ivoire), est moins franche. Elle est encore moins marquée à l'est avec les bassins de la Comoé et du Mou Houn (ex Volta Noire).

Le bassin versant du Djitiko, sur lequel porte notre étude, est situé sur la rive gauche du fleuve, au-dessus de  $12^{\circ}$  de latitude nord, à environ 80 Km à l'amont de Bamako. Il fait partie des bassins versants représentatifs et expérimentaux d'Afrique (NOUVELOT, 1993).

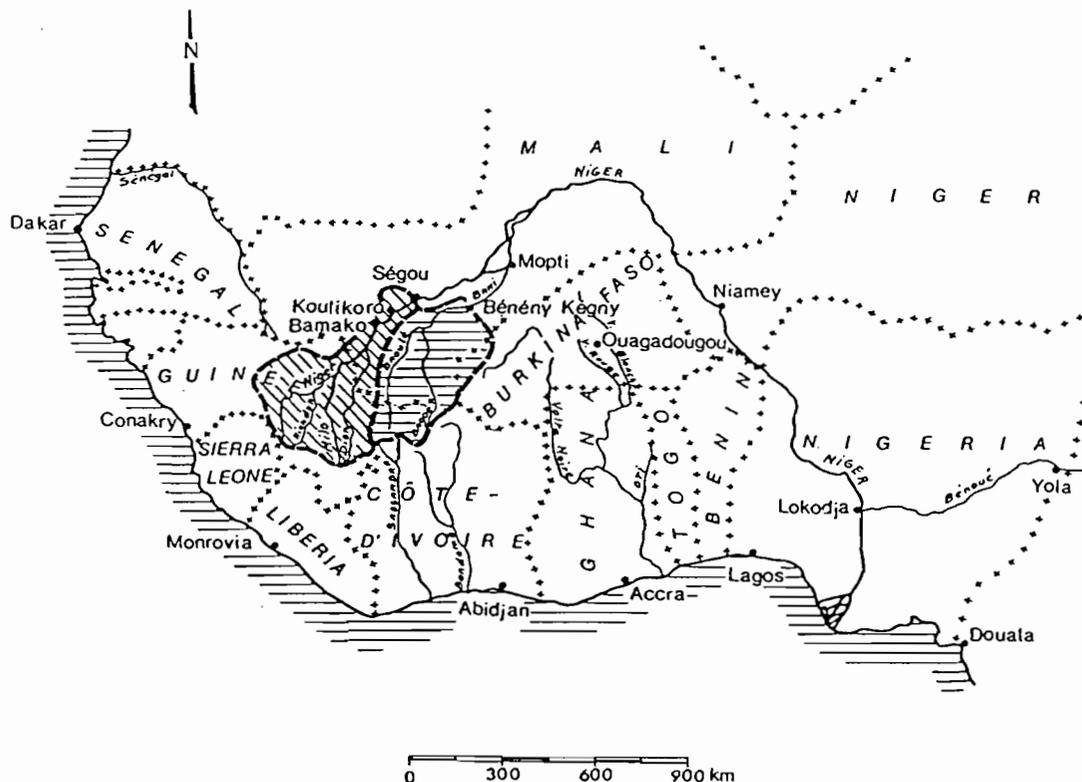


Figure 1.1 : Carte de situation des bassins du Niger supérieur et du Bani (d'après BRUNET-MORET et al., 1986).

### 1.1.1 Géologie

On distingue cinq principales formations géologiques dans le bassin du Niger supérieur (BRUNET-MORET et al., 1986) : les formations du précambrien inférieur, les formations du précambrien moyen du Simandou et du birrimien, les grès cambriens et ordoviciens et enfin les alluvions récentes (figure 1.2). Il faut noter que les formations superficielles latéritiques recouvrent souvent la plupart de ces formations, à l'exception des alluvions récentes.

**Les terrains du précambrien inférieur** sont principalement formés de granite. Cette roche a été soumise à un dynamo-métamorphisme intens. Des coulées de dolérite, beaucoup plus récentes, ont traversé les granites suivant des directions de fracture perpendiculaires aux lignes de plissement. Des lambeaux de formations birrimiennes recouvrent par endroit le granite.

Le petit bassin de Djitiko est situé sur cette formation géologique granito-gneissique, qui couvre une partie très importante du haut bassin du fleuve Niger.

**Les formations du Simandou**, caractérisées par ses quartzites, forment une chaîne montagneuse allongée entre Milo et Dion.

**Les formations birrimiennes** ont fait l'objet de nombreuses études dont FREYSSINET (1990) a réalisé une synthèse. Suite au métamorphisme des formations birrimiennes, on retrouve tous les intermédiaires de faciès entre les schistes argileux et les micaschistes. Elles sont traversées par des venues de granite intrusif et de dolérite. En surface, les schistes se décomposent en schistes cartons très pulvérulents.

**Les formations cambriennes et ordoviciennes** sont des formations subhorizontales, représentées surtout par des grès avec des intercalations de schistes. Plusieurs types de grès sont distingués : les grès de Sikasso sont les plus anciens et se trouvent à la base des formations gréseuses; les grès de Sotuba stratigraphiquement au-dessus des précédents, constituent le lit du fleuve sur plus de 100 km à l'amont de Koulikoro et se reconnaissent facilement par leur coloration violacée; les grès de Koulouba sont à grain grossier et de couleur claire.

**Les formations alluviales récentes** sont localisées dans les vallées dont la largeur ne dépasse guère quelques kilomètres. Ces formations quaternaires, dans les lits majeurs des cours d'eau importants, comportent surtout des argiles et des limons avec des couches ou des lentilles, rarement épaisses, de sables et de graviers.

**Les formations latéritiques** recouvrent, sur de vastes étendues, les terrains précambriens, cambriens et ordoviciens.

L'altération des granito-gneiss donne des argiles latéritiques assez imperméables. Entre l'argile et la roche mère, les arènes granitiques sont assez perméables. Lorsque les argiles latéritiques sont mises à nu sur les pentes des reliefs, elles donnent lieu, en l'absence de couverture végétale importante, à des phénomènes de ruissellement bien marqués.

Sur le bassin du Niger Supérieur, les terrains birrimiens montrent les cas les plus typiques d'altération latéritique. Ces formations sont caractérisées en surface par une cuirasse latéritique dure, imperméable qui se présente sous un aspect scoriacé. La carapace proprement dite est plus colorée, plus tendre et plus perméable. L'épaisseur de la carapace atteint fréquemment plusieurs mètres. La carapace repose sur une argile bariolée latéritique, de plus en plus perméable au fur et à mesure que l'on s'approche de la roche mère. La cuirasse ou la carapace sous-jacente coiffent les sommets de la plupart des collines plates de la région de Madina, près du bassin de Djitiko. Sur le pourtour de ces collines, la carapace et la cuirasse sont plus ou moins disloquées par l'érosion. Un court escarpement domine des éboulis de blocs latéritiques qui recouvrent les pentes.

Dans ces formations latéritiques, les phénomènes d'écoulement sont toujours lents (BRUNET-MORET et al., 1986)

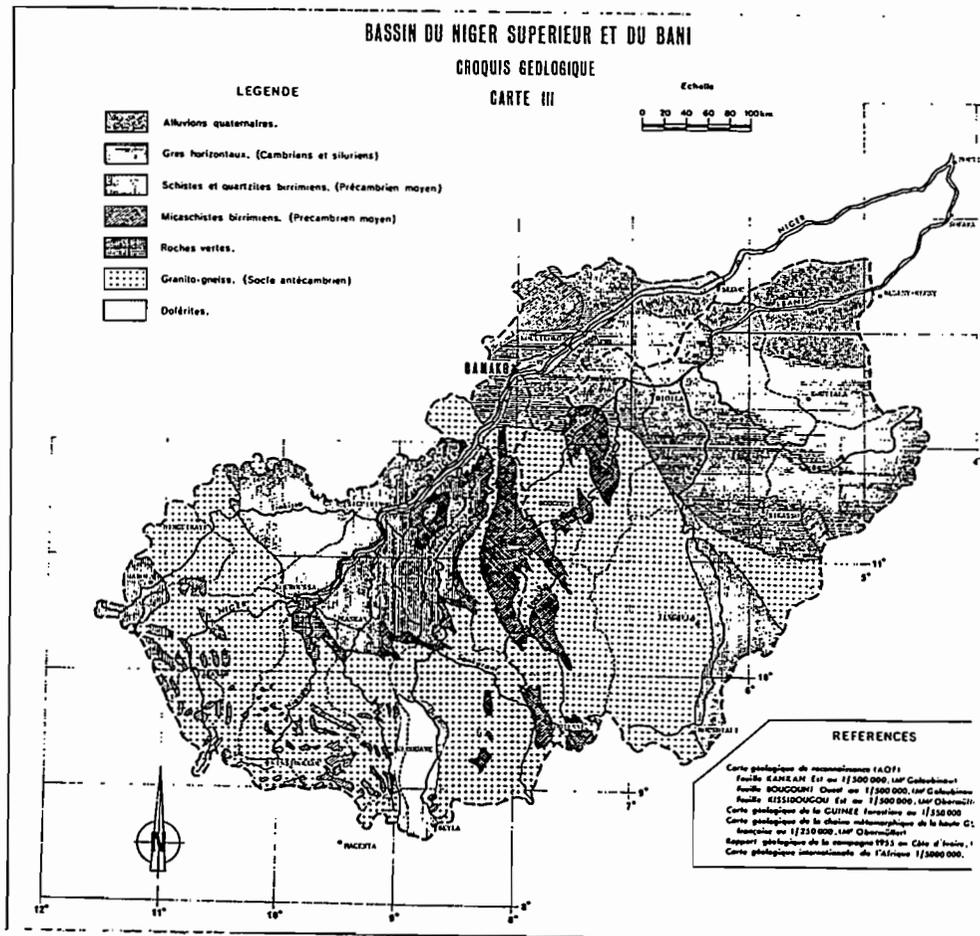


Figure 1.2 : Croquis géologique du bassin du Niger supérieur et du Bani.

### 1.1.2 Géomorphologie et relief

Le bassin supérieur du Niger, probablement individualisé au Crétacé, a été affecté vers la fin de l'Eocène par d'importantes déformations tectoniques qui se sont traduites en un mouvement de bascule : la partie amont a été soulevée, tandis que la partie aval s'est affaissée (MICHEL, 1973). L'évolution géomorphologique au cours du Secondaire et du Tertiaire a laissé des reliefs accentués que MICHEL assimile à des surfaces d'aplanissement. Selon MICHEL, ces surfaces sont au nombre de trois. Elles occupent des tranches d'altitudes différentes : la première surface se situe entre 1 150 et 1 200 m, la deuxième entre 850 et 950 m et la troisième entre 550 et 650 m. La première surface d'aplanissement est peu étendue sur le haut bassin du Niger où elle peut être observée à l'extrême ouest et sud. Le point culminant du bassin versant de Djitiko a une altitude de 583 m qui correspond à la troisième surface d'aplanissement.

Pendant le quaternaire moyen et ancien, des glaciers étagés ont été façonnés : le haut glacier (400 à 425 m), le moyen glacier (environ 380 m) et le bas glacier d'altitude nettement plus faible. Les deux premiers sont toujours cuirassés. Ces glaciers occupent de très vastes superficies dans le paysage. La plupart des cuirasses du bassin de Djitiko correspondent à ce moyen glacier. Par ailleurs, l'alluvionnement a construit des terrasses à différentes altitudes le long du réseau hydrographique des grands fleuves et de leurs affluents.

Dans la majeure partie du bassin supérieur du fleuve Niger, l'altitude est inférieure à 700 m. Le tableau 1.1 donne la répartition des reliefs sur une superficie de 120 000 Km<sup>2</sup> à Koulikoro.

Altitude (en m)	Superficie(en %)
au-dessus de 900	0,9
entre 800 et 900	1,4
entre 700 et 800	2,5
entre 600 et 700	5,9
entre 500 et 600	13,6
entre 400 et 500	43,9
entre 300 et 400	31,7
au-dessous de 300	0,05

Tableau 1.1 : Répartition des altitudes sur le bassin supérieur du Niger à Koulikoro (120 000 km<sup>2</sup>), d'après BRUNET-MORET et al. (1986)

Le petit bassin de Djitiko se situe dans la tranche des altitudes comprises entre 400 et 500 m, les plus représentées sur le haut bassin du fleuve Niger (44 % de la superficie totale).

### 1.1.3 Climat

#### Données météorologiques générales

La ligne Siguiri-Sikasso, un peu au-dessus du 11° de latitude nord, marque la limite entre les domaines climatiques guinéen au sud avec une pluviométrie annuelle supérieure à 1200 mm et soudanien au nord dont la pluviométrie est comprise entre 1200 et 600 mm. Ces deux climats sont caractérisés par deux saisons nettement tranchées : une saison sèche et une saison des pluies. Une saison sèche plus courte et moins aride caractérise le climat guinéen du climat soudanien.

En Afrique de l'Ouest, les caractéristiques climatologiques essentielles s'expliquent par le mécanisme de circulation de deux masses d'air :

- La masse d'air continentale tropicale, provenant du Sahara, se déplace vers le sud pendant la saison sèche sous l'effet des alizés continentaux appelés communément harmattan. L'harmattan souffle selon une direction générale nord-est. Cet air est sec; Il possède une température basse en hiver, une température élevée en été.

- La masse d'air équatoriale maritime circule suivant une direction sud-ouest sur le bassin supérieur du Niger. Il s'agit d'un air humide, instable et de température relativement fraîche.

Les mouvements de ces deux masses d'air sont commandés par les déplacements de l'anticyclone semi-permanent de Sainte Hélène, par la ceinture des basses pressions équatoriales et par l'anticyclone continental boréal qui couvre le Sahara en hiver, remplacé par une dépression saharienne en été. Les situations réciproques des masses d'air en présence évoluent entre les deux cas extrêmes suivants :

- En janvier, l'anticyclone saharien occupe une position centrée vers le 30<sup>ème</sup> parallèle et l'harmattan souffle en permanence.

- En juillet, au contraire, l'anticyclone saharien a fait place à la dépression saharienne et l'anticyclone de Sainte Hélène, particulièrement puissant, est remonté vers le nord. La mousson venant du sud-ouest envahit tout le bassin du Niger Supérieur.

Il y a un mouvement de bascule entre l'harmattan et la mousson qui, dans son incursion vers le nord, pénètre en coin sous le premier. La surface de contact entre les deux masses d'air, bien connue par sa trace au sol, est le front intertropical ou F.I.T. Il se déplace lentement depuis le 8<sup>ème</sup> parallèle au sud des limites méridionales du bassin, position atteinte en janvier, jusqu'au 20<sup>ème</sup> parallèle qu'il atteint en août. Le déplacement du F.I.T. vers le nord donne lieu à des formations nuageuses très importantes et à des averses orageuses.

En avril, à l'arrivée du F.I.T. sur le haut bassin du Niger, le degré hygrométrique devient élevé, il se produit des tornades sèches, mais très peu d'averses.

L'épaisseur du coin d'air humide et froid de la mousson augmente progressivement et les premières tornades ne tardent pas à tomber. C'est quand l'épaisseur atteint 2 000 m que des séries de tornades, courtes et violentes, se produisent sur des lignes nord-sud se déplaçant d'est en ouest. Chacune de ces tornades ne couvre qu'une surface assez limitée : quelques centaines de km<sup>2</sup>. Enfin, lorsque l'épaisseur de la mousson est maximale, les formations nuageuses instables de cette masse d'air donnent lieu à des pluies de caractère continu beaucoup moins intenses et durant plusieurs heures communément appelées pluies de mousson.

En septembre et octobre le F.I.T. redescend vers le sud. Ce déplacement s'effectue sans précipitations, sauf au début du mouvement.

D'octobre à avril, on n'observe pratiquement pas de pluie.

Plusieurs stations météorologiques installées dans le bassin supérieur du Niger permettent d'étudier les éléments du climat. Ces stations ont été classées selon leur régime climatique : régime tropical de transition, régime tropical pur et régime sahélien. Nous donnons ci-après, des valeurs de la pluie, des températures et des humidités de la station de Bamako qui appartient au domaine tropical pur. C'est la station météorologique la plus proche du bassin versant du Djitiko.

### Données pluviométriques

La distribution statistique des hauteurs annuelles de pluie et les variations pluviométriques saisonnières de la station de Bamako sont données dans les tableaux 1.2 et 1.3

Loi statistique	Valeur décennale humide (mm)	Valeur décennale sèche (mm)	K 3	Hauteur moyenne (mm)
Goodrich	1 326	846	1,57	1 085

**Tableau 1.2: Distribution statistique des hauteurs annuelles de pluie à Bamako (d'après BRUNET-MORET et al., 1986).**

NB : K3= coefficient d'irrégularité interannuelle (rapport des hauteurs décennales humide et sèche)

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0	0	4	19	67	142	237	330	212	63	9	1

**Tableau 1.3: Hauteurs mensuelles en mm des pluies à Bamako (d'après BRUNET-MORET et al., 1986).**

## Températures

Sur le graphique des températures à Bamako (figure 1.3), on constate un minimum en décembre ou janvier (température diurne). Il est généralement observé entre le 15 décembre et le 15 janvier.

La moyenne nocturne de janvier, la plus basse de l'année, est de  $17^{\circ} 5$ .

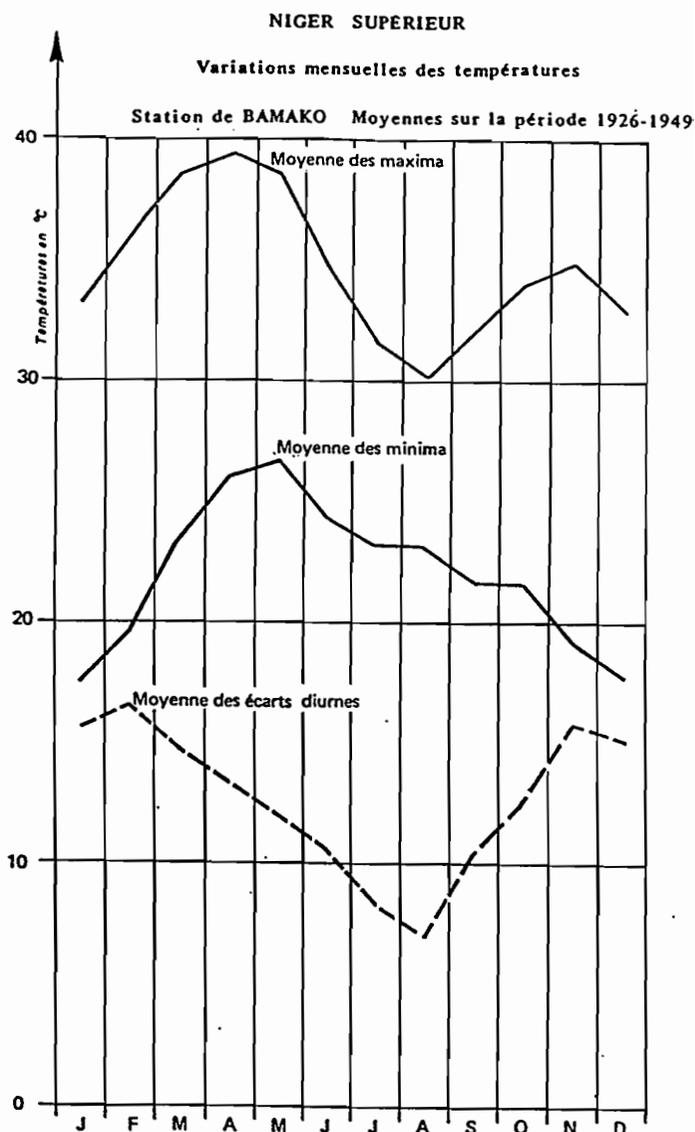
L'écart diurne est considérable. Les températures diurnes et nocturnes croissent pendant la saison sèche jusqu'en Avril.

## Hygrométrie

Le tableau 1.4 donne les valeurs caractéristiques de l'humidité relative à Bamako.

$U_{xA}$	$U_{nA}$	$U_{xF}$	$U_{nF}$	$U_{xU}$	$U_{nU}$
73%	33%	43%	10%	96%	62%

**Tableau 1.4 : Quelques valeurs de l'humidité relative à Bamako d'après (BRUNET-MORET et al, 1986)**



**Figure 1.3**

Dans le tableau 1.4 les humidités relatives sont les suivantes:

$U_x A$  : moyenne des maxima de l'année,

$U_n A$  : moyenne des minima de l'année,

$U_{xF}$  : maxima de février,

$U_{nF}$  : minima de février,

$U_{xU}$  : maxima d'août,

$U_{nU}$  : minima d'août.

#### 1.1.4 Couverture végétale

Du sud au nord, la densité du couvert végétal décroît considérablement. La bordure sud du bassin est une région d'îlots forestiers et de galeries forestières. Ailleurs, le bassin est couvert de savanes où la physionomie et la composition floristique varient dans une grande mesure en fonction de la latitude. Sous la même latitude, les caractéristiques de la végétation dépendent beaucoup de la physiographie.

La bordure sud mise à part, le bassin du haut Niger est divisé en deux entités par la latitude 10° 30' (BRUNET-MORET et al., 1986). Au sud de cette ligne, c'est la savane arborée classique ou savane boisée guinéenne type. La végétation est dense avec beaucoup d'arbres dépassant 10 m et un tapis herbacé important. Au nord de 10° 30', la savane devient beaucoup plus claire. Vers l'isohyète 1 000 mm, les espèces épineuses apparaissent dans le paysage, le tapis de graminées est moins dense et plus bas.

Dans la majeure partie des bassins du Niger supérieur et du Bani, on peut dire que la couverture végétale a une action très efficace contre le ruissellement. Elle augmente la rétention de l'eau à la surface du sol et dans la sphère végétale au-dessus du sol. Elle réduit l'importance des transports solides en freinant la progression de l'eau à la surface du sol (BRUNET-MORET et al, 1986). Ces auteurs précisent que ce constat n'est pas valable pour les zones en culture.

#### 1.1.5 Données agroécologiques

Au Mali, le bassin du Niger supérieur et du Bani est subdivisé en quatre zones agroécologiques (PIRT, 1986). Le bassin versant du Djitiko est situé dans la zone agroécologique du Haut Bani et Niger Occidental. Les caractéristiques agroécologiques ci-après données sont relatives à cette seule zone.

Les ressources en sol de la zone agroécologique du Haut Bani et Niger Occidental sont constituées à 70% par des terres arables ayant généralement une profondeur moyenne au-dessus de la cuirasse (PIRT, 1986). La texture de ces terres arables est limono-sableuse à limono-argileuse avec une forte charge graveleuse. Elles ont une faible capacité de stockage pour l'eau disponible et une fertilité naturelle moyenne. Les terres non arables sont des sols très peu profonds sur cuirasse avec une faible réserve utile. **Les risques d'érosion y sont élevés.**

Les réserves en eau de surface de la zone agroécologique du Haut Bani et Niger Occidental sont énormes (PIRT, 1986). Elles sont constituées essentiellement par celles du Niger et de ses affluents (Sankarani et Baoulé). En outre, il existe de nombreux cours d'eau intermittents dans la zone.

Les réserves en eaux souterraines sont localisées dans les fractures et les altérites affectant les granites. Elles se rechargent annuellement à partir des pluies, au rythme de 50 000 à 100 000 m<sup>3</sup> par km<sup>2</sup>.

A partir de l'étude des ressources végétales naturelles, en particulier l'analyse quantitative de la biomasse herbacée, on peut conclure que le potentiel fourrager de la zone est élevé (PIRT, 1986)

## **1.2 Caractéristiques physiques et hydrologiques du bassin versant du Djitiko**

### **1.2.1 Caractéristiques physiques**

Les premiers rapports de campagne présentés par les chercheurs de l'ORSTOM (POURRUT et DUBEE, 1962; MOLINIER, 1969) donnent les caractéristiques géographiques et physiques du bassin versant du Djitiko.

Le Djitiko, dernier affluent rive gauche de la Koba avant sa confluence avec le Niger, possède un bassin versant dont la forme générale pourrait être qualifiée de "goutte d'eau". La pointe terminale du bassin, c'est à dire l'exutoire, se trouve à Madina sur la route Bamako-Kangaba, à environ 80 km au sud de Bamako (Figure 1.4). Il se trouve à moins de 20 km de Kangaba. Il est inscrit entre les latitudes 12° 3' et 12° 11' N et les longitudes 8° 22' et 8° 27' W

Les principales caractéristiques physiques du bassin sont les suivantes :

- Superficie :	103 km <sup>2</sup>
- Périmètre :	43 km
- Coefficient de forme :	1,20
- Longueur rectangle équivalent :	14,7 km
- Largeur rectangle équivalent :	7,0 km

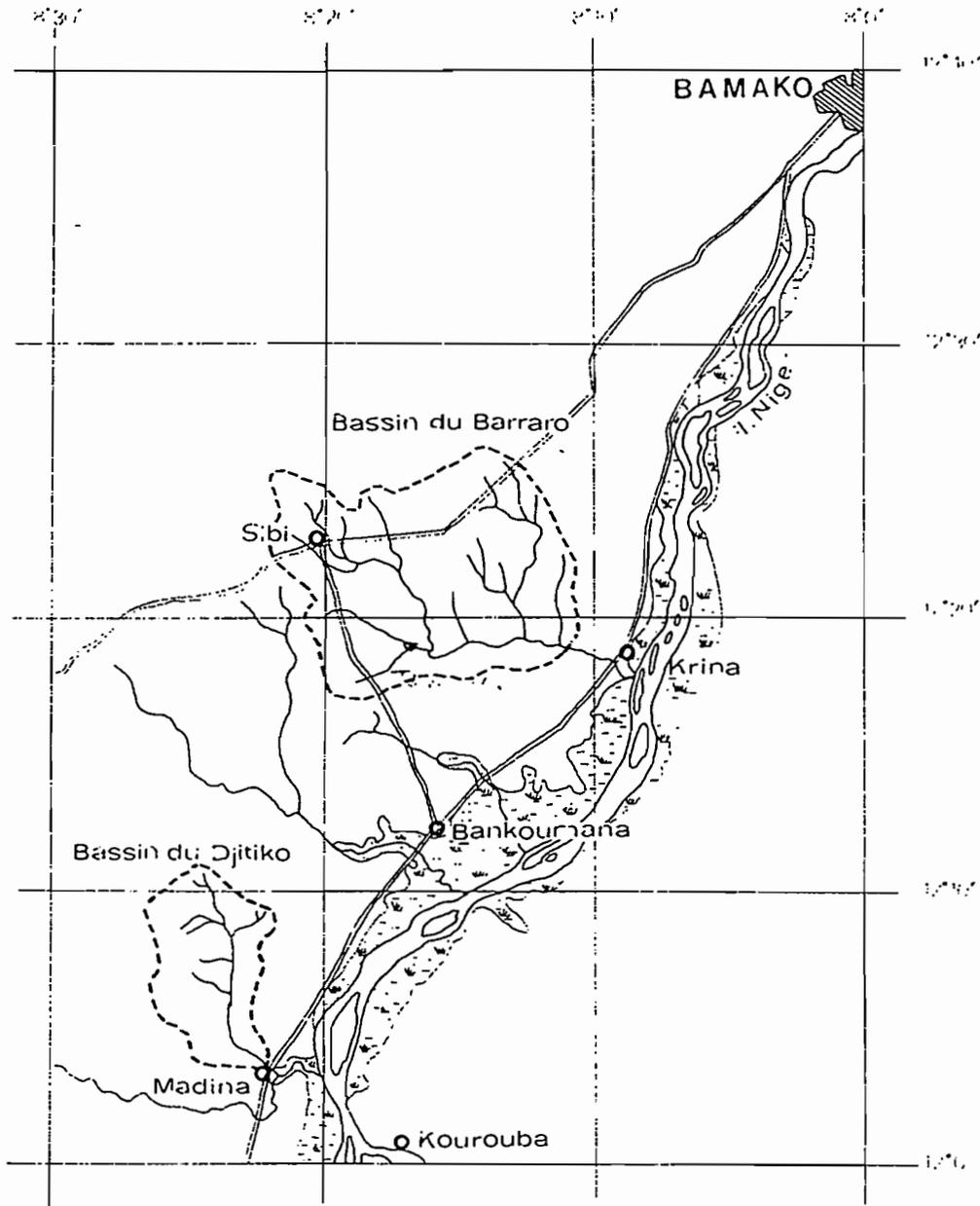


Figure 1.4 : Situation géographique du bassin de Djitiko.(Echelle 1 / 500 000)

### 1.2.2 Relief et hypsométrie

Le Kilikourou (583 m), localisé à l'ouest, est le point culminant du bassin versant. A l'est, la ligne de crête est à l'altitude 380 m. Dans l'ensemble, le bassin versant est caractérisé par la présence de glacis cuirassés décrits plus haut. Les premières études ont révélé que plus de 60 % du bassin versant se situent entre 350 et 400 m d'altitude et moins de 10 % à une altitude supérieure à cette fourchette.

### 1.2.3 Equipements et données pluviométriques et hydrologiques.

**L'équipement** d'un bassin versant expérimental doit permettre une bonne connaissance de la répartition des précipitations et la mesure des écoulements à l'exutoire. Pour les précipitations, il s'agit essentiellement d'estimer les valeurs moyennes à l'échelle du bassin versant ou de sous-bassins afin de rechercher les relations entre les précipitations, le ruissellement, l'érosion, l'humidité du sol et éventuellement les écoulements souterrains (NOUVELOT, 1993). Cet auteur donne, à partir des expériences des chercheurs de l'ORSTOM en zone intertropicale, des normes d'équipement. Pour un bassin versant de la taille du Djitiko (100 km<sup>2</sup>), le nombre requis d'appareils, tous types confondus (pluviomètres, pluviographes ou totaliseurs) serait de 20 à 25.

Pour la connaissance du régime hydrologique d'un marigot, la mesure en continu des débits est absolument nécessaire. Une station hydrométrique sur petit bassin versant expérimental comprendra donc : une station limnimétrique équipée d'échelles et d'un enregistreur automatique des variations des niveaux d'eau et une station de mesure des débits équipée d'un dispositif adéquat. Pour les mesures de débit au moulinet, la station sera équipée d'une passerelle de jaugeage ou d'un téléphérique.

En 1960, le bassin versant du Djitiko était équipé de 7 pluviomètres, d'une échelle limnimétrique et d'un limnigraphe (figure 1.6 ). Cet équipement a permis une première série de mesures en 1960, puis en 1968. L'équipement comprend actuellement, en 1994 et 1995, 5 pluviomètres, 3 pluviographes et 1 pluviomètre totaliseur. Leur répartition n'est pas très différente la première. Le niveau d'équipement reste nettement inférieur à la norme indiquée par NOUVELOT pour les petits bassins versants expérimentaux.

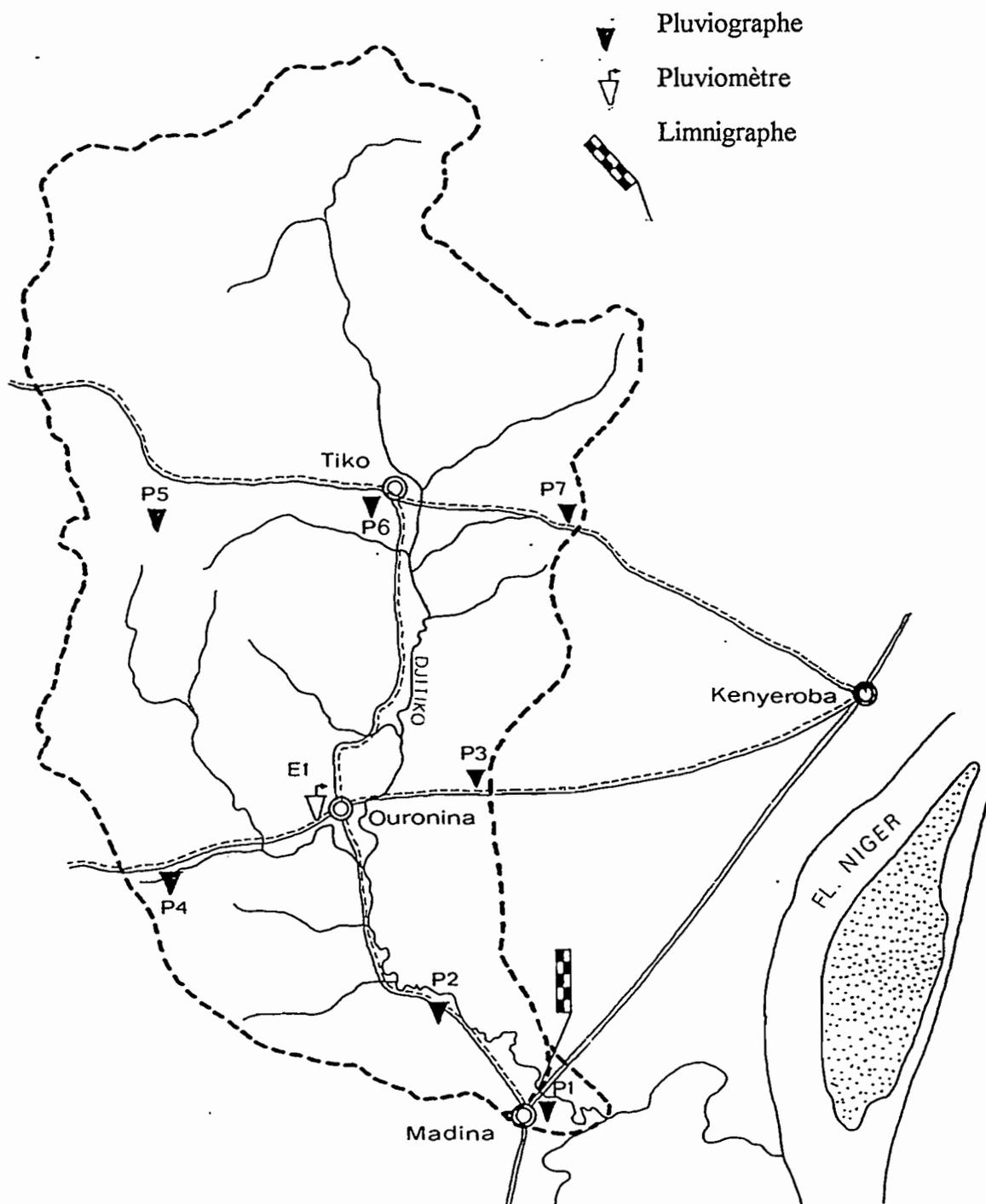


Figure 1.5: Répartition des stations de mesure sur le bassin de Djitiko.

### Les données pluviométriques

Des relevés pluviométriques ont été réalisés sur le bassin versant de Djitiko en 1960, 1968, 1969 et plus récemment en 1994. Les premiers hydrologues ayant travaillé sur le bassin versant ont traité les données antérieures à 1970 en prenant également en compte les données disponibles dans les stations les plus proches (Bamako, Bancoumana et Kangaba).

Mois	1960 *	1968 *	1994**
Mai			123,1
Juin	162	83	123,3
Juillet	391	328	225,7
Août	286	175	195,8
Septembre	277	148	243,0
Octobre	50	71	89,0
Total	1 166	805	999,9

\* Valeurs moyennes mensuelles à Madina d'après la méthode de THIESSEN

\* \* Moyennes des relevés aux 4 pluviographes du bassin.

Tableau 1.6 : Pluviométries mensuelles du bassin versant du Djitiko.

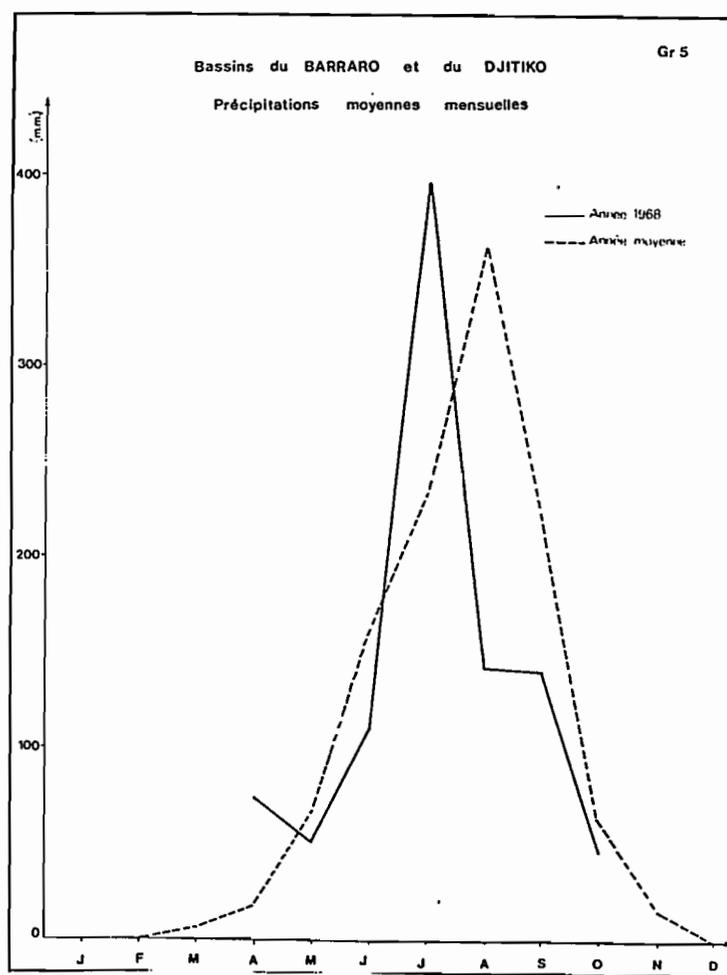


Figure 1.5 Précipitations moyennes mensuelles sur le bassin de Djitiko en 1968.

Figure 1.5 Précipitations moyennes mensuelles sur le bassin de Djitiko en 1968.

### Données hydrologiques

Des mesures de débit ont été effectuées :

- en 1960 avec 29 jaugeages entre les cotes 0,12 m et 2,41 m,
- en 1968 avec 62 jaugeages entre les cotes 0,20 et 1,34 m.

Les débits moyens journaliers enregistrés au cours de la campagne 1968 sont donnés sur la figure 1.6.

Le Djitiko est un cours d'eau temporaire qui tarit complètement à la fin de la saison pluvieuse. En 1968 par exemple, la première manifestation d'un écoulement à Madina a lieu le 3 juillet à 3h30 du matin, le tarissement se produisant 20h plus tard. C'est vers la fin de juillet et le début d'août que l'écoulement continu commence. L'étiage nul fut constaté vers le 5 novembre.

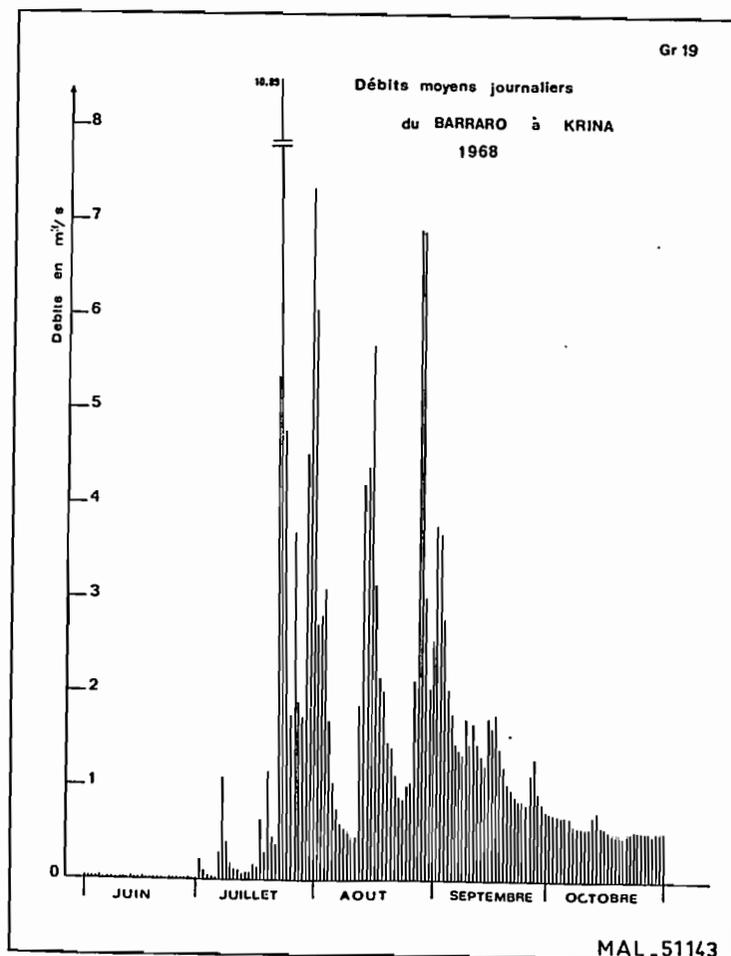


Figure 1.6 : Débits moyens journaliers du marigot de Djitiko en 1968.

## **Deuxième partie**

### **Caractérisation des couvertures pédologiques du bassin versant du Djitiko**

## 2.1 Le concept de 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). De la notion du sol évoluant sous l'action de facteurs externes (relief, végétation, ruissellement,...), on est progressivement venu à la notion de couverture pédologique faisant partie intégrante de l'écosystème (RUELLAN et DOSSO, 1993). La couverture pédologique influence profondément le fonctionnement et les transformations de l'écosystème et du relief, avec lesquels elle se développe.

Les constituants, de natures minérale et organique, de la couverture pédologique sont présents à l'état solide, liquide et gazeux. Ils sont organisés entre eux, formant ainsi des "structures" spécifiques du milieu pédologique. Les couvertures pédologiques sont en perpétuelle évolution, ce qui leur donne une dimension supplémentaire : la durée.

## 2.2 Quelques aspects méthodologiques de l'étude des couvertures pédologiques

De fait, le fondement de toute étude des sols, quels qu'en soient les objectifs (agriculture, forêts,, aménagements, hydrologie, travaux publics,...) doit être la connaissance des structures pédologiques, de leurs propriétés, de leurs fonctionnements, de leur histoire, de leurs rôles dans le fonctionnement et le comportement des sols en fonction des conditions de leur utilisation : c'est l'analyse structurale de la couverture pédologique (RUELLAN et DOSSO, 1993). Ces auteurs ajoutent qu'il a été démontré en particulier que :

- la fertilité et les conditions d'utilisation d'un sol sont largement fonctions de ses caractères morphologiques;
- les diagnostics de comportement et de fertilité ne peuvent être sérieusement découverts et évalués qu'au travers d'une observation détaillée de leur anatomie;
- cette observation détaillée doit être le préalable nécessaire à toute décision d'intervention.

En conséquence, il est important d'examiner la morphologie d'un sol avant d'envisager, si nécessaire, la réalisation d'analyses de nature chimique par exemple.

### **Objectifs et démarche dans la description des sols.**

Une description pédologique peut s'inscrire dans toutes sortes d'études relatives au milieu naturel lesquelles peuvent avoir des objectifs très variés (BAIZE et JABIOL, 1995). Les

décisions du descripteur devront être adaptées aux spécificités de l'étude (BAIZE et JABIOL 1995) par le choix :

- des points d'observation ,
- des moyens d'observation (tarière, pioche, grande fosse),
- des caractères décrits et de ceux que l'on négligera volontairement,
- des référentiels employés,
- des fiches de relevés normalisées.

Ces auteurs précisent qu'une description pédologique peut se situer dans les quatre types de démarches méthodologiques ci- après :

**Cas 1** : une campagne de relevés est destinée à définir une typologie d'horizons, de solums, ou établir des corrélations sols/végétation.

**Cas 2** : la description est destinée à caractériser une unité précédemment définie.

**Cas 3** : un relevé rapide d'un ou de quelques paramètres du solum doit permettre d'affecter immédiatement celui ci à une typologie définie précédemment.

**Cas 4** : l' " analyse structurale" qui consiste à étudier de façon approfondie les " structures d'une couverture pédologique en termes d'horizons et/ou de caractères. Cette étude très spécialisée peut permettre d'acquérir des connaissances sur le fonctionnement saisonnier et l'évolution à long terme.

Dans le cadre d'une étude hydrodynamique, la description du sol se justifie pour 3 raisons majeures (CASNAVE et VALENTIN, 1989) :

- La porosité superficielle peut être ouverte à la faveur d'une forte activité faunique ou d'un grand couvert végétal ou fermée en présence de réorganisation pelliculaire (croûte à porosité vésiculaire). Dans ce cas, les propriétés hydrodynamiques des horizons pédologiques interviennent sur l'infiltrabilité.

- Il existe parfois, à faible ou moyenne profondeur, une discontinuité pédologique : apparition d'une cuirasse, d'un horizon continu argileux ou d'un horizon anthropique (semelle de labour par exemple). Ces obstacles diminuent les intensités d'infiltration même en l'absence de croûte en surface.

- Enfin, l'étude conjointe des états de surface et du sol fournit la possibilité d'établir certaines relations dont la mise en évidence s'avère utile lors des études cartographiques ou de dynamique évolutive.

### **Les analyses de laboratoire**

Elles sont envisagées dans le but d'avoir des informations plus précises sur les constituants des structures pédologiques et leur organisation. Les méthodes utilisées sont

chimiques, électrochimiques et physiques. Ces méthodes sont souvent décrites dans les traités de Pédologie et surtout dans les recueils d'analyse de sol disponibles dans les laboratoires spécialisés.

### **La cartographie pédologique**

Initialement préoccupés par la notion ponctuelle de sol (profil), les pédologues furent par la suite amenés à circonscrire sur le terrain des ensembles de profils identiques, élargissant ainsi leur démarche avec le souci de relier entre elles les observations comparables et d'effectuer les coupures indispensables quand des variations importantes étaient constatées (INRA Montpellier, 1972). La connaissance des sols implique l'étude de leurs propriétés essentielles, de leur comportement et de leur distribution dans le paysage (JAMAGNE, 1994). Le problème d'échelle, en cartographie pédologique, est résolu en fonction des objectifs poursuivis ( planification nationale ou régionale, aménagement parcellaire, etc).

### **2.3. Démarche utilisée pour la caractérisation des couvertures pédologiques du Djitiko**

Nos études des couvertures pédologiques ont porté essentiellement sur des descriptions morphologiques. L'utilisation de photographies aériennes à 1/50 000 a permis l'établissement d'une esquisse morphopédologique du bassin versant.

La disponibilité d'informations sur les solums nous a conduit à situer notre démarche descriptive dans le cas 3 ci-dessus . Ces informations sont essentiellement les caractéristiques des unités sol-végétation (PIRT 1982), les résultats d'enquêtes effectuées auprès des paysans en association aux caractérisations des types de sols (KEITA, 1989; DIALLO et KEITA, 1992) . Le travail a donc consisté à relever rapidement quelques caractères des solums des différents modelés préalablement identifiés en vue de leur rattachement à des typologies connues.

La caractérisation des sols a été faite en même temps que la description des états de surface. Des transects ont été choisis de manière à couvrir au maximum le bassin versant et les différentes unités de paysage. Les descriptions ont été possibles en faisant des sondages à la tarière, en observant les puits creusés par les populations et les cavités naturelles.

Nous avons retenu comme critères de distinction des sols la profondeur du solum, la couleur, la texture.

Au point de vue profondeur du solum, les normes retenues ont été :

- profondeur inférieure à 40cm, sol peu épais
- profondeur comprise entre 40 et 80 cm, sol moyennement épais

- profondeur supérieure à 80 cm, sol épais

Pour la détermination des couleurs, le code Munsell a été utilisé de façon systématique. Les tests ont seulement porté sur des échantillons humides, le faible temps disponible ne nous a pas permis d'en faire à l'état sec.

La texture a été faite selon la méthode tactile sur le terrain. Elle n'est pas précise en comparaison avec les méthodes de laboratoire. Cependant, elle nous a été très utile dans la comparaison des sols aux typologies déjà connues dans la région.

## **2.4 Les sols inventoriés**

### **2.4.1 Description**

#### **Sol caillouteux peu épais**

Il est observé sur les versants plus ou moins abrupts des collines, en amont des sols argileux profonds. La fraction grossière (plus de 50% du matériau) est formée de débris de roches (granite, dolérite, schiste) et de blocs de nature ferrugineuse. Au delà de 20 cm de profondeur, on note la présence de la roche à un stade d'altération plus ou moins avancé. La terre fine de ces sols est de texture limono-sableuse en surface et limono-argilo-sableuse en profondeur.

Ce sol semble beaucoup intéresser les paysans comme l'attestent les nombreuses parcelles de culture, notamment de sorgho. Deux facteurs principaux pourraient expliquer cette situation :

- La richesse chimique probable de ces sols à cause de la présence de roches basiques à différents stades d'altération.

- La relative facilité de contrôle des adventices (un des goulots d'étranglement des agricultures soudano-sahéliennes) en milieu rocheux dans un contexte d'agriculture manuelle.

#### **Sol argileux profond**

Il est localisé en contrebas des collines dont l'altitude atteint 500 m. Le modelé topographique est légèrement concave. Dans l'ensemble du profil, le matériau est fin (plus de 40 à 50% d'argile). La couleur de la matrice est olive brunâtre. Des nodules calcaires sont observées dans le profil, aux environs de 100 cm de profondeur. Le sol semble avoir une bonne aptitude agricole (sol développé sur substratum basique) et les paysans sont de cet avis. Les cultures installées sont le plus souvent variées : sorgho, maïs, arachide. Dans les zones cultivées, on constate la présence de ravines.

### **Sol graveleux peu épais**

Ce sol est localisé sur les bas plateaux cuirassés que nous avons assimilé au moyen glaciaire défini par MICHEL et dont il a été question dans les caractéristiques régionales (première partie). Les caractéristiques morphologiques du sol permettent de le rattacher à l'unité TC5 de l'Atlas des Ressources Terrestres au Mali (PIRT, 1982). La profondeur du sol est généralement inférieure à 20 cm. Au delà, on observe la cuirasse en dalle qui affleure par endroit. Le taux de gravillons atteint 50 à 60%. En plus cailloux et blocs ferrugineux se mélangent à la terre fine dans des proportions variables selon les endroits. La terre fine est limono-sableuse. D'après les analyses effectuées sur ce type de sol dans le Haut Bani Niger Occidental (DIALLO et KEITA, 1992) où se situe le bassin du Djitiko, le taux d'argile dans la terre fine est inférieure à 20% dans l'horizon de surface et supérieure à 30% dans l'horizon sous-jacent. Le pH eau, voisin de 6 en surface, tombe à 5,5 dans la 2<sup>ème</sup> partie du profil.

Ici, le sol graveleux de faible épaisseur n'est pas cultivé. La forte disponibilité en terre permet aux paysans de se passer de ces zones marginales.

### **Sol jaune moyennement épais**

Il est situé au contrebas immédiat des bas plateaux cuirassés, sur le bas glaciaire induré ainsi la partie amont des autres variantes du bas glaciaire. Le sol a une profondeur voisine de 75 cm en moyenne. La texture est limono-sableuse en surface et limono-argileuse en profondeur. Parfois, on observe de nombreuses taches d'oxydation de fer à la base du profil, attestant un engorgement temporaire du sol. Cette caractéristique hydrique favorise la coloration beige de la matrice du matériau dans les horizons pédologiques observés.

D'après les mesures de pH effectuées sur les sols de la région, le sol jaune induré à moyenne profondeur présente dans tous les horizons un pH eau inférieur à 5,5 et un pH KCl voisin de 4,2 (DIALLO et KEITA, 1992).

Dans le bassin versant, la mise en culture du sol jaune induré à moyenne profondeur n'est pas généralisée. Il existe seulement quelques parcelles de sorgho et de riz pluvial dans la zone de contact avec le sol beige. Il semblerait que l'affectation du sol à la riziculture a considérablement régressé au cours de la dernière décennie, une conséquence des faibles pluviométries annuelles de la période 1970- 1990.

### **Sol beige épais**

Sa position topographique est basse. La partie inférieure du profil du sol présente un mauvais drainage d'où les nombreuses taches d'oxydation du fer. La texture est limono-sableuse dans le premier horizon (0-10 cm) puis variable, du limon argileux à l'argile limoneuse. Sa position topographique, sa profondeur considérable et ses caractéristiques granulométriques sont favorables à une bonne capacité de rétention de l'eau pour les cultures. C'est un sol très cultivé (sorgho, maïs, coton). La pression sur ce sol deviendra probablement forte avec le développement de la culture cotonnière. En effet, le sol, en raison de ses caractéristiques, offre les meilleures conditions d'intensification exigées par la culture industrielle du coton. Les populations locales semblent être conscientes de cette réalité et l'essentiel des superficies cotonnières actuelles sont recensées sur ce type de sol.

### **Sol rouge épais**

Il est développé sur le bas glacis incliné vers le marigot Djitiko, principalement dans la partie aval du bassin versant. La couleur rouge est très caractéristique, elle apparaît dès la surface. Le drainage est bon à l'extérieur et à l'intérieur du profil pédologique. La texture est limono-sableuse en surface et argilo-sableuse en profondeur.

### **Sol épais sur alluvions actuelles**

Ce type de sol existe dans les endroits où le Djitiko présente un lit majeur relativement large (environ 50 m). La forme dépressionnaire favorise l'accumulation des matériaux transportés par le marigot.

Le sol est en général profond et présente une texture fine. Il est utilisé pour la riziculture et l'arboriculture.

## **2.4.2 Rattachement des sols à des systèmes existants**

Un essai de rattachement des sols inventoriés à des classifications a été jugé nécessaire. Le rattachement à un système général pré-existant permet d'établir des corrélations entre différents endroits, régions ou pays (BAIZE et JABIOL, 1995). Ces auteurs, en discutant des modalités du rattachement ont évoqué le Référentiel Pédologique (1992). Ils pensent qu'il ne convient plus désormais d'employer la classification de 1967 dite "CPCS" ou "Classification Française". Le rattachement consiste à relier un solum à une ou plusieurs Références puis à lui donner le (s) nom (s) correspondant (AFES, 1992; BAIZE et JABIOL, 1995). Cela se fait par un raisonnement pédologique qui est du même ordre que celui effectué lors de l'interprétation des horizons.

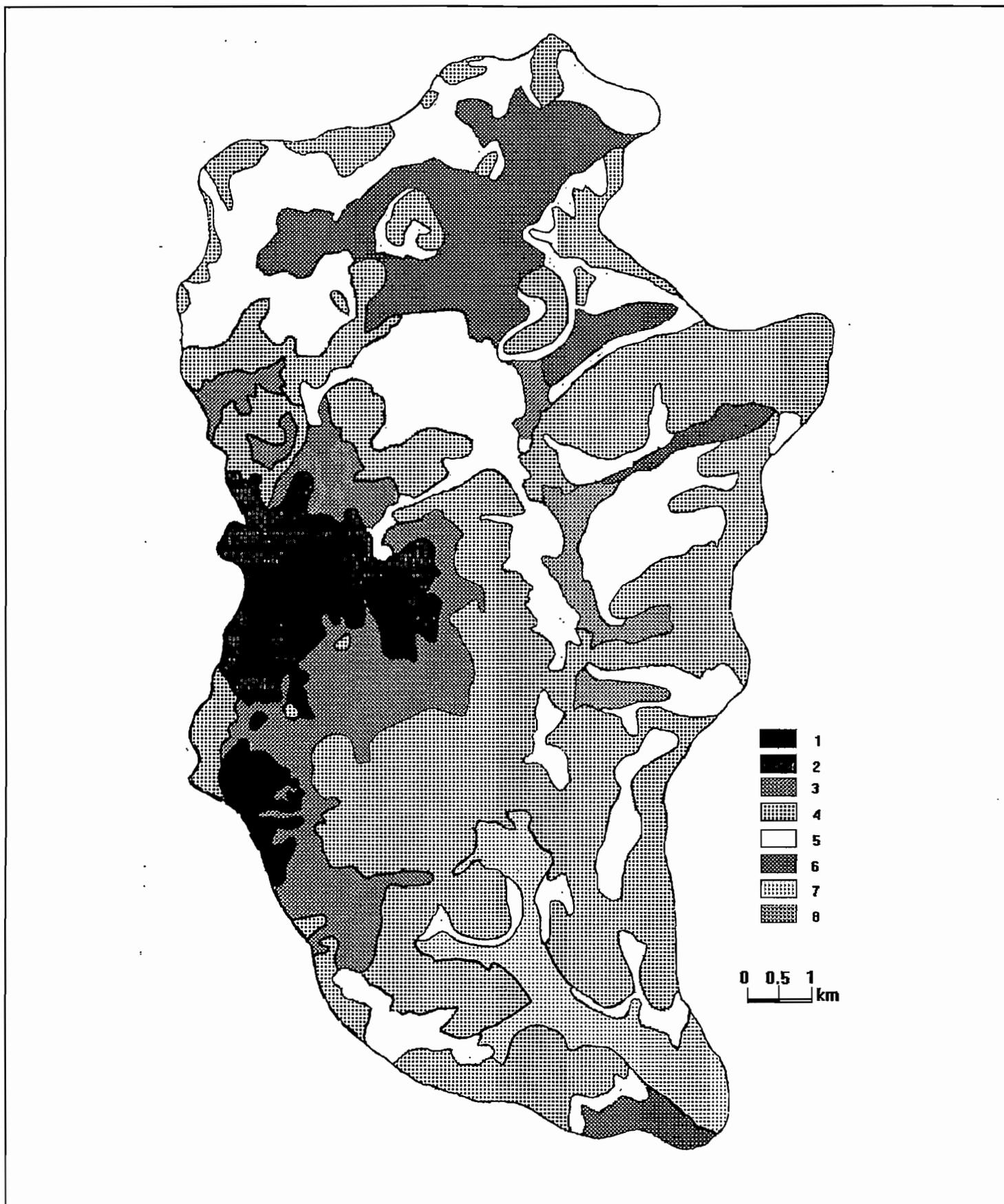
Malgré ce qui est dit plus haut , nous avons fait le rattachement des sols identifiés à la classification dite "CPCS", la position des sols tropicaux dans le Référentiel Pédologique (1992) n'étant pas encore définie (AFES, 1992). Par ailleurs, nous avons fait référence à la classification paysanne des malinkés du Haut Bani Niger Occidental ( DIALLO et KEITA, 1992).

Désignation utilisée dans l'étude	Désignation dans la classification CPCS; 1967	Désignation dans la classification paysanne des malinkés du Haut Bani Niger Occidental
1- Sol caillouteux peu épais	Sol peu évolué d'érosion	<i>Kuru dugukolo</i>
2- Sol argileux épais	Sol brun eutrophe	<i>Bogo dugukolo</i>
3- Sol graveleux peu épais	Lithosol	<i>Bèrè dugukolo</i>
4- Sol jaune moyennement épais	Sol ferrugineux tropical lessivé induré	<i>Bilin</i>
5- Sol beige épais	Sol hydromorphe à pseudogley	<i>Bida dugukolo</i>
6- Sol rouge épais	Sol ferrugineux tropical lessivé modal	<i>Cincin dugukolo</i>
7- Sol épais sur alluvions actuelles	Sol hydromorphe à gley	<i>Fara dugukolo</i>

Tableau 2.1 : Les sols et leur classification

#### 2.4.3 Répartition spatiale des couvertures pédologiques

Pour rendre compte de la répartition spatiale des couvertures pédologiques du bassin versant, une esquisse cartographique de type morphopédologique a été établie à 1/50 000 (figure 2.1). Nos investigations n'ayant pas la prétention d'être fines, les unités cartographiques peuvent être homogènes au point de vue relief, mais non au point de vue sol. Pour ces raisons nous parleront plutôt de sol dominant au sein des unités cartographiques. Les superficies des unités cartographiques et leur proportion dans le bassin versant sont données dans le tableau 2.2



**Figure 3.4 : Bassin de Djitiko. Carte morpho-pédologique**

**u1** : Colline à affleurements rocheux  
**u3** : Dépression autour des collines, à sol argileux épais  
**u5** : Bas glacis induré, à sol jaune moyennement épais  
**u7** : Bas glacis à bon drainage, à sol rouge épais

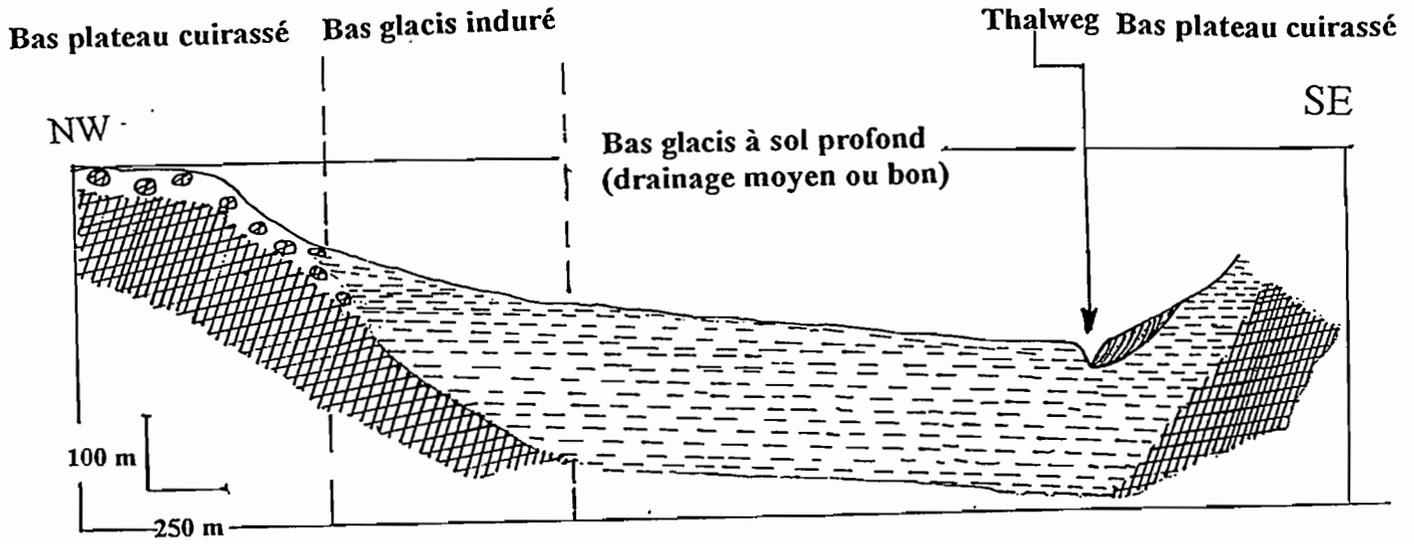
**u2** : Versant fortement incliné, à sol caillouteux peu épais  
**u4** : Bas plateau cuirassé, à sol graveleux peu épais  
**u6** : Bas glacis à drainage moyen, à sol beige épais  
**u8** : Dépôts alluviaux actuels, à sol épais

N°	Unité cartographique	Sol dominant	Superficie (ha)	Proportion dans le bassin (%)
1	Colline rocheuse	Affleurement rocheux	387,50	3,76
2	Versant fortement incliné	Sol caillouteux peu épais	575	5,58
3	Dépression autour des collines	Sol argileux épais	1142,50	10,02
4	Bas plateau cuirassé	Sol graveleux peu épais	4132,50	40,12
5	Bas glacis induré	Sol jaune moyennement épais	2339,50	22,80
6	Bas glacis à drainage moyen	Sol beige épais	1250	12,12
7	Bas glacis à bon drainage	Sol rouge épais	452,501	4,39
8	Depôts alluviaux actuels	Sol épais sur alluvions actuelles	125	1,21

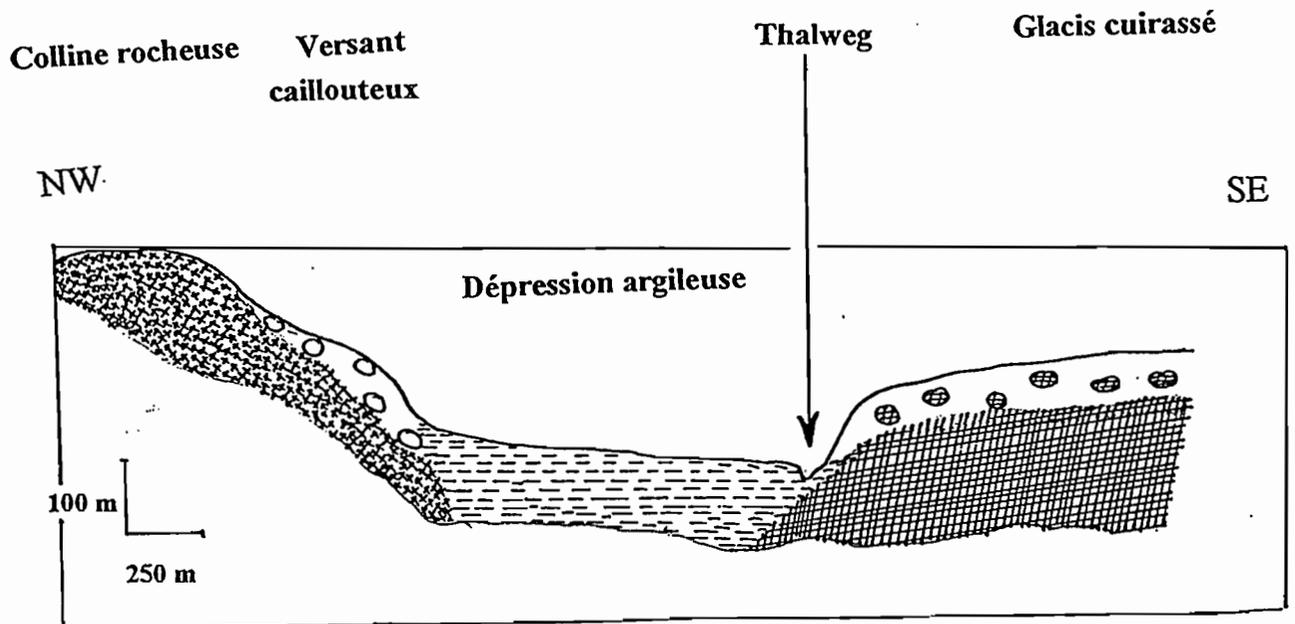
Tableau 2.2 : Superficie des unités cartographiques du bassin du Djitiko

Les unités cartographiques sont distribuées dans le bassin versant le long de deux types principaux de toposéquence (figure 2.2)

Figure 2.2 : Toposéquences schématiques du bassin versant du Djitiko



a. Type 1



b. Type 2

### **Troisième partie**

## **Caractérisation des états de surface du bassin versant du Djitiko**

### 3.1 La cartographie des états de surface

La cartographie des états de surface 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 (CASENAVE et VALENTIN, 1989).

#### 3.1.1 Méthodologie

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.

#### Cartographie par photo-interprétation

La cartographie des états de surface par interprétation de photographies aériennes a été développée par C. Valentin sur de nombreux bassins versants d'Afrique de l'ouest (CASENAVE et VALENTIN, 1989).

La cartographie des états de surface par photo-interprétation des images satellitaires a été développée en zone sahéenne sèche, dans la région d'Oursi au nord du Burkina Faso, par J.M. LAMACHERE (1987). Celui-ci a établi manuellement la carte des aptitudes au ruissellement et à l'infiltration des sols de la région d'Oursi avant de procéder à une analyse numérique des images SPOT (DEVINEAU et al., 1991).

La procédure de cartographie par photo-interprétation commence par un travail préliminaire d'identification, sur la photo ou la composition colorée, des zones aux caractéristiques identiques. Pour cela, on s'appuie sur la couleur (nature, intensité, texture). A ce stade, l'esquisse cartographique permet d'établir un plan d'échantillonnage au sol en vue de la phase de description au sol. Sur le terrain, tous les points d'observation, les lignes ou les sections, doivent être repérés sur la photographie ou sur la composition colorée. Les relations établies entre les points, les lignes ou les sections, et les types de grisé (cas de la photographie aérienne) ou l'agencement des couleurs (cas de la composition colorée), doivent être énoncées clairement sur un tableau. Cette clef d'interprétation permet de dresser le document cartographique.

## **Cartographie par analyse numérique des images satellitaires**

Dans le domaine de l'hydrologie, l'analyse numérique des images satellitaires a été appliquée par C. PUECH à des bassins versants du Burkina Faso et du Sénégal (PUECH, 1993; LAMACHERE et PUECH, 1995).

Deux méthodes ont été proposées par ces auteurs. Une première méthode consiste à établir trois cartes thématiques (sols, végétation, cultures) servant à la réalisation d'une carte des unités hydrologiques homogènes caractérisées par leurs états de surface. Les traitements des images sont réalisés en utilisant la description au sol des couvertures végétales, des types de sols et des zones de culture. La description sur le terrain de la répartition des types de surfaces élémentaires sert ensuite à caractériser chaque unité hydrologique dans sa composition en surfaces élémentaires types. Une variante de cette méthode consiste à remplacer un des 3 plans par un Modèle Numérique de Terrain. C'est la solution adoptée par M. ESTEVES, dans le cadre du projet FAO / CIEH-ORSTOM-CEMAGREF, pour cartographier les unités hydrologiques homogènes du bassin versant du Kuo situé en zone soudanienne au sud-ouest du Burkina Faso, dans une région où le couvert végétal masque la surface du sol.

La seconde méthode, utilisée par C. PUECH (1993), consiste à utiliser directement les descriptions de terrain décrivant la répartition des types de surfaces élémentaires. On réalise ainsi ce que PUECH appelle un décodage secondaire des images satellites en produisant directement une carte des états de surface.

## **L'échantillonnage au sol des unités cartographiques**

### *Approche systématique*

Elle consiste à décrire le milieu selon un maillage rigide. Cette méthode réclame du temps mais peu d'expérience. Elle permet d'acquérir des données fiables sans grand risque d'erreur. Par ailleurs, la forte densité d'observation rend possible la réalisation de cartes thématiques très précises.

### *Approche par échantillonnage*

Cette voie est commune à la plupart des naturalistes. Elle est plus rapide que la précédente mais requiert une certaine technicité. Les techniques de description ont eu tendance à se normaliser (CASENAVE et VALENTIN, 1989) et les techniques d'échantillonnage à se diversifier.

L'échantillonnage peut se faire en suivant ou non la toposéquence, par section, ligne ou par point (LAMACHERE et PUECH, 1995). **La section** est une bande au sol, linéaire ou brisée, de longueur maximale 1,5 à 2 km et de largeur 100 m. **La ligne** est une bande au sol, rectiligne, de longueur maximale 300 m à 1 km et de largeur 20 m. **Le point** est une aire de forme circulaire de diamètre 40 à 50 m. Les modes d'échantillonnage par section et ligne sont

mieux indiqués dans le cas d'une cartographie par analyse numérique des images satellitaires, alors que l'échantillonnage par point est suffisant pour une cartographie manuelle des états de surface.

En milieu sahélien, la prospection peut se faire entièrement en véhicule tout terrain. Ce n'est pas le cas en zone de savane humide où le couvert végétal s'oppose par endroits au passage du véhicule, d'où la nécessité de déplacements supplémentaires à pied.

En l'absence de photographies aériennes récentes et de bonne qualité ou de compositions colorées d'images satellitaires, la prospection s'effectue selon une densité plus forte de toposéquences. Cela permet d'établir d'éventuelles relations entre les états de surface et la topographie. Dans tous les cas, le cheminement s'accompagne du relevé des discontinuités d'états de surface, et d'une description systématique au sol le plus souvent distribués selon des intervalles réguliers.

La densité d'observation varie en fonction des facteurs ci-après :

- la qualité des documents disponibles : photographies aériennes, carte topographique détaillée, etc.,
- le type de paysage : la couverture végétale, le degré de mise en culture, etc.,
- enfin l'équation personnelle du cartographe : un pédologue spécialiste des états de surface aura besoin de moins d'observations qu'un débutant.

### ***Le choix d'un échantillon exhaustif***

L'échantillon exhaustif est celui qui couvre au moins une fois l'ensemble des types de paysage de la région et plusieurs fois les paysages les plus fréquents (LAMACHERE, 1995). La première phase de photo-interprétation doit permettre à l'opérateur de définir des unités paysagiques qui seront échantillonnées en fonction de leur importance régionale ou locale. Cet auteur précise la taille de l'échantillon exhaustif, en fonction du mode d'échantillonnage et de la taille des bassins versants: 20 sections, ou 30 lignes ou 200 points suffisent généralement à décrire de manière satisfaisante les différentes unités cartographiques d'un bassin versant de 100 à 200 km<sup>2</sup>.

### **Mise en ordre des relevés**

La description des unités cartographiques nécessite d'identifier les caractéristiques communes à plusieurs points d'observation, à plusieurs lignes, à plusieurs sections ou à différents morceaux de sections.

La première phase consiste à établir un fichier descriptif des points, des lignes et des sections mettant en évidence leurs principaux caractères : couvert végétal, pourcentages de sols cultivés, type de sol, répartition des types de surfaces élémentaires. Il est alors possible de regrouper les points, les lignes ou les parties de section les plus semblables. Cette opération

peut être automatisée : une analyse en composantes principales facilite l'identification des groupes. Le nombre de ces derniers est en général incompatible avec une représentation cartographique simple.

En conservant le nombre de groupes établis après dépouillement des relevés de terrain, les unités seraient trop petites pour être dessinées aux échelles habituelles (1/50.000 ou 1/30.000). Il convient par conséquent, de condenser encore l'information en associant plusieurs groupes au sein de la même unité.

### **Description des unités cartographiques**

Chaque unité cartographique doit être définie finalement en fonction de son aptitude au ruissellement et à l'infiltration. Pour définir ainsi les unités, il faut recourir aux relations entre la description du milieu et l'aptitude des sols au ruissellement et à l'infiltration. Il faut donc recourir à la description des états de surface par l'évaluation de leur composition en surfaces types élémentaires.

En zone aride et semi-aride, on privilégiera la description des formations pédologiques superficielles (croûtes) qui conditionnent très fortement l'aptitude des sols nus à l'infiltration.

En zone de savane sèche, on associera la description des formations pédologiques superficielles à la description du couvert végétal, principalement le couvert végétal herbacé.

En zone de savane humide (bassin versant de Djitiko) on observera surtout les types de sols et le couvert végétal. Ces deux éléments, complétés par la reconnaissance des zones cultivées et des modes culturels, jouent des rôles fondamentaux sur l'aptitude des sols à l'infiltration. Dans cette zone la pratique ancestrale des feux de brousse provoque annuellement une destruction complète du couvert herbacé qui se renouvelle complètement après 2 à 3 mois d'épisodes pluvieux.

### **3.1.2 Application au bassin versant du Djitiko**

#### **Cartographie des états de surface par photo-interprétation**

La cartographie des états de surface du bassin versant du Djitiko a été faite manuellement par interprétation de photographies aériennes. Une couverture à 1/50.000, datant de 1974 a été utilisée à cette fin. Les autres documents cartographiques de base ont été la carte topographique à 1/200.000 (feuille Bamako-Ouest) et la carte topographique établie à l'échelle 1/50.000 pour le modèle mathématique du fleuve Niger. Ce dernier document ne couvre qu'une partie du bassin versant de Djitiko.

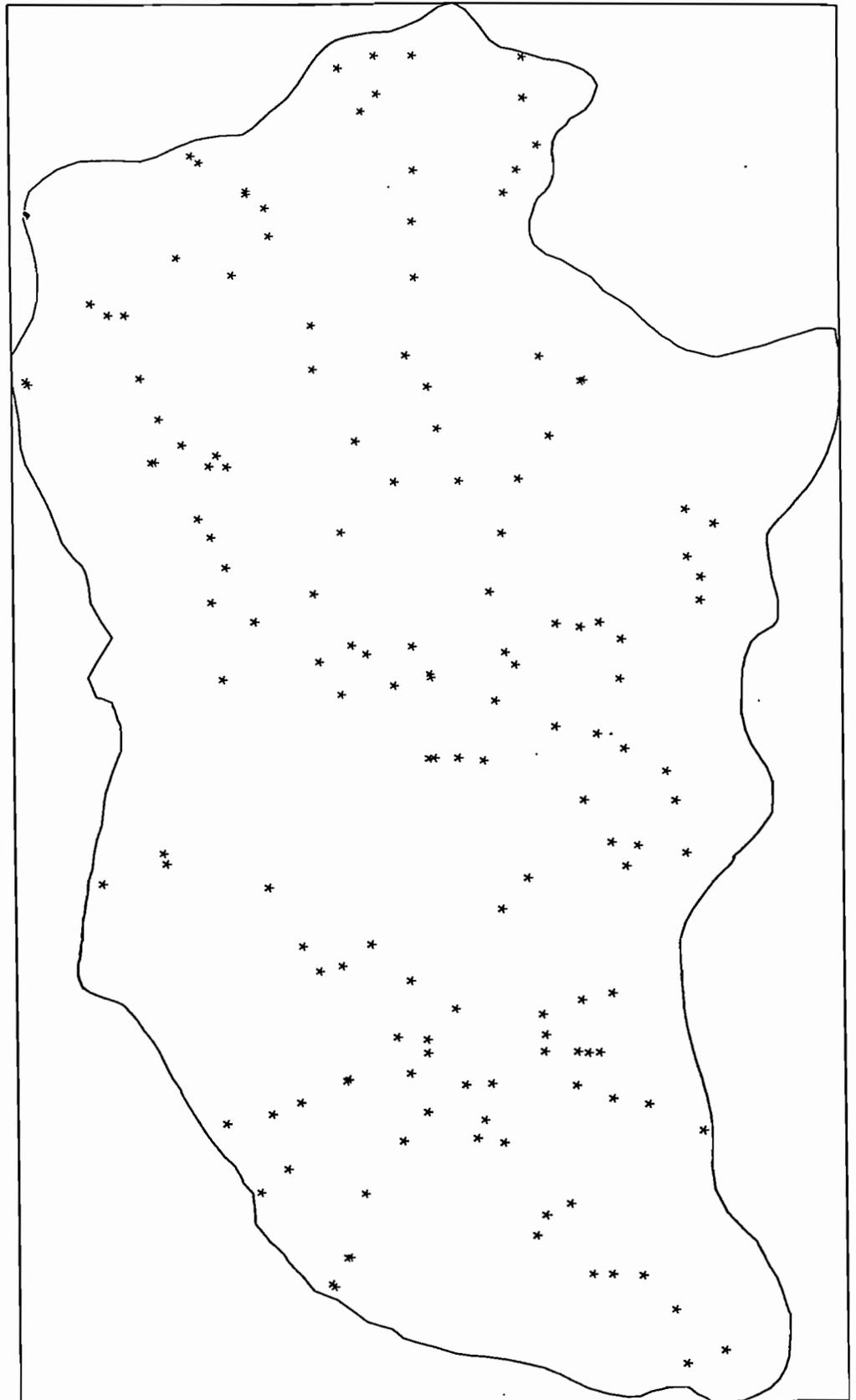
L'esquisse cartographique préliminaire a été établie au 1/50 000. A ce stade, les nuances de gris sur la photo ont servi à délimiter sept zones :

- Zone 1 : Taches à contours polygonaux nets et de teinte très claire sur la photo.
- Zone 2 : Taches à contours polygonaux nettement moins clairs que précédemment.
- Zone 3 : Couleur très sombre avec de nombreux gros points noirs.
- Zone 4 : Couleur sombre avec de petits points noirs.
- Zone 5 : Couleur assez sombre et texture fine.
- Zone 6 : Aspect gris clair et présence de points noirs.
- Zone 7 : Aspect gris clair avec des traits sombres.

La délimitation de ces zones constitue le premier travail cartographique qui permet de préparer la phase de description de terrain en définissant huit transects sur lesquels seront répartis l'échantillon des points d'observation. La longueur totale des transects est d'environ 50 km.

### **Le choix d'un échantillon**

La figure 3.1 présente l'ensemble des points ayant servi à décrire les états de surface du bassin de Djitiko.



**Figure 3.1 : Points de description des états de surface du bassin versant du Djitiko**

### 3.2 La description des surfaces élémentaires

**Surface élémentaire** : Le terme “surface élémentaire” désigne, à un moment donné, un ensemble caractérisé par :

- son couvert végétal,
- le type de sol,
- les organisations pédologiques superficielles.

Cependant, la surface du sol subit des transformations sous l’effet des facteurs météorologiques, fauniques et anthropiques. Il convient donc de préciser dans la description des surfaces élémentaires types quelles transformations subissent ces surfaces au cours d'une même saison des pluies.

**Le concept de surface élémentaire** doit pouvoir être utilisé d’une manière à la fois scientifique et opérationnelle (CASENAVE et VALENTIN, 1989). Un tel objectif peut être atteint si l'on prend soin :

- de préciser les niveaux d'observation,
- de définir un canevas de description,
- de normaliser le dépouillement et la saisie des données,
- d'élaborer un référentiel des principales surfaces élémentaires,
- de structurer ses connaissances au fur et à mesure de la description.

Dans ce but CASENAVE et VALENTIN ont construit une clef de détermination des micro-organisations pelliculaires de surface (mops ) présentée sur la Figure 3.2. Cette clef, associée à d'autres critères, leur a permis de construire une seconde clef de détermination des types de surfaces élémentaires présentée sur la Figure 3.3.

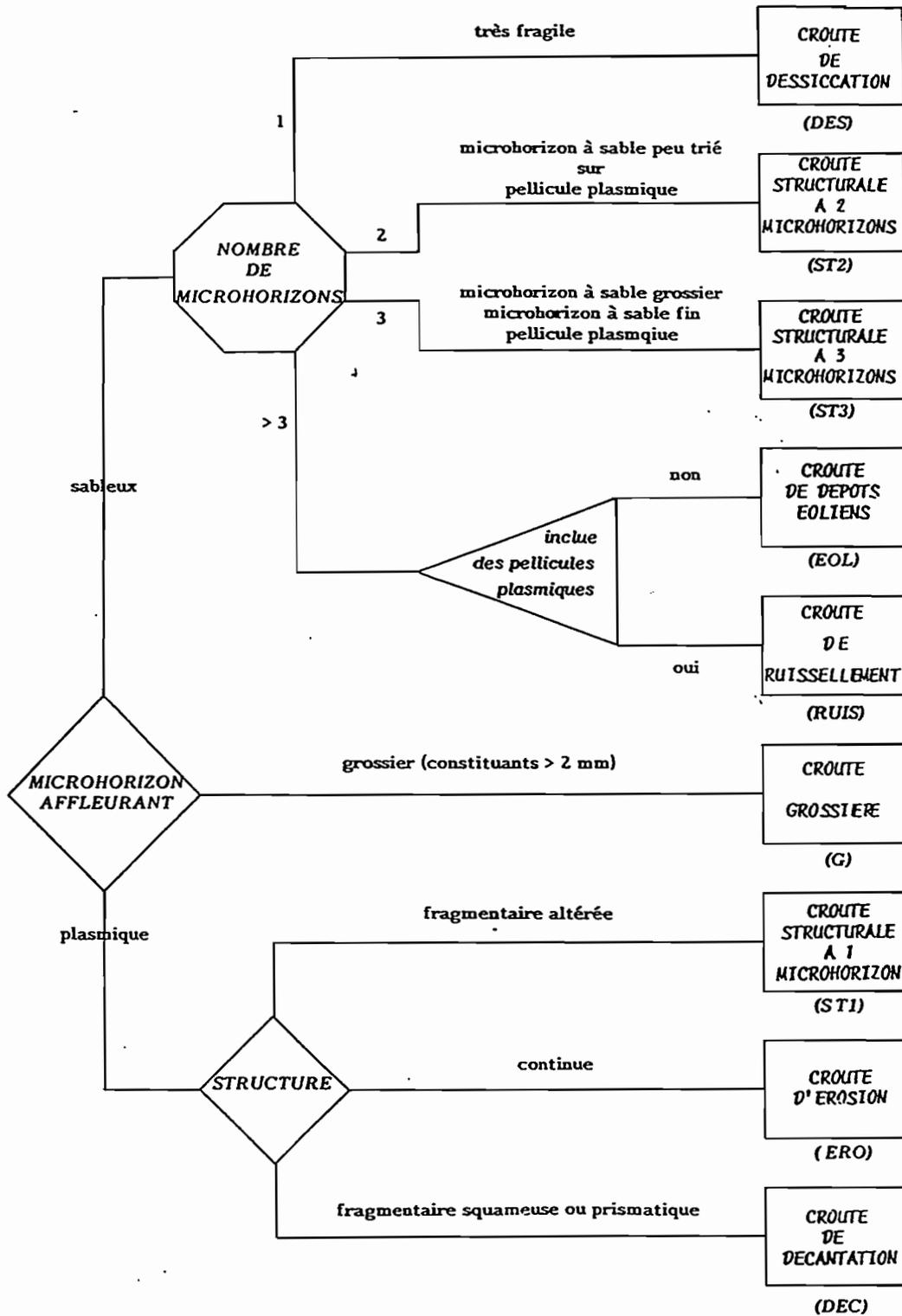


Figure 3.2 : Clef de détermination des micro-organisations pelliculaires de surface (mops) (d'après CASENAVE et VALENTIN, 1989)

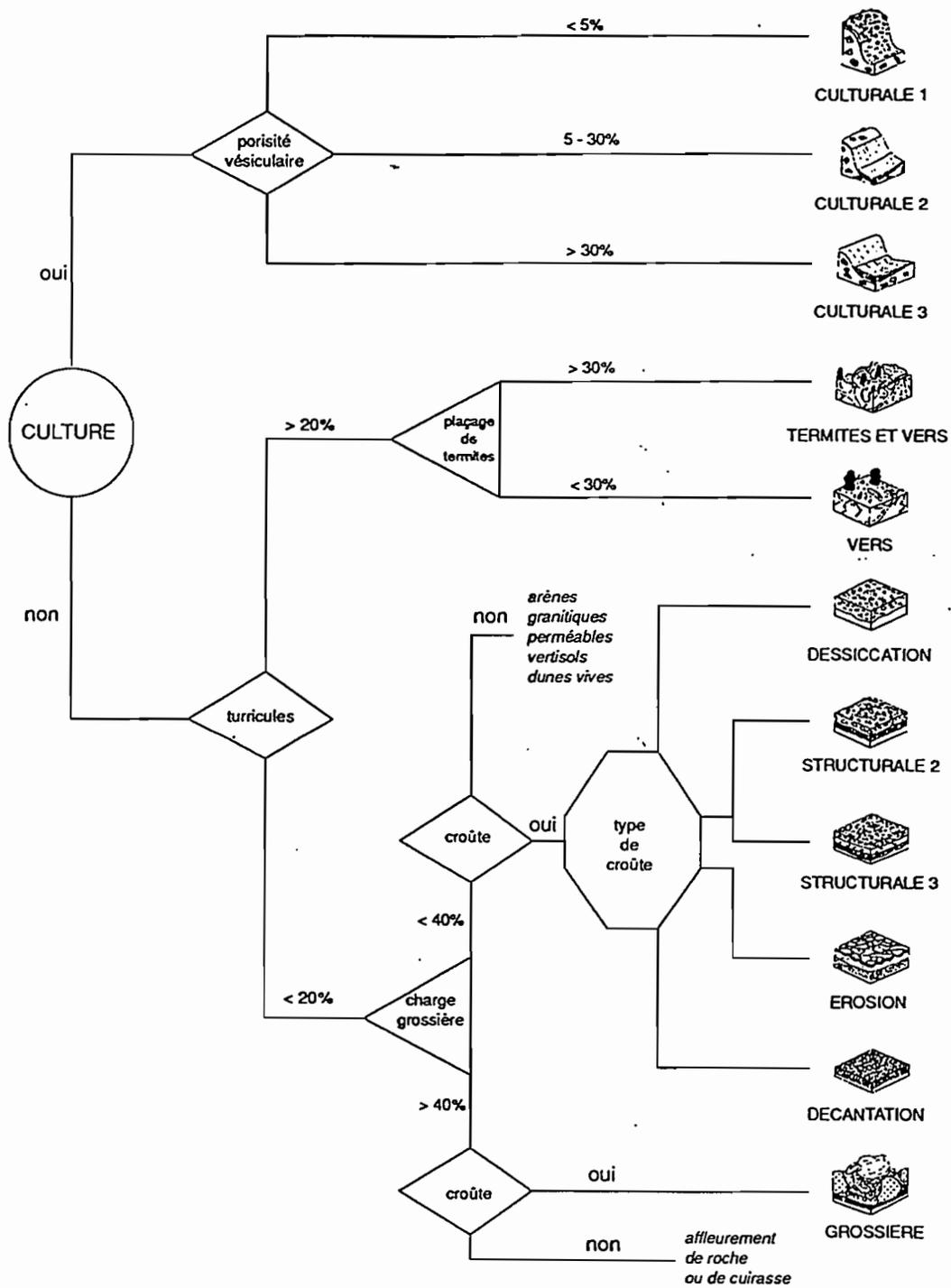


Figure 3.3 : Clef de détermination des types de surface (d'après VALENTIN et VALENTIN, 1989)

### 3.2.1 Méthodologie

Dans la description des surfaces élémentaires, une grande attention est accordée par CASENAVE et VALENTIN aux micro-horizons superficiels, encore appelés croûtes. Dans ce paragraphe nous parlerons d'abord de la description des micro-horizons puis de la surface élémentaire.

#### Caractérisation des micro-horizons

Il faut préciser que le micro-horizon ne doit pas être confondu avec l'horizon pédologique superficiel, encore moins avec le sol dans sa globalité. C'est au-dessus de l'horizon A que se forme un microprofil constitué d'un ou plusieurs micro-horizons (appelés micro-organisations pelliculaires superficielles ou croûtes, en abrégé mops). L'épaisseur d'un micro-horizon est le plus souvent de l'ordre du millimètre. Les mops présentent des caractères propres à toute organisation pédologique, et, de ce fait, elles s'étudient dans les quatre dimensions : hauteur, surface, temps. Bien que de faible épaisseur, elles se caractérisent par une différenciation verticale et spatiale (la nature des micro-horizons varie dans l'espace en fonction des facteurs du milieu). Elles subissent des modifications dans le temps. Il s'agit d'un milieu dynamique.

Le microprofil constitue le niveau pédologique directement soumis aux conditions météorologiques (pluie, vent, rayonnement). De ce fait, il est le siège de contraintes supérieures à celles du milieu sous-jacent : écarts thermiques importants, hyper-dessiccation ou sur-saturation, chocs des gouttes de pluie, effets du vent. Sans aucune pression exercée par les horizons supérieurs ("pression pédostatique") il peut aisément augmenter ou diminuer de volume lors des cycles d'humectation et de dessiccation, de transferts de constituants vers le haut, par exemple sous l'effet du rejaillissement.

Les critères de description des micro-horizons ont été normalisés dans le catalogue des états de surface de la zone sahélienne (CASENAVE et VALENTIN, 1989). Les principaux critères sont les suivants :

**Profondeur et épaisseur** : Les profondeurs d'apparition se mesurent à partir de la surface. L'épaisseur se mesure au demi-millimètre près.

**Polygénie** : certains micro-horizons présentent parfois une certaine périodicité qu'il convient de décrire avec précision. La périodicité peut être verticale ou superficielle.

**Régularité et netteté de la transition** : La régularité permet d'estimer la conformité des limites supérieure et inférieure du micro-horizon avec la surface topographique. La netteté de la transition entre deux micro-horizons est signalée avec les adjectifs appropriés.

**Continuité et affleurement** : Le premier caractère surface occupée par la projection verticale du micro-horizon considéré (estimation visuelle). L'affleurement est la part de surface (%) qui correspond à la zone d'affleurement du micro-horizon.

**Couleur** : Le code international de référence (code Munsell), utilisé par les pédologues, est le mieux indiqué pour caractériser la couleur des horizons. A défaut de cet outil, on peut noter pour chaque micro-horizon, la couleur principale et la teinte.

**Taille et nature des constituants** : C'est sur la taille des constituants que se fonde l'identification des micro-horizons. En ce qui concerne la texture, on se limite généralement à son appréciation tactile à l'état humide. En plus des éléments de la terre fine identifiables à la main (argiles, limons, sables), on s'intéresse également aux éléments grossiers de taille supérieure à 2 mm (graviers, cailloux, pierres et blocs). La nature des constituants des micro-horizons doit être prise en compte.

**Forme et taille des éléments structuraux** : La description des éléments structuraux se fait avec les références pédologiques classiques : structures prismatiques, en plaquettes, en écailles, en lamelles et en feuillets; structures fragmentaire, particulière, massive.

**Porosité** : On distingue 3 types de porosité selon leur aptitude à l'infiltration :

- La porosité fonctionnelle résultant d'une activité biologique végétale ou animale (trous forés par les racines, les vers ou les insectes).

- La porosité temporairement fonctionnelle (fentes de dessiccation qui se referment au cours de la saison des pluies).

- La porosité non fonctionnelle ou porosité vésiculaire, formée par les petites cavités plus ou moins sphériques qui correspondent à des bulles emprisonnées dans le micro-horizon.

**Fragilité** : C'est une variable importante pour l'identification des micro-horizons et les contraintes mécaniques associées au type de croûte. Pour apprécier la résistance à la pénétration on peut utiliser un pénétromètre mais son utilisation ne paraît pas indispensable dans la phase de description des surfaces élémentaires. Pour décrire la fragilité on utilise les échelles de notation des pédologues de terrain.

## **Caractérisation des surfaces élémentaires**

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. La figure 3.3 présente la clef de détermination des types de surfaces élémentaires.

### **Le couvert végétal**

A l'échelle de la surface élémentaire, c'est à dire du m<sup>2</sup>, seuls les couverts herbacé et cultural sont à prendre en compte. Il importe d'estimer le recouvrement total qui comprend le recouvrement assuré par l'ensemble des parties aériennes et par les résidus végétaux, à l'exclusion des algues, lichens et mousses qui poussent directement à la surface du sol. Son complément à 100 représente le pourcentage de sol nu, directement exposé à l'impact des pluies. L'estimation est visuelle et peut se faire par recours à des planches (CASENAVE et VALENTIN, 1989).

### **Le microrelief**

A l'échelle de la surface élémentaire, ce sont les petits accidents de terrain, naturels ou induits par les techniques culturales, qui doivent être relevés. Il s'agit des éléments conférant au sol la rugosité susceptible de diminuer ou d'augmenter le stockage superficiel de l'eau. Il faut distinguer le mésorelief d'amplitude supérieure à 50 cm, le microrelief d'amplitude comprise entre 5 et 50 cm et enfin le nanorelief d'amplitude inférieure à 5 cm. Le microrelief est évalué en fonction de son degré d'obstruction par rapport au ruissellement.

### **Les constructions mésofauniques**

L'intérêt de l'activité faunique tient au fait qu'elle influe sur la porosité. Les indices utilisés sont les turricules de vers (déjections de vers à la surface du sol), les placages de termites (petits chenaux de terre que construisent les termites à la surface du sol pour se prémunir de la lumière lors de leur activité de récolte), les fourmilières. On note essentiellement le pourcentage de surface occupé par chacune de ces constructions.

### **Les micro-horizons**

On indique la présence des micro-horizons en précisant leurs caractéristiques conformément aux indications fournies précédemment.

### 3.2.2 Les surfaces élémentaires du bassin du Djitiko

#### Typologie et distribution dans le paysage

Dans le bassin du Djitiko, nous avons inventorié 12 types de surfaces élémentaires qui se répartissent entre :

- les surfaces élémentaires cultivées,
- les surfaces élémentaires à plus de 20% de placages de termites ou de turricules de vers,
- les surfaces élémentaires à moins 20% de placages de termites ou de turricules de vers.

#### Les surfaces élémentaires cultivées

##### *Surface de type C2*

Cette surface a une porosité vésiculaire comprise entre 5 et 30%. En général, la croûte de ruissellement (RUI) couvre moins de surface que les croûtes de type ST1 et ERO. Nous avons identifié deux types de C 2 :

- Le type modal (C2-1) est observée sur les bas glacis cultivés sur sols jaunes moyennement épais, sur sols beiges épais et sur sols rouges épais.
- La variante sur sol argileux (C2-2) est observée au pied des collines et dans les dépressions en contact direct avec le réseau hydrographique.

Après un labour ou un sarclage, la surface élémentaire prend le type C1.1 ou C1.2 selon la nature du sol. Après une chute de pluie égale au total pluviométrique d'environ 100 mm, on peut estimer que la surface est de type C2.1 ou C2.2. Dès que la somme des pluies atteint 200 mm après le labour ou le sarclage, on peut estimer que le sol est parvenu au stade C3.1 ou C3.2 qui correspond au stade pour lequel, à cause de l'encroûtement du sol et de son état d'humectation, l'infiltration est minimale et le ruissellement maximal (LAMACHERE, 1991).

#### Surfaces élémentaires à plus de 20% de placages de termites ou de turricules de vers

##### *Surface de type Vers (V) :*

Elle présente plus de 20 % de turricules de vers et moins de 30% de placages de récolte de termites. Ce type de surface a été inventorié dans les dépressions en contact direct avec le réseau hydrographique, dans une situation de couvert végétal abondant, supérieur à 70 %.

**Surfaces élémentaires à moins de 20% de placages de termites ou de turricules de vers (VERS).**

**Surfaces à moins de 40% de charge grossière**

***Surface de type dessiccation : DES***

La surface de dessiccation correspond à une absence de croûte ou à une croûte très peu développée. Trois types de surface de dessiccation ont été identifiés :

- Le type DES 1 est observé sur sols beige et rouge des bas glacis avec un couvert végétal important, supérieur à 50 %. Pendant la saison des pluies, ce couvert végétal est susceptible de couvrir complètement la surface du sol avec un taux de recouvrement de 100 %.

- Le type DES 2 est observé au pied des collines, sur sol argileux. Son couvert végétal suit à peu près les mêmes fluctuations que le type DES 1.

- Le type DES 3 correspond à une croûte de dessiccation avec pellicule algale. Il a été observé sur glacis cuirassé à sol graveleux peu épais et sur sols jaunes moyennement épais où le couvert végétal est constitué d'herbes de grande taille : *Loudetia togoensis* et *hypparhenia dissoluta*. Ce couvert dépasse 50 % au cours de la saison des pluies.

Au début de la saison des pluies, ces types de surface portent souvent les traces du passage des feux de brousse. L'aptitude des sols au ruissellement est alors maximale. Elle diminue ensuite avec le développement du couvert végétal herbacé.

***Surface de type structurale 2 : ST 2***

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. Cette surface élémentaire a été observée en quelques rares endroits sur les sols jaunes du bassin versant de Djitiko.

***Surface de type structurale 3 : ST 3***

Cette surface est couverte d'une croûte structurale à 3 micro-horizons : sable grossier libre sur une couche de sables fins pris en masse reposant sur une pellicule plasmique à forte porosité vésiculaire. Ce type de surface présente le même degré de rareté que la précédente sur le bassin de Djitiko.

***Surface de type érosion : ERO***

Cette surface est couverte d'une croûte d'érosion, c'est à dire que le sol a subi un décapage superficiel ayant entraîné un glaçage de la surface du sol. Ce type de surface a été observé sur les bas glacis à sols moyennement épais et épais (ERO 1) et sur sol argileux au pied

des collines (ERO 2). Les surfaces de type ERO présentent de très fortes aptitudes au ruissellement, principalement sur sols argileux.

### **Les surfaces à plus de 40% de charge grossière**

Le type modal (GRO 1) montre des éléments grossiers enchâssés dans une croûte à 3 micro-horizons (sable grossier, sable fin, pellicule plasmique). Ce type a été observé sur les glacis cuirassés à sol graveleux peu épais avec localement un couvert ligneux assez important.

Le type GRO 3 correspond à une variante où les graviers et gravillons libres couvrent plus de 50 % de la surface du sol. Cette variante est observée sur les glacis cuirassés en position relativement plane.

Le type GRO 5 est une variante du type GRO 1 observée sur sols caillouteux peu épais issus de roche verte.

Le type GRO 6 est une variante correspondant à un affleurement continu de la cuirasse ferrugineuse.

Au début de la saison des pluies, les surfaces à charge grossière correspondent généralement à des surfaces où le couvert végétal herbacé a disparu suite au passage des feux de brousse. Dès les premières pluies, en avril ou en mai, le tapis herbacé commence à renaître pour atteindre un plein développement vers le milieu du mois d'août. Les surfaces de type GRO 1, GRO 3 et GRO 5 se sont alors transformées en surfaces à charge grossière et couvert végétal plus ou moins abondant. L'importance du recouvrement végétal est alors en relation directe avec l'aptitude des sols à l'infiltration.

## **3.3 La description des états de surface**

### **L'état de surface**

Le terme "état de surface" peut désigner :

- 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.

### **3.3.1 Méthodologie**

#### **Quelques considérations de base**

La caractérisation des états de surface peut se faire à différentes échelles : région, petit bassin versant, parcelles cultivées, section, ligne, point. Elle consiste, sur l'échantillon retenu à l'échelle considérée, à décrire le couvert végétal et ses différentes strates, les types de sols et les modalités de leur occupation, les types de surfaces élémentaires et l'organisation spatiale de ces surfaces élémentaires.

La description au sol des états de surface s'impose pour deux raisons (CASENAVE et VALENTIN, 1989) :

- Sa primauté sur les autres échelles d'analyse : seule cette "vérité terrain" assure, en effet, le fondement scientifique des études entreprises à partir des photographies aériennes ou de données satellitaires qui, sans elle, se limiteraient à de simples interprétations.

- Sa relative simplicité : la description d'un état de surface ne fait pas appel à un sens de l'observation hors du commun, ni à un matériel sophistiqué. Du fait de son hétérogénéité, la surface du sol donne, à première vue, une impression de complexité. Cependant, un examen plus attentif permet de la décomposer en surfaces types élémentaires.

### *Le matériel de description des états de surface*

Le matériel nécessaire pour la description des états de surface comprend (LAMACHERE, 1995) :

- La partie du catalogue des états de surface de A. Casenave et C. Valentin consacrée à la description des surfaces élémentaires et des états de surface, sous pochettes en plastique transparent;

- Une flore locale pour nommer les arbres, les arbustes et la strate herbacée;

- Un piochon de pédologue, un couteau à large lame, un pinceau, une pissette pour humecter le sol;

- Plusieurs cahiers d'écolier avec gomme, crayons et aiguisé-crayon, un appareil photographique;

- Les photographies aériennes et cartes topographiques;

- Une boussole, une règle graduée et un compas;

- Si possible un GPS pour le repérage au sol.

### **3.3.2 Les états de surface du bassin versant du Djitiko**

Sur le terrain, les contrastes sont apparus assez nets entre les composantes principales du milieu : glacis cuirassés et bas glacis. En conséquence nous avons procédé à la description des points le long des chemins en respectant une bonne distribution sur les principales toposéquences identifiées comme représentatives du milieu. Les points ont été localisés par mesure au GPS.

Les dix unités d'état de surface identifiées sur le bassin versant de Djitiko et cartographiées sur la Figure 3.4 sont décrites brièvement ci-après.

### Caractéristiques des unités cartographiques

**Unité n° 1 :** Surface rocheuse qui présente par endroits de petites plages de matériaux limono-sableux. L'obstruction du microrelief est forte. Cette unité ne présente pas de signes d'érosion.

Couvert arboré : 1 %      Couvert arbustif : 2 %      Couvert herbacé : 15 %

Surfaces élémentaires :    GRO 3 : 90%    ST2 : 10%.

**Unité n° 2 :** Versant à sol caillouteux peu épais, cultivé à 40%. La topographie, nettement inclinée, contraste avec le reste du paysage. L'obstruction du microrelief est faible. L'unité porte quelques incisions linéaires par endroits.

Couvert arboré : 27 %      Couvert arbustif : 11%      Couvert herbacé : 8 %

Surfaces élémentaires :    GRO 6 : 91%      C2 1: 8%

**Unité n° 3 :** Savane arborée clairsemée sur sol argileux au pied des collines. Quelques termitières cathédrales témoignent de l'activité des termites sur cette unité. L'obstruction du microrelief y est faible. L'unité porte les marques d'une érosion hydrique en nappe.

Couvert arboré : 15 %      Couvert arbustif : 10 %      Couvert herbacé : 30 %

Surfaces élémentaires :    DES 2: 60%      ERO 2: 30%      DES 3: 10%

**Unité n° 4 :** Culture sur sol argileux profond au pied des collines. La végétation ligneuse se réduit à quelques pieds. La culture est manuelle sur la majeure partie des parcelles. Il existe de nombreuses ravines.

Couvert arboré : 5 %      Couvert arbustif : 0 %      Couvert cultural : 5 %

Surface élémentaire :      C2.2 : 100 %

**Unité n° 5 :** Savane arborée sur bas plateau cuirassé. Localement on observe des termitières cathédrales fonctionnelles ou dégradées. L'effet de ces constructions fauniques s'ajoute à celui des blocs ferrugineux pour donner à l'unité une obstruction moyenne. L'érosion est peu perceptible.

Couvert arboré : 20 %      Couvert arbustif : 15%      couvert herbacé : 30 %

Surfaces élémentaires :    ERO : 5 %      GRO 1 : 30 %      GRO 3 : 60 %      GRO 6 : 5 %

**Unité n° 6** : Formation herbacée discontinue sur bas plateau cuirassé. La position correspond aux points relativement bas sur le glacis cuirassé. Des bosquets de végétation ligneuse sont disséminés sur cette unité. Le tapis herbacé est assez important. Quelques termitières cathédrales se dressent au pied des ligneux. L'unité ne montre aucun signe d'érosion.

Couvert arboré : 1 %      Couvert arbustif : 2 %      Couvert herbacé : 40 %

Surfaces élémentaires :    DES 3 : 10 %    GRO 1 : 25 %    GRO 3 : 60 %    GRO 6 : 5 %

**Unité n° 7** : Savane arborée clairsemée sur sol jaune. La strate arbustive est très peu développée. Le glaçage a marqué l'unité en maints endroits.

Couvert arboré : 15 %      Couvert arbustif : 5%      Couvert herbacé : 20 %

Surfaces élémentaires :    ST2 : 10%      DES 1 : 50 %    DES 2 : 25%    ERO 1 : 15 %

**Unité n° 8** : Formation herbacée sur sol jaune. La présence de termitière à chapeau est très caractéristique de cette unité. Elle assure une obstruction moyenne du microrelief. Il n'existe pas d'incision linéaire. Par contre le décapage superficiel (par érosion en nappe) est localement observé.

Couvert arboré : 2 %      Couvert arbustif : 0 %      Couvert herbacé : 40 %

Surfaces élémentaires :    DES 1 : 25 %    DES 2 : 55 %    ERO 1 : 20 %

**Unité n° 9** : Bas glacis cultivé à 50%. En l'absence de culture, la végétation est parfois très dense, avec, dans tous les cas, une dominance des espèces hydrophiles. Des espèces herbacées à fort développement (Andropogonacées) sont également observées sur l'unité. Dans les champs, il existe des billons assurant un microrelief moyennement développé.

Couvert arboré : 21 %      Couvert arbustif : 9 %      Couvert herbacé : 14 %

Couvert cultural : 2 %

Surfaces élémentaires :    C 2 1 : 52 %    DES 1 : 43 %    ERO 1 : 5 %.

**Unité n° 10** : Bas glacis cultivé à 20 %. De grands arbres sont observés avec une densité assez importante dans les endroits non cultivées. Les parcelles cultivées le sont manuellement avec le grattage comme technique dominante de préparation du sol. L'obstruction du microrelief est faible partout. Au contact avec le réseau hydrographique, le ravinement semble être généralisé. Ailleurs, se manifeste l'érosion en nappe.

Couvert arboré : 26 %      Couvert arbustif : 13 %      Couvert herbacé : 17 %

Couvert cultural : 1 %

Surfaces élémentaires :    C 2 1 : 16 %    DES 1 : 81 %    ERO : 5 %

**Unité n° 11** : Dépression argileuse cultivée à 80%. Elle est en contact direct avec le réseau hydrographique. Les parcelles non cultivées portent un important couvert végétal. Cette unité ne montre aucun signe d'érosion.

Couvert arboré : 4 %      Couvert arbustif : 18 %      Couvert herbacé : 51%

Couvert cultural : 8 %

Surfaces élémentaires :      C 2 2 : 78%      VERS : 22 %

### **Distribution spatiale des états de surface dan le bassin**

La carte présentée à la Figure 3.4 donne la répartition des états de surface sur le bassin versant de Djitiko. Le tableau 3.1 donne les superficies et les proportions des différentes unités. Les unités 6, 5 et 7, associées à des couvertures pédologiques indurées à faible ou moyenne profondeur sont les plus représentées dans le bassin. Elles occupent 58,6 % de la superficie totale. L'unité 11 par contre, associée aux bas-fonds, est très faiblement représentée (1,2 %).

Unité	Superficie (km2)	Proportion dans le bassin (%)
1	3,875	3,7
2	5,750	5,6
3	7,325	7,1
4	4,100	3,9
5	18,425	18,0
6	21,450	21,0
7	18,325	17,9
8	5,750	5,6
9	11,825	11,6
10	4,525	4,4
11	1,250	1,2

Tableau3.1 : Superficies occupées par les états de surface dans le bassin de Djitiko

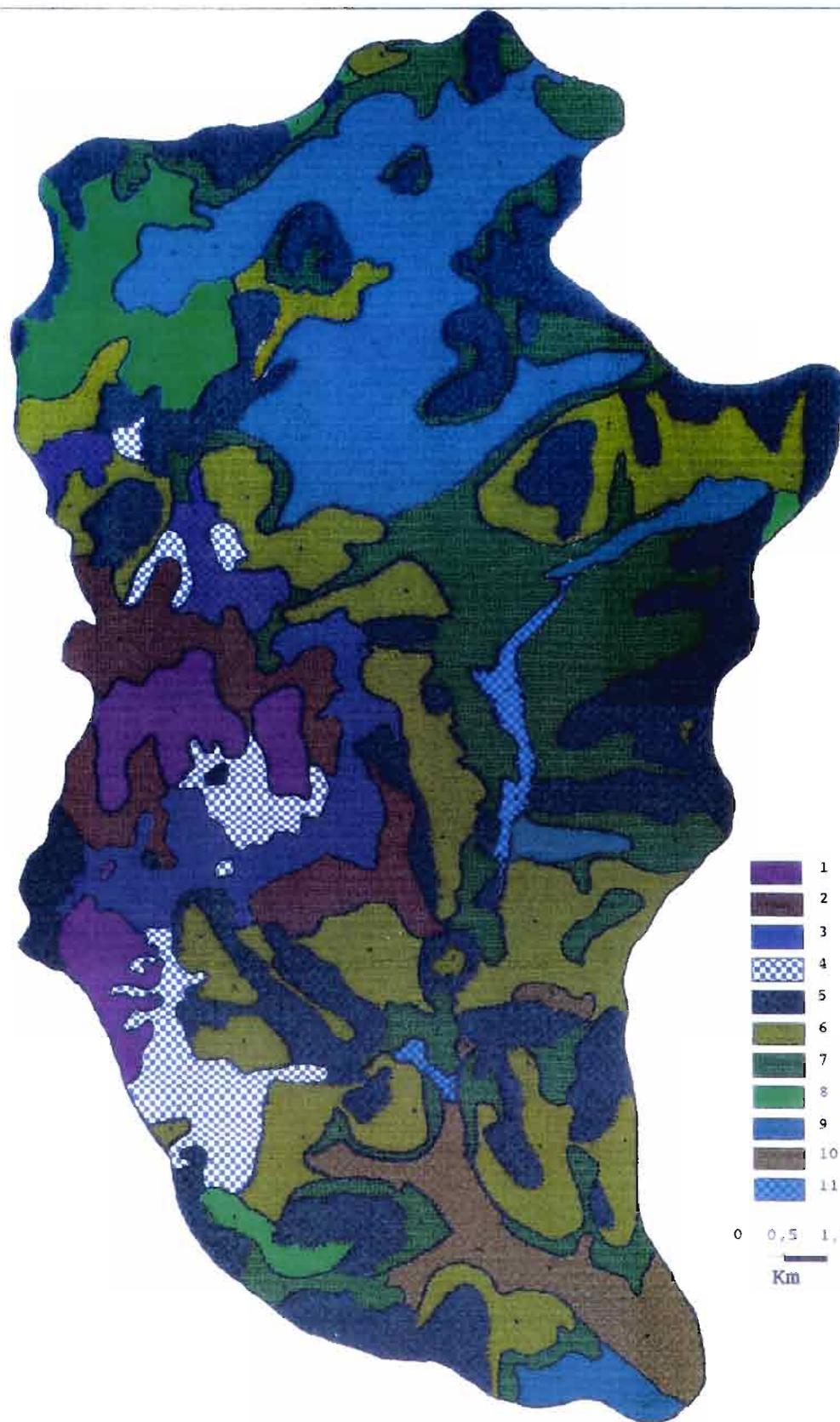


Figure 3.4 : Bassin de Djitiko. Carte des états de surface

- |     |  |     |   |
|-----|--|-----|---|
| u1  | Surface rocheuse à petites plages limono-sableuses             | u2  | Versant caillouteux peu épais - cultivé à 40%           |
| u3  | Savane arborée clairsemée sur sol argileux en pied de collines | u4  | Culture sur sol argileux profond en pied de collines    |
| u5  | Savane arborée sur bas-plateau cuirassé                        | u6  | Formation herbacée discontinue sur bas plateau cuirassé |
| u7  | Savane arborée clairsemée sur sol jaune                        | u8  | Formation herbacée sur sol jaune                        |
| u9  | Bas-glacis cultivé à 50%                                       | u10 | Bas-glacis cultivé à 20%                                |
| u11 | Dépression aréolées cultivées à 80%                            |     |   |

### 3.4 La caractérisation hydrodynamique des états de surface

#### 3.4.1 Les paramètres hydrodynamiques du sol

##### En régime de submersion

Les physiciens du sol considèrent le ruissellement comme le "résidu de l'infiltration" (VACHAUD, 1985). Sa genèse et son développement ne peuvent être abordés sans la connaissance des mécanismes de l'infiltration qui sont liés aux caractéristiques du sol. L'infiltration peut être définie comme l'ensemble des processus suivants (MOREL-SEYTOUX, 1981) :

- la pénétration de l'eau dans le sol à travers sa surface,
- le stockage et les mouvements de l'eau dans le sol.

L'infiltration est donc la cinétique d'un fluide dans un espace à trois dimensions faisant intervenir trois phases : l'eau, l'air et le sol. On décrit classiquement l'infiltration par les trois paramètres : intensité d'infiltration, capacité d'infiltration et hauteur d'eau infiltrée.

- L'intensité d'infiltration  $f(t)$  est définie comme un flux d'eau traversant une unité de surface de sol. Elle est fonction de la conductivité hydraulique du sol et de son gradient hydraulique. Son unité est celle d'une vitesse ( $LT^{-1}$ ). Elle décroît asymptotiquement avec le temps (HILLEL, 1974).

- La capacité d'infiltration, qui a également comme unité celle d'une vitesse ( $LT^{-1}$ ) est suivant HORTON (1933), la vitesse maximale d'infiltration avec laquelle un sol donné, sous des conditions données, absorbe la pluie au fur et à mesure qu'elle tombe. Le mot "capacité" se référant plutôt à un volume qu'à une vitesse, les auteurs modernes (RICHARDS, 1965) lui préfèrent le terme de perméabilité. Lorsque cette capacité d'infiltration atteint un minimum, on la considère comme voisine de la conductivité hydraulique à saturation du sol dans les conditions naturelles (CHILDS, 1969).

- La hauteur d'eau infiltrée  $L_i(t)$  exprimée en mm, est le cumul de la lame d'eau entrée dans le sol à l'instant  $t$  depuis le début du processus à l'instant  $t_0$ .

##### Sous pluies naturelles ou artificielles

Sous pluies naturelles ou artificielles, le régime d'infiltration apparaît plus complexe que lorsque le sol est submergé par une lame d'eau uniforme. La surface du sol n'étant pas absolument plane, le sol n'est que partiellement submergé.

Pour rendre compte des phénomènes observés sous pluies artificielles et modéliser aisément le ruissellement, les hydrologues de l'ORSTOM (LAFFORGE, 1977; LAFFORGUE et

CASENAVE, 1980) ont établi plusieurs relations permettant la prise en compte des principaux facteurs du ruissellement.

### *Le Ruissellement*

Sous pluies artificielles, la lame ruisselée ( $L_r$ ) est exprimée par l'équation de la forme :

$$L_r = a P_u + b IK + c P_u IK + d \quad (1)$$

Où: -  $P_u$  est la pluie utile exprimée en mm,

- a, b, c et d sont des paramètres caractéristiques de la surface élémentaire,

-  $IK$  est un indice d'humectation du sol de la forme :

$$IK_n = (P_{n-1} + IK_{n-1}) e^{-\alpha t}$$

-  $t$  étant l'intervalle de temps, exprimé en jours, entre les pluies  $P_n$  et  $P_{n-1}$

-  $IK_n$  étant l'indice d'humidité avant la pluie  $P_n$ ,  $\alpha$  étant un coefficient pris arbitrairement égal à 0,5 pour la zone sahélienne.

Pour chaque type modal de surface élémentaire, CASENAVE et VALENTIN (1989) ont établi les valeurs des coefficients a, b, c et d de l'équation (1). En l'absence de toute mesure sous pluies artificielles au simulateur de pluies, on peut ainsi calculer, connaissant la pluie utile et après description des surfaces élémentaires types, la lame ruisselée théorique générée par chaque surface du même type.

Dans la majeure partie des cas, la forme simplifiée de l'équation (1) :  $L_r = a P_u + d$ , est largement suffisante pour estimer l'ordre de grandeur de la lame ruisselée.

### *Les notions de pluie utile et d'intensité de pluie limite de ruissellement*

Sous pluie artificielle, l'intensité de pluie utilisée étant égale ou supérieure à 30 mm/heure, elle dépasse généralement l'intensité de pluie limite du ruissellement ( $II$ ), caractéristique importante de l'aptitude du sol à l'infiltration sous chute de pluie. L'intensité de pluie limite du ruissellement d'une parcelle est déterminée par la mise en relation des intensités pluviométriques ( $IP$ ) et des intensités de ruissellement ( $IR$ ) sous pluies simulées. En prolongeant la courbe  $IR = f(IP)$  vers la valeur nulle de  $IR$ , on obtient une estimation de  $II$ .

L'intensité de pluie limite du ruissellement varie avec le degré d'humectation du sol, d'une valeur maximale pour un sol sec ( $II_0$ ) à une valeur minimale pour un sol bien humecté ( $II_s$ ).

Sous pluies naturelles, l'intensité pluviométrique est rarement égale à 30 mm/h, elle varie de manière plus ou moins aléatoire. L'utilisation des relations de type (1) nécessite donc une définition de la pluie utile. LAMACHERE (1995) propose de définir la pluie utile comme la hauteur pluviométrique dont l'intensité est supérieure à l'intensité de pluie limite de ruissellement.

$$P_u = (IP_i t_i) \text{ avec } IP_i > I_l$$

Où  $IP_i$  est l'intensité de pluie, supérieure à  $I_l$ , tombant sur l'intervalle de temps  $t_i$ .

### *L'Infiltration*

Pour caractériser l'infiltration sous pluies artificielles, CASENAVE et VALENTIN ont défini trois coefficients d'infiltration :

-  $K_i$  : Coefficient d'infiltration pour l'ensemble du protocole, égale à la somme des lames infiltrées sur la somme des hauteurs de pluie de toutes les averses.

-  $K_{i0}$  : Coefficient d'infiltration pour une pluie de 50 mm sur un sol sec. Calculé à partir des équations  $L_r(P_u, IK)$ , avec  $P_u = 50$  mm et  $IK = 0$ .

$$K_{i0} = \frac{50 - L_r(50, 0)}{50}$$

-  $K_{i20}$  : Coefficient d'infiltration pour une pluie de 50 mm sur un sol très humide. Il est calculé à partir des équations  $L_r(P_u, IK)$  avec  $P_u = 50$  mm et  $IK = 20$ .

$$K_{i20} = \frac{50 - L_r(50, 20)}{50}, \text{ en } \%$$

### *Le stockage superficiel du sol*

Pour caractériser le stockage superficiel du sol, CASENAVE et VALENTIN ont défini deux paramètres qui sont la pluie d'imbibition d'un sol sec ( $P_{is}$ ) et la pluie d'imbibition d'un sol humide ( $P_{ih}$ ). Ces deux valeurs sont estimées pour chaque surface type élémentaire à partir des expériences de simulation de pluie en déterminant la valeur de l'abscisse à l'origine de la droite  $L_r = f(P_u)$ , lorsque la lame ruisselée est nulle.

#### **3.4.2 Influence des états de surface sur l'hydrodynamique superficielle**

A la fin des années 70, les premiers résultats des mesures sous pluies simulées ont mis en évidence l'influence déterminante des organisations superficielles sur le comportement des sols vis à vis de l'eau (CASENAVE et VALENTIN, 1989). Plus tard, l'accumulation de plusieurs résultats de simulation de pluie, le long d'un transect allant de la forêt tropicale humide au Sahara, a permis de hiérarchiser les facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle (VALENTIN, 1986; 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. La relative uniformité du couvert végétal et le faible développement des réorganisations pelliculaires en surface favorisent la pleine expression des propriétés hydrodynamiques internes sur l'infiltration.

- **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.

### 3.4.3 Les équations hydrodynamiques associées aux surfaces types élémentaires

Suite aux campagnes de simulation de pluie réalisées par l'ORSTOM en Afrique de l'Ouest, il est établi qu'à chaque type de surface élémentaire correspond une relation hydrodynamique particulière (CASENAVE et VALENTIN, 1989). Ce comportement est quantifié sous forme de valeurs moyennes que prennent les paramètres a, b, c, d de la relation (1), ainsi que l'intensité de pluie limite du ruissellement (Il). Ces paramètres caractérisent le comportement des surfaces élémentaires quant au ruissellement et à l'infiltration.

Pour les surfaces élémentaires observées sur le bassin versant de Djitiko, nous donnons ci-après les valeurs des paramètres a, b, c, d, Ki, Ki0, Ki20, Ils, Ilh, Pis et Pih.

#### Surface de type cultivé 1 : C1

##### Ruissellement

$$Lr = 0,2 Pu + 0,03 IK + 0,004 Pu IK - 3,0$$

##### Infiltration

Ki %	Ki0 %	Ki20 %	Il, mm.h <sup>-1</sup>	Pis mm	Pih mm
60-75	80-90	75-85	15-25	25-30	5-15

#### Surface de type cultivé 2 : C 2

##### Ruissellement :

- C2.1**  $L_r = 0,46 P_u + 0,10 I_K + 0,0013 P_u I_K - 6,1$  sols limono-argileux  
**C2.2**  $L_r = 0,71 P_u + 0,10 I_K + 0,0033 P_u I_K - 5,7$  sols argileux

**Infiltration**

Ki %	Ki0 %	Ki20 %	Il, mm.h <sup>-1</sup>	Pis mm	Pih mm
40-60	60-80	50-70	1-7	8-15	2-14

**Surface de type cultivé 3 : C3****Ruissellement :**

- C3.1**  $L_r = 0,83 P_u + 0,03 I_K + 0,002 P_u I_K - 6,6$   
**C3.2**  $L_r = 0,90 P_u + 0,05 I_K + 0,002 P_u I_K - 10,0$

**Infiltration C3.2**

Ki %	Ki0 %	Ki20 %	Il, mm.h <sup>-1</sup>	Pis mm	Pih mm
15-25	25-40	20-30	0-3	8-15	2-14

**Surface de type dessiccation : DES****Ruissellement :**

- DES 1**  $L_r = 0,3 P_u + 0,01 I_K + 0,003 P_u I_K - 8,0$  sols beige ou rouge  
avec fort couvert herbacé  
**DES 2**  $L_r = 0,71 P_u + 0,012 I_K + 0,002 P_u I_K - 6,5$  sols argileux  
avec un faible couvert herbacé  
**DES 3**  $L_r = 0,78 P_u - 0,037 I_K + 0,002 P_u I_K - 3,2$

**Infiltration DES 1**

Ki %	Ki0 %	Ki20 %	Il, mm.h <sup>-1</sup>	Pis mm	Pih mm
60-75	80-90	75-85	10-20	20-30	10-20

**Surface de type structurale 2 : ST2****Ruissellement :**

$$L_r = 0,5 P_u + 0,02 I_K + 0,004 P_u I_K - 10,0$$

**Infiltration**

Ki %	Ki0 %	Ki20 %	Il, mm.h <sup>-1</sup>	Pis mm	Pih mm
40-55	60-75	50-65	5-15	10-20	3-6

**Surface de type structurale 3 : ST3****Ruissellement :**

$$L_r = 0,85 P_u + 0,01 I_K + 0,003 P_u I_K - 8,0$$

**Infiltration**

Ki %	Ki0 %	Ki20 %	I <sub>l</sub> , mm.h <sup>-1</sup>	Pis mm	Pih mm
15-25	25-40	20-30	0-5	3-7	2-5

### Surface de type érosion : ERO

#### Ruissellement :

**ERO 1 et ERO 2**  $L_r = 0,95 Pu + 0,09 IK + 0,001 Pu IK - 9,0$

#### Infiltration

Ki %	Ki0 %	Ki20 %	I <sub>l</sub> , mm.h <sup>-1</sup>	Pis mm	Pih mm
10-20	15-30	10-25	0-2	2-6	0-5

### Surface de type grossier : GRO

#### Ruissellement :

**GRO 1**  $L_r = 0,78 Pu - 0,037 IK + 0,002 Pu IK - 3,2$  sols grossiers avec éléments enchâssés et **GRO 5** et faible couvert végétal

**GRO 2**  $L_r = 0,46 Pu + 0,015 IK + 0,002 Pu IK - 8,2$  sols grossiers avec éléments enchâssés et fort couvert végétal

**GRO 3**  $L_r = 0,64 Pu + 0,088 IK + 0,0026 Pu IK - 7,2$  sols grossiers à éléments libres en surface et faible couvert végétal

**GRO 4**  $L_r = 0,46 Pu + 0,015 IK + 0,002 Pu IK - 8,2$  sols grossiers avec éléments libres en surface et fort couvert végétal

**GRO 6** A l'échelle élémentaire, ce type de surface engendre un ruissellement important. A l'échelle du paysage, il est difficile de préciser le comportement hydrodynamique de l'unité.

#### Infiltration

Ki %	Ki0 %	Ki20 %	I, mm.h <sup>-1</sup>	Pis mm	Pih mm
5-15	5-20	3-15	0-2	1,5-5	0-3

### 3.4.4 Les équations hydrodynamiques associées aux unités cartographiques

#### Le potentiel de ruissellement

A l'échelle des unités cartographiques, en l'absence de mesures hydrologiques à cette échelle, on ne peut qu'émettre des hypothèses sur le fonctionnement hydrologique des surfaces en utilisant les descriptions de terrain qui fournissent la répartition spatiale moyenne des surfaces élémentaires sur les unités cartographiques.

En utilisant la notion de potentiel de ruissellement (LAMACHERE et PUECH, 1995) et appliquant cette notion aux unités cartographiques du bassin de Djitiko, il est possible de caractériser l'aptitude des unités cartographiques au ruissellement et à l'infiltration.

En utilisant la notion de potentiel de ruissellement (LAMACHERE et PUECH, 1995) et appliquant cette notion aux unités cartographiques du bassin de Djitiko, il est possible de caractériser l'aptitude des unités cartographiques au ruissellement et à l'infiltration.

Le potentiel de ruissellement de l'état de surface  $j$  (ou de l'unité cartographique  $j$ ) est la somme des lames ruisselées sur les surfaces élémentaires  $i$ , lames ruisselées calculées en utilisant les relations hydrodynamiques établies à l'aide du simulateur de pluies.

$$Lr_j = \sum_i (i_{ij} Lr_{ij}) \quad (2)$$

$$\text{avec } Lr_{ij} = (a_i + b_i IK_j) Pu_{ij} + c_i IK_j - d_i \quad (1')$$

Où  $Lr_j$  est le potentiel de ruissellement de l'unité cartographique  $j$ ,  $Lr_{ij}$  est la lame ruisselée de la surface élémentaire  $i$  de l'unité cartographique  $j$ ,  $i_{ij}$  est le coefficient de pondération de la surface élémentaire  $i$  sur l'unité cartographique  $j$ ,  $Pu_{ij}$  est la pluie utile de la surface élémentaire  $i$  sur l'unité cartographique  $j$ .

La formulation proposée est très générale. Elle permet, par le calcul de la pluie utile, de ne faire intervenir que des intensités pluviométriques susceptibles de ruisseler. Elle permet également, si on dispose de plusieurs pluviomètres sur le bassin versant, de rattacher les états de surface aux différents pluviomètres en fonction de leur localisation sur le bassin versant.

Dans le cadre de ce travail, nous avons simplifié les calculs en supposant la pluie répartie de manière homogène sur le bassin versant et tombant avec des intensités pluviométriques supérieures à 25 mm/h. La valeur de 25 mm/h correspond à la valeur maximale des intensités de pluie limites de ruissellement des surfaces élémentaires du bassin de Djitiko (C1). Dans ces conditions, la formule (2) est plus simple à calculer car la pluie utile ne dépend plus du type de surface élémentaire. L'indice  $i$  disparaît des variables  $IK$  et  $Pu$ , ce qui permet d'établir, pour chaque unité cartographique une relation hydrodynamique moyenne à partir des relations hydrodynamiques de chaque surface élémentaire type et de leurs taux de couverture sur les unités cartographiques.

Nous avons appliqué ces relations à un événement pluviométrique totalisant 50 mm survenant en début de saison des pluies sur un sol sec ( $IK = 0$ ) et en milieu de saison des pluies sur un sol bien humecté ( $IK = 20$  mm). Nous avons tenu compte, pour un événement pluviométrique survenant en cours de saison des pluies, de la croissance du couvert végétal herbacé qui transforme, plus particulièrement les surfaces de dessiccation dont le comportement devient assimilable au type DES 1 et les surfaces de type grossier en type GRO 2 ou GRO 4 à fort couvert végétal.

### Les relations hydrodynamiques simplifiées

$$L_r = a P_u + b IK + c IK P_u - d$$

Pour classer les unités cartographiques selon leur aptitude au ruissellement, nous avons calculé, à l'aide de ces relations, le potentiel de ruissellement des unités en début et en fin de saison des pluies pour une pluie utile de 50 mm et pour des indices d'humectation respectivement égaux à 0 et 20 mm. Pour les unités 4, 9 et 11, très cultivées, nous avons considéré un état de surface en début de saison juste après un labour (C1) et un état de mi-saison après 100 mm de pluie suivant le sarclage.

Unités cartographiques	Paramètres hydrodynamiques des états de surface				Potentiel de ruissellement (Pu=50) mm	
	a	b	c	d	IK = 0	IK = 20
1 en avril-mai	0,626	0,081	0,0027	7,5	23,8	
1 mi-saison	0,464	0,016	0,0022	8,4		17,3
3 en avril-mai	0,790	0,006	0,0017	6,9	32,6	
3 mi-saison	0,490	0,034	0,0024	8,3		19,3
4 après labour	0,200	0,030	0,004	3,0	7,0	
4 mi-saison	0,710	0,100	0,0033	5,7		35,1
5 avril-mai	0,710	0,051	0,0023	6,2	29,3	
5 mi-saison	0,51	0,023	0,0019	8,3		19,6
6 avril-mai	0,71	0,044	0,0023	5,9	29,6	
6 mi-saison	0,47	0,018	0,0021	7,2		18,8
7 avril-mai	0,52	0,0024	0,0016	8,0	18,0	
7 mi-saison	0,42	0,0230	0,0027	8,4		15,8
8 avril-mai	0,66	0,0271	0,0021	7,4	25,6	
8 mi-saison	0,43	0,0260	0,0026	8,2		16,4
9 après labour	0,28	0,0244	0,0034	5,5	8,5	
9 mi-saison	0,42	0,0610	0,0020	7,1		17,1
10 avril-mai	0,30	0,0156	0,0031	7,2	7,8	
10 mi-saison	0,35	0,0268	0,0027	7,7		13,0
11 après labour	0,18	0,0344	0,0036	3,0	6,0	
11 mi-saison	0,58	0,0890	0,0030	5,1		28,7

Le classement des unités cartographiques en fonction de leur aptitude au ruissellement est alors le suivant :

*En début de saison des pluies :*

**Forte aptitude au ruissellement : Unités 3, 6, 5 et 8**

Ces unités sont caractérisées soit par une proportion assez forte de surface d'érosion (ERO) soit par une proportion importante de surfaces grossières (GRO). Les coefficients de ruissellement sont compris entre 0,5 et 0,6.

**Assez forte aptitude au ruissellement : Unité 1**

Comme les unités 5 et 6, l'unité 1 est caractérisée par une forte proportion de surfaces à éléments grossiers. Le coefficient de ruissellement de cette unité est compris entre 0,4 et 0,5.

**Aptitude moyenne au ruissellement : Unité 7**

L'unité 7 correspond à une zone de savane arborée avec un faible couvert herbacé en début de saison des pluies avec un pourcentage de sols nus assez important. Le coefficient de ruissellement de cette classe est compris entre 0,3 et 0,4.

**Très faible aptitude au ruissellement : Unités 9, 10, 4 et 11**

Ces unités correspondent à des sols cultivés après labour. Les coefficients de ruissellement sont alors inférieurs à 0,2.

*Au milieu de la saison des pluies :*

**Très forte aptitude au ruissellement : Unité 4**

Avec un coefficient de ruissellement égal à 0,7, l'unité 4 est de loin la plus apte au ruissellement. La mise en culture complète des sols et leur transformation sous l'effet de la pluie jouent ici un rôle fondamental.

**Forte aptitude au ruissellement : Unité 11**

Le fort taux de mise en culture de cette unité et la texture argileuse des sols sont les facteurs déterminants qui conduisent au reclassement de cette unité parmi les fortes aptitudes au ruissellement avec un coefficient de ruissellement compris entre 0,5 et 0,6.

**Aptitude moyenne au ruissellement : Unités 5, 3, 6, 1, 9, 8 et 7**

La plupart de ces unités correspondent à des surfaces de type grossier ou à des surfaces de dessiccation, recouvertes par la végétation herbacée qui s'est considérablement développée depuis le début de la saison des pluies, associées à d'autres types de surface à plus fort potentiel de ruissellement. Les coefficients de ruissellement sont compris entre 0,3 et 0,4.

**Faible aptitude au ruissellement : Unité 10**



## **Quatrième partie**

### **Etude de la sensibilité des sols à l'érosion hydrique**

#### 4.1. Aperçu sur l'érosion hydrique des sols et son évaluation

L'érosion des sols est un phénomène mondial mais son ampleur diffère d'une région à l'autre en fonction des caractéristiques des milieux physiques et des agrosystèmes. Elle est préoccupante dans les régions tropicales.

En zone soudano-sahélienne où les longs glacis à sols ferrugineux tropicaux sont les plus cultivés, les pertes en terre sont d'environ 0,5 à 40 t/ha sous mil, sorgho, arachide (ROOSE et PIOT, 1984; BOLI, BEP et ROOSE, 1993) .

##### 4.1.1 Quelques définitions

Le mot **érosion** vient du verbe latin "erodere" qui signifie "ronger". L'érosion ronge la terre. Elle résulte de nombreux processus qui peuvent se résumer, en trois phases : le détachement des particules, leur transport et leur sédimentation.

Dans ses travaux en Afrique Occidentale, ROOSE (1981) a parlé de **phénomènes d'érosion** en faisant allusion aux flux des particules solides, mais aussi aux flux liquides qui transportent (et parfois arrachent) les particules.

L' érosion par l'eau 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), la dégradation chimique, la dégradation physique et la dégradation biologique.

**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. La dégradation du sol n'est pas nécessairement continue. Elle peut avoir lieu pendant une période relativement brève entre deux états d'équilibre écologique.

##### 4.1.2 Les formes d'érosion hydrique

On distingue généralement parmi les formes d'érosion hydrique : l'érosion en nappe, l'érosion linéaire et l'érosion en masse.

##### **Erosion en nappe**

On parle d'érosion en nappe ou aréolaire lorsque l'énergie érosive s'applique à toute la surface du sol. La séparation des particules s'effectue par l'impact des gouttes de pluie et le transport de 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 des pluies qui déclenchent le ruissellement,
- l'énergie des pluies qui détachent les particules susceptibles de migrer,
- la durée des pluies,
- l'humidité du sol avant la pluie.

Plusieurs chercheurs ont observé que seules les pluies intenses provoquent de l'érosion (HUDSON, 1965 et 1983; ELWELL et STOCKING, 1975). 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 la profondeur des creux ne dépassent pas 10 à 20 cm mais où leur 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 et sa compétence érosive, laquelle dépend à la fois du volume ruisselé, de la vitesse du courant et de sa charge solide.

### **Erosion en masse**

Les phénomènes de mouvement de masse comprennent principalement les glissements de terrains et les coulées boueuses, phénomènes généralement observés dans les régions montagneuses.

#### **4.1.3 Quelques aspects méthodologiques de la mesure et de l'étude de l'érosion hydrique**

L'érosion peut être étudiée à différentes échelles, de la parcelle au bassin versant de plusieurs milliers de km<sup>2</sup>. Les objectifs de l'étude imposent l'échelle et les méthodes à mettre en application. **Les méthodes que nous présentons ici ont été développées sur parcelles expérimentales pour des évaluations à cette échelle.**

### **Mesures de l'érosion sur parcelles expérimentales**

Les mesures de l'érosion sur parcelles expérimentales ont été généralement pratiquées par des pédologues.

Les parcelles ont une superficie de quelques dizaines à quelques centaines de mètres carrés. Elles sont complètement isolées de l'extérieur par des tôles fichées en terre sur au moins dix centimètres (ROOSE, 1981). A l'aval, un canal récepteur dirige les eaux et les terres érodées vers un système de stockage composé d'un piège à sédiments et de plusieurs cuves reliées entre elles par un partiteur. Elles permettent la mesure du volume des eaux ruisselées à la surface du sol et du poids des terres érodées, des particules fines migrant en suspension plus ou moins stable sur de grandes distances et des particules plus grossières (sables et agrégats) rampant de proche en proche. De telles parcelles ont été utilisées par ROOSE dans l'étude des phénomènes d'érosion en Afrique Occidentale (ROOSE, 1981). Cet auteur signale des parcelles plus grandes (environ 5000 m<sup>2</sup>) qui ont été utilisées par le C.T.F.T., également en Afrique. Ces parcelles sont munies, à l'aval, d'une grande cuve (4 m<sup>3</sup>) dotée d'un seuil triangulaire et d'un limnigraphe Richard.

Les chercheurs reconnaissent les difficultés d'obtention de données précises à partir de ce type de parcelles. ROOSE (1981) a fait les remarques ci-après :

- 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 au fond des cuves, on ne peut espérer une précision des résultats à moins de dix pour cent près (ROOSE, 1981).

- 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 la première année sur de fortes pentes sans changer le ruissellement.

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

D'après COLLINET (1988), les mesures sur parcelles conduisent à des informations globales sur les quantités d'eau ruisselée et les terres érodées.

Malgré les difficultés et les imprécisions qui en découlent, les mesures sur parcelles ont rendu de grands services pour comprendre les mécanismes de l'érosion et en distinguer les causes et les facteurs (ROOSE, 1981).

### **Evaluation des pertes en terre à partir de modèles**

Dans le domaine de prédiction de la dégradation des sols, il n'existe, pour le moment, aucun modèle mathématique opérationnel, largement expérimenté et ayant valeur de théorie. Il existe cependant, pour plusieurs processus de dégradation des sols, des modèles empiriques paramétriques. Pour ce qui est du cas spécifique de l'érosion hydrique, le modèle le plus connu

existe cependant, pour plusieurs processus de dégradation des sols, des modèles empiriques paramétriques. Pour ce qui est du cas spécifique de l'érosion hydrique, le modèle le plus connu à l'échelle des parcelles est le modèle de WISCHMEIER et SMITH. Il est principalement utilisé aux Etats Unis d'Amérique.

#### **Formulation du modèle :**

$$E = R K SL C P$$

E : érosion en t/ha; 1t/ha = 2.242 tons per acre

Les autres facteurs sont sans unité :

R : indice d'érosivité des pluies

K : érodibilité du sol.

SL : facteur topographique

C : facteur du couvert végétal

P : facteur prenant en compte les pratiques purement antiérosives

A travers le monde, le modèle a fait l'objet d'études pour son adaptation éventuelle aux conditions des différentes régions. Cela a permis aujourd'hui d'avoir des informations sur le comportement de ce modèle en différentes régions du globe.

Toutefois ROOSE (1994) signale 5 limites intrinsèques à ce modèle :

- 1 Il ne s'applique qu'à l'érosion en nappe et donc jamais à l'érosion linéaire et à l'érosion en masse.
- 2 Il a été testé et vérifié dans des paysages de pénéplaines et de collines sur les pentes de 1 à 20 %, à l'exclusion des montagnes sur pentes fortes.
- 3 Les relations entre l'énergie cinétique et l'intensité des pluies, utilisées généralement dans ce modèle ne sont valables que dans la plaine américaine. Il est cependant possible de développer des sous modèles différents pour l'indice d'érosivité des pluies, R.
- 4 Le modèle ne s'applique que pour des données moyennes sur 20 ans.
- 5 Enfin le modèle néglige certaines interactions entre les facteurs. Par exemple, il n'est pas tenu compte de l'effet de la pente combiné au couvert végétal sur l'érosion, ni de l'effet du type de sol sur l'effet de la pente.

COLLINET (1988) pense que l'équation de prévision des pertes en terre ne permet pas, en Afrique de l'ouest, d'établir une comparaison précise des érodibilités. Cependant, il précise que si les prétentions se limitent à un suivi de l'évolution des érosions sous les effets du couvert végétal (facteur C) ou de la pente (facteur P), l'érodibilité K peut effectivement servir de repère à condition de rester dans le champ d'application où ont été pratiquées les observations.

## **4.2 Estimation de l'érosion hydrique sur le bassin versant du Djitiko**

### **4.2.1 Les observations de terrain**

Au cours de la phase de caractérisation des couvertures pédologiques et de description des états de surface sur le terrain, des observations ont été faites sur les manifestations de l'érosion hydrique. Ces observations ont porté :

- sur la présence de plages de couleur claire et de squelettes (sable, gravier) en surface. De tels signes peuvent attester l'existence du processus d'érosion en nappe;
- sur la forme, les dimensions (longueur et largeur) des incisions linéaires.

Il est exclu de déduire de telles observations des quantités de terre érodée. Cependant il est possible de situer la nature des processus affectant les différentes unités de paysage dans le bassin versant. Ainsi, nous avons pu observer les manifestations suivantes de l'érosion sur le bassin de Djitiko :

- L'érosion en nappe, ou érosion aréolaire, affecte un plus grand nombre d'unités de paysage que l'érosion linéaire. Elle affecte les unités morpho-pédologiques n° 3, 5, 6 et 7.

- L'érosion linéaire existe à tous les stades (griffe, rigole, nappe ravinante, ravine) et se manifeste principalement sur les unités morpho-pédologiques n° 2 et 3 qui couvrent 11,7 % du bassin versant. Les explications peuvent être respectivement la forte pente (cas de l'unité n° 2), la fragilité du matériau (unité n° 3) et la localisation au pied de collines rocheuses pour les deux unités comme le montre la topo-séquence schématique de type 2 d'altitude supérieure à 500 m. (topo-séquence n° 2, présentée plus haut).

- Aucun signe d'érosion n'est observé sur l'unité morphopédologique n° 4 qui couvre 30 % du bassin versant. L'explication en est que ce milieu cuirassé, couvert de gravillons est protégé contre l'impact des gouttes de pluie.

### **4.2.2 Application du modèle de WISCHMEIER et SMITH**

#### **Justification du choix**

Dans la présentation sommaire de ce modèle nous avons évoqué ses limites. Il faut préciser ici que les études conduites en Afrique de l'Ouest par différents chercheurs ont permis d'aboutir à des valeurs des différents paramètres de l'équation (ROOSE, 1977, 1981, 1994).

mais son utilisation doit nous permettre de comparer le comportement érosif des différentes unités cartographiques d'état de surface identifiées sur le bassin versant de Djitiko.

### **Définition des paramètres**

**R** : l'esquisse de la répartition de l'indice d'agressivité climatique annuel moyen de l'Afrique de l'Ouest et du Centre (ROOSE, 1977 et 1994) donne la valeur 500 pour Bamako. Nous avons adopté cette valeur pour le bassin de Djitiko situé 80 km au sud de Bamako.

**K** : des valeurs de ce paramètre d'érodibilité des sols ont été estimées sur différents types de sols en Afrique (ROOSE, 1977 et 1994). En tenant compte des caractéristiques des sols du bassin versant du Djitiko, nous avons retenu les valeurs données dans le tableau 4.1.

**SL** : le facteur topographique été choisi à partir de l'abaque d'après WISCHMEIER et SMITH. Les valeurs retenues figurent également au tableau 4.1.

**C** : les valeurs du facteur relatif au couvert végétal dépendent de l'état de dégradation des formations végétales naturelles (cas des milieux non cultivés) et du niveau des techniques culturales (cas des milieux cultivés). Le tableau 4.2 donne les valeurs que nous avons retenues en tenant compte de des observations effectuées.

Unité morphopédologique	Sol dominant	SL	K
Colline rocheuse	Affleurement		
Versant fortement incliné	Sol caillouteux peu épais (Lithosol)	1,0	0,01
Dépression au pied des collines	Sol argileux épais (Sol brun eutrophe)	0,1	0,30
Bas plateau cuirassé	Sol graveleux peu épais (Lithosol)	0,1	0,01
Bas glacis induré	Sol jaune moyennement épais (Sol ferrugineux tropical induré)	0,2	0,30
Bas glacis à drainage moyen	Sol beige épais (Sol hydromorphe à pseudogley)	0,2	0,30
Bas glacis à bon drainage	Sol rouge épais (sol ferrugineux tropical lessivé modal)	0,2	0,20
Dépôts alluviaux actuels	Sol épais sur alluvions actuelles (Sol hydromorphe à gley)	0,1	0,01

Tableau 4.1: Valeurs de SL et K de la formule de WISCHMEIER et SMITH pour le bassin versant de Djitiko

Occupation du sol	C
Végétation naturelle sur milieux rocheux et cuirassé	0,1
Végétation naturelle sur bas glacis	0,01
Cultures	0,6

Tableau 4.2 : Valeurs du facteur relatif au couvert végétal (C) de la formule de WISCHMEIER et SMITH pour le bassin versant du Djitiko

### Valeurs estimées de l'érosion

Les valeurs de l'érosion pour les 11 unités cartographiques d'état de surface figurent au tableau 4.3. On en déduit, selon les normes de la FAO (1980) que l'érosion est nulle à légère dans le bassin versant du Djitiko :

- Les unités cartographiques d'état de surface qui ont les plus faibles taux d'érosion sont les unités 1, 5 et 6 . Dans le cas de l'unité 1, l'explication est simple : il n'y a pratiquement pas de sol (plus de 80 % d'affleurement rocheux). Sur les unités 5 et 6, la présence de gravillons assure une protection efficace du sol ( COLLINET, 1988) et l'absence de culture sont en relation avec ce comportement.

- Les unités 4 et 9 montrent les plus fortes érosions estimées. Cela en rapport avec leur mise en culture. Elles sont respectivement cultivées à 100% et 50 %. L'érosion sur ces unités est 6 fois supérieure à celle estimée sur l'unité 2 pourtant cultivée 40 %. Cela peut confirmer l'importance du rôle des éléments grossiers dans la protection du sol (le sol est caillouteux dans l'unité 2).

- **En comparant par exemple les érosions potentielles du sol argileux sous savane clairsemée (unité 3) et sous culture (unité 4), on constate que la mise en culture a provoqué une multiplication par 3 de l'érosion.**

Unité cartographique d'état de surface	Erosion potentielle en t / ha / an
Unité 1 : Surface rocheuse	0,05
Unité 2 : Versant à sol caillouteux peu épais, cultivé à 40%	1,5
Unité 3 : Savane arborée clairsemée sur sol argileux au pied des collines	3,0
Unité 4 : Culture sur sol argileux	9,0
Unité 5 : Savane arborée sur glacis cuirassé	0,05
Unité 6 : Formation herbacée discontinue sur glacis cuirassé	0,05
Unité 7 : Savane arborée clairsemée sur sol jaune	3,0
Unité 8 : Formation herbacée sur sol jaune	3,0
Unité 9 : Bas glacis cultivé à 50%	9,15
Unité 10 : Bas glacis cultivé à 20%	1,18
Unité 11 : Dépression argileuse cultivée à 80 %	2,4

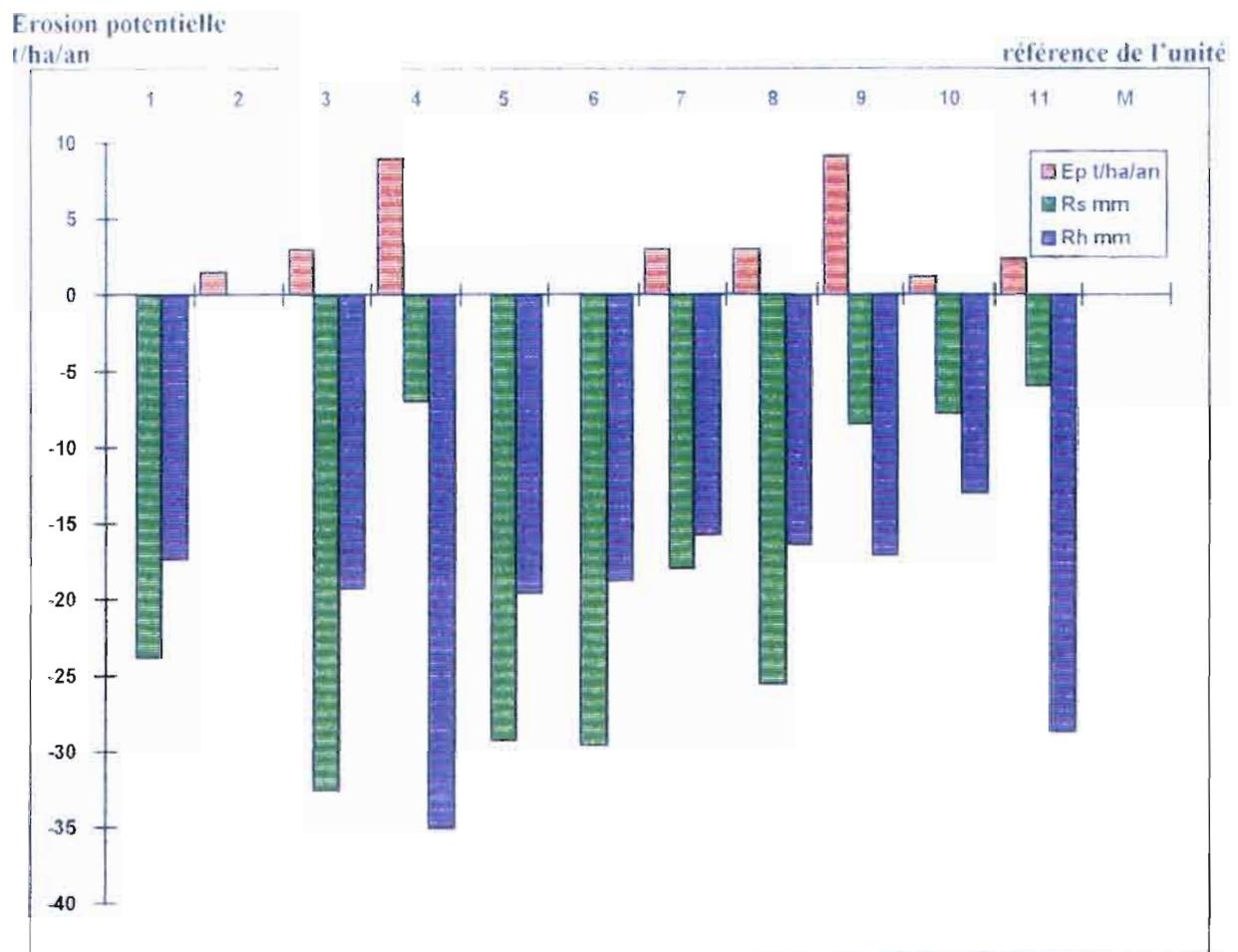
**Tableau 4.3 : Erosion potentielle estimée des unités d'état de surface du bassin versant du Djitiko**

#### **Evaluation comparée des aptitudes au ruissellement et à l'érosion**

On observe une variation peu importante de la pente de cette fonction suivant le taux de compression initiale, celle-ci agissant davantage sur le fonctionnement de la phase 2.

La hiérarchisation des unités en fonction de leur aptitude au ruissellement n'est pas exactement superposable à leur hiérarchisation en fonction de la sensibilité à l'érosion hydrique

(figure 4). Par exemple, les unités 5 et 6 ont une forte aptitude au ruissellement en début de saison des pluies et une aptitude moyenne au milieu de la saison. Elles présentent les plus bas taux d'érosion, principalement en raison de leur position sur un glacis cuirassé où la surface du sol est protégée par une forte charge grossière. L'unité 9 a une faible aptitude au ruissellement en début de saison mais présente le plus fort potentiel érosif.



**Ruissellement Potentiel**  
mm  
pour  $P_u = 50$  mm  
Rs : condit sèche soit  $IK = 0$  mm  
Rh : condition humide soit  $IK = 20$  mm

référence de l'unité

- u1 Surface rocheuse à petites plages limono sableuses
- u2 Versant caillouteux peu épais, cultivé à 40%
- u3 Savane arborée clairsemée sur sol argileux en pied de collines
- u4 Culture sur sol argileux profond en pied de collines
- u5 Savane arborée sur bas-plateau cuirassé
- u6 Formation herbacée discontinue sur bas plateau cuirassé
- u7 Savane arborée clairsemée sur sol jaune
- u8 Formation herbacée sur sol jaune
- u9 Bas-glacis cultivé à 50%
- u10 Bas-glacis cultivé à 20%
- u11 Dépression argileuse cultivée à 80%

Figure 4 Evaluation comparée des aptitudes au ruissellement et à l'érosion, par unité " d'état de surface "

## **Conclusion générale**

Dans le contexte actuel de dégradation des ressources naturelles en Afrique soudano-sahélienne, le bassin versant de taille réduite ou moyenne est un cadre idéal d'étude pour mieux comprendre les dynamiques en cours.

**L'étude des couvertures pédologiques** a permis d'identifier 7 principales unités de paysages qui se répartissent suivant deux types principaux de toposéquences :

**Une première toposéquence comprenant successivement** : le bas plateau cuirassé, au sommet, le bas glacis induré et le bas glacis à sol profond. Le potentiel de ruissellement des états de surface liés au plateau cuirassé (unités n° 5 et 7 des états de surface ) nous font penser à un risque élevé d'érosion linéaire sur la partie aval de la toposéquence : sur les sols beiges épais, rouges épais et les sols jaunes moyennement épais. L'extension des superficies agricoles sans aménagement visant à protéger les sites les plus exposés, ne peut que contribuer à accroître le phénomène érosif en laissant les sols nus, sans protection contre l'agressivité des pluies et du ruissellement.

**Une seconde toposéquence comprenant successivement** : la colline rocheuse, son versant caillouteux, les sols argileux dans les dépressions au pied des collines, le bas glacis cuirassé, les sols jaunes puis la dépression argileuse (Figure 2.3 type 2). Le fort potentiel de ruissellement, en début de saison, du sommet de cette toposéquence (unités 1 et 2 des états de surface) fait qu'il existe des ravines parcourant les dépressions sur sols argileux avec de profondes incisions par endroits. Toute dégradation supplémentaire de la végétation contribuera à aggraver l'érosion linéaire : les sols argileux sont reconnus pour leur fragilité (ROOSE, communication personnelle).

**La cartographie des états de surface** a conduit à distinguer 11 unités sur le bassin de Djitiko. Chacune d'elles se caractérise par la présence d'au moins 2 types de surface élémentaire et, sur l'ensemble du bassin, la description des surfaces élémentaires, par référence au catalogue de CASENAVE et VALENTIN, a permis d'identifier 12 types différents de surfaces élémentaires. **L'évaluation de l'aptitude au ruissellement** des états de surface a permis de hiérarchiser les unités d'états de surface en fonction de leur aptitude au ruissellement : des unités à forte aptitude (coefficients de ruissellement supérieurs à 0,5) aux unités à faible et très faible aptitude (coefficients de ruissellement inférieurs à 0,3 et à 0,2).

En terme de superficie, **les sols graveleux de faible épaisseur**, associés aux plateaux cuirassés occupent 40 % du bassin versant. Ces sols ne font pas l'objet d'une mise en culture, les populations étant conscientes de leur faible valeur agricole. Lorsqu'ils portent une abondante végétation herbeuse, leur aptitude au ruissellement est moyenne. Elle peut être forte

abondante végétation herbeuse, leur aptitude au ruissellement est moyenne. Elle peut être forte en début de saison quand le couvert végétal est encore peu développé après avoir été brûlé par les feux de brousse.

**Les sols moyennement épais et les sols épais des bas glacis**, cultivés entre 20 et 50% de leurs superficies, occupent respectivement 21 % et 15% de la superficie du bassin versant. Avec leur belle couverture herbeuse naturelle, ces sols ont une faible aptitude au ruissellement. Cultivés, ces sols ont une aptitude au ruissellement qui varie très fortement au cours de la saison des pluies. Faible juste après les labours ou après les sarclages, l'aptitude au ruissellement croît très rapidement pour devenir très forte après 150 à 200 mm de pluie sans sarclage.

**L'érosion potentielle estimée** à partir du modèle de WISCHMEIER et SMITH et des paramètres établis pour l'Afrique de l'Ouest amène les remarques suivantes : tout le bassin présente une érosion nulle à légère si l'on se réfère aux normes de la FAO.

**La mise en culture des 3 principaux sols cultivés favorise une nette augmentation de l'érosion potentielle : une multiplication par 6 sur sol argileux au pied des collines, par 60 sur sols profonds beiges et rouges des bas glacis.**

**Dans l'étude des petits bassins versants tropicaux en zone de savane humide, la démarche état de surface est pertinente.** Elle rend compte de l'état de l'activité biologique végétale et animale par la description des strates de la végétation, des constructions micro-fauniques et des activités de la macrofaune. Elle prend en compte le type de sol qui conditionne en partie le comportement hydrologique de l'état de surface. Cependant, des études complémentaires semblent encore nécessaires pour cerner la diversité des micro-organisations pelliculaires de surface en zone de savane humide et approfondir les connaissances sur leur évolution et l'évolution de leur comportement hydrodynamique au cours de la saison des pluies.

L'utilisation des formules empiriques de WISCHMEIER et SMITH est possible en zone de savane humide grâce aux travaux des chercheurs de l'ORSTOM (ROOSE, 1977, 1994) qui servent de référence pour l'évaluation des potentiels d'érosion aréolaire à l'échelle des parcelles de quelques centaines de mètres carrés. A l'échelle des petits bassins versants il n'existe pas encore de méthode fiable pour évaluer les risques d'érosion linéaire. L'évaluation des potentiels de ruissellement à partir de la carte des états de surface constitue déjà un premier pas permettant d'identifier les zones génératrices de ruissellement.

## Bibliographie

- AFES., 1992. Référentiel Pédologique 1992. Principaux sols d'Europe. Editions INRA Paris : 222 p.
- BAIZE D et JABIOL B., 1995. Guide pour la description des sols Editions INRA, Paris : 375 p.
- BRUNET-MORET et al., 1986. Monographie hydrologique du fleuve Niger Tome 1- Niger Supérieur. Editions ORSTOM, Paris : 396 p.
- BOLI Z., BEP A. et ROOSE E. 1991. Enquête sur l'érosion en région cotonnière du Nord Cameroun. Bull. Réseau Erosion 11 : 127-138
- CASENAVE A et VALENTIN C; 1989. Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. Edition ORSTOM :229 p.
- CHILDS E.L., 1969. An introduction to the physical basis of soil soil water phenomena. Willey interscience New York, NY. 493 p.
- C.P.C.S, 1967. Classification des sols. Edition 1967. Travaux de la commission de Pédologie et Cartographie des sols, 92 p. Multigr.
- COLLINET J., 1988. Comportements hydrodynamiques et érosifs des sols de l'Afrique de l'Ouest : évolution des matériaux et des organisations sous simulation de pluie. Thèse de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg, 513 p.
- DEVINEAU J.L., FOURNIER A., LAMACHERE J.M., MALECK C., 1992. Le programme d'évaluation préliminaire SPOT n° 149, SPOT-OURSI. Observations au sol, photo-interprétation et traitements numériques des images satellitaires sur le bassin versant de la mare d'Oursi. Communication au colloque "Mare d'Oursi" CNRST/ORSTOM/LIPTAKO-GOURMA. Ouagadougou, février 1992, 20 p.
- DIALLO D et KEITA D., 1992 Rapport d'étape des recherches sur les classifications paysannes des sols dans le Haut Bani Niger et le Plateau de Koutiala IPR de Katibougou, Laboratoire d'Agropédologie : 54 p.

ELLWELL H.A. et STOCKING M.A., 1973. Parameters for estimating annual runoff and soil loss from agricultural land in Rhodesia. *Water Resources Research* 11 (4) : 601-605

FAO., 1980. Méthode provisoire pour l'évaluation de la dégradation des sols. 88 p.

FREYSSINET P., 1990. Géochimie et minéralogie des latérites du Sud-Mali; évolution des paysages et prospection géochimique de l'or. BRGM ,Orléans : 45 p.

HILLEL D., 1974. L'eau et le sol, principe et processus physique. LEUVEN, Paris, Bruxelles, 288 p.

HUDSON N.W. 1965. The influence of rainfall on the mechanics of soil erosion. MSc Thesis, University of Capetown.

HUDSON N. W. 1983. Soil conservation. Batsford. 324 p

HORTON R.E., 1933 The role of infiltration in the hydrological cycle. *Trans. Amer. Geophys. Un.* 14, pp 446-460

HUBERT P et CARBONNEL J.P., 1993 Approche statistique de l'aridification de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of Hydrology*, vol.95, pp. 165-183.

I.N.R.A., 1972. Les sols dans le paysage et leurs aménagements. S.E.S INRA Montpellier : 173 p.

JAMAGNE ., M.. 1994. La cartographie des sols. Analyse spatiale de la couverture pédologique *In : Duchaufour Ph. et Souchier B. Pédologie, tome 2; Constituants et propriétés du sol, 2<sup>e</sup> édition*, MASSON, Paris, Milan, Barcelone .pp 588-617

KEITA D., 1989. Contribution à l'étude des classifications paysannes des sols du Haut Bani Niger Occidental et du Djitoumou. Mémoire de fin d'étude d'ing. IPR de Katibougou : 30 p + annexes.

LAFFORGUE A., 1977. Inventaire et examen des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration sur parcelles. *Cahiers ORSTOM, série Hydrologie*, vol XIV, 4 . pp. 229-344.

LAFFORGUE A. et 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, pp 243-249.

LAMACHERE J.M., 1987. Cartographie des aptitudes au ruissellement et à l'infiltration des sols d'un bassin versant sahélien par interprétation des images SPOT : le bassin versant de la mare d'Oursi au Burkina Faso. Colloque international SPOT 1, novembre 1987, Paris. Utilisation des images, bilan, résultats. CEPADUES éditions : p. 41-51.

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 1991, IAHS Publ. n°199, p. 109-119.

LAMACHERE J.M., 1995. Variabilité spatio-temporelle des états de surface en zones sahélienne et soudanienne (Burkina Faso) : effets sur le ruissellement et sa modélisation. Journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier, 13-14 septembre 1994. (à paraître).

LAMACHERE J.M et PUECH C., 1995. Cartographie des états de surface par télédétection et prédétermination des crues des petits bassins versants en zones sahélienne et tropicale sèche. Communication à la conférence à la mémoire de Jean RODIER. Paris 3 et 4 mai 1995. 11 p. (à paraître).

LE BORGNE J., 1987; La dégradation actuelle du climat en Afrique, entre Sahara et Equateur. In : La dégradation des Paysages en Afrique de l'Ouest 17-36.

MICHEL M., 1973. Etude géomorphologique des bassins des fleuves Sénégal et Gambie, tome 2. Editions ORSTOM, Paris : 715 p

MOLINIER M., 1969. Etude hydrologique des bassins versants du Djitiko et du Barraro. Rapport définitif, ORSTOM : 61 p.

MONIMART M., 1989. Femmes et lutte contre la désertification au Sahel. Synthèse de l'étude. Copyright OCDE, Paris : 20 p.

MOREL SEYTOUX H.J., 1981. Application of infiltration theory for the determination of excess rainfall hyetograph. Water resources bulletin, pp 1012-1022

NOUVELOT J.F., 1993. Guide des pratiques hydrologiques sur les petits bassins versants ruraux en Afrique tropicale et équatoriale. CIEH-ORSTOM : 539 p.

OLIVRY J.C., 1983. Le point en 1982 sur l'évolution de la sécheresse en Sénégambie et aux Iles du Cap-Vert. Examens de quelques séries de longue durée (débits et précipitations). Cahiers ORSTOM, Série Hydrologie, vol XX, n°1, pp. 47-69.

OLIVRY J.C., 1987. Les conséquences durables de la sécheresse actuelle sur l'écoulement du fleuve Sénégal et l'hypersalinisation de la basse Casamance. In: *The Influence of Climate Change and Climatic Variability on the Hydrologic Regime and Water Resources* (Proc. Vancouver Symp. August 1987, 501-512. IASH. no 168.

ORSTOM et CNRST., 1992. Environnement et Qualité des Apports du Niger au Sahel. Bamako : Document de présentation du projet EQUANIS.

PIERI C., 1989. Fertilité des terres de savane. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara. Paris, Ministère de la Coopération et du Développement, CIRAD, 444 p.

PIRT., 1983. Les ressources terrestres au Mali. Kenner Printing Co. New York : Atlas + descriptions annexes.

PIRT, 1986. Zonage agroécologique du Mali. EDIM, Bamako : 149 p. et carte.

POURRUT P et 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.

RICHARDS S.J., 1965. Physical conditions of water in soil, chap 8, in C.A. BACK et al (eds.). *Methods of soil analysis, Part.I*, Academic press, New York : 770 p.

RUELLAN A et DOSSO M., 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. Thèse de doctorat de l'Université d'Orléans , Travaux et Documents de l'ORSTOM, Paris : 567p.

ROOSE E.,1994. Introduction à la gestion conservatoire dell'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Bulletin pédologique de la FAO, N° 70 : 420 p.

ROOSE E et PIO J., 1984. Runoff, erosion and soil fertility restauration on the Mossi Plateau Central, Burkina Faso, Symposium Harare, Zimbabwe, AISH publication n° 144 : 485-498.

SIRCOULON J., 1987. Variations des débits des cours d'eau et des niveaux des lacs en Afrique de l'Ouest depuis le début du 20 è siècle. In: *The Influence of Climate Change and Climatic Variability on the Hydrologic Regime and Water Resources* (Proc. Vancouver Symp. August 1987, 501-512. IASH. no 168.

VACHAUD G., 1985. Intervention orale . Journées hydrologiques de Montpellier. Colloques séminaires . Editions ORSTOM, Paris : 200 p

VALENTIN C., 1986. Différencier les milieux selon leur aptitude au ruissellement : une cartographie adaptée aux besoins hydrologiques. Journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier. ORSTOM, Colloques et Séminaires, pp 50-74.