

**TELEDETECTION, ETATS DE SURFACE
ET CARTOGRAPHIE DES RISQUES D'EROSION
EN ZONE SOUDANO-SAHELIENNE
(Bassin versant de Samniwéogo, province du Yatenga, Burkina Faso)**

Jean-Marie LAMACHERE*, François GUILLET**

**Centre Orstom, Lab. d'hydrologie, 911 avenue Agropolis, BP 5 045, 34 032 Montpellier

** La Pergola, E 8 Cours Malbosc, 34 080 Montpellier, France

Résumé

En zone soudano-sahélienne, la cartographie des états de surface par télédétection conduit à l'élaboration d'une nouvelle méthode de cartographie des risques d'érosion utilisant les relations hydro-pluviométriques déterminées sous simulation de pluies pour produire une carte des potentiels de ruissellement à l'échelle élémentaire, puis une carte des volumes ruisselés potentiels à l'échelle des versants. Cette carte est ensuite combinée à la carte géomorphologique, ou à la carte topographique, pour dresser la carte des risques d'érosion.

Des observations au sol, judicieusement réparties sur les surfaces à cartographier sont indispensables à la description des états de surface et à la caractérisation des risques d'érosion ou de sédimentation, les deux phénomènes étant fréquemment associés sur un même versant. Pour illustrer notre propos nous traiterons de la cartographie des risques d'érosion sur un petit bassin versant soudano-sahélien : le bassin versant de Samniwéogo, situé dans la région de Bidi, province du Yatenga, au nord-ouest du Burkina Faso.

Introduction

En zones sahéenne et soudano-sahélienne, l'amélioration de l'estimation des ruissellements à l'échelle des petits bassins versants viendra d'une meilleure connaissance de l'aptitude des sols au ruissellement (Rodier et al., 1984). A cette affirmation on peut ajouter que, les risques d'érosion hydrique étant étroitement associés aux ruissellements sur les versants, l'évaluation des risques d'érosion hydrique passe aussi par une meilleure connaissance de l'aptitude des sols au ruissellement et à l'infiltration. L'une des façons de répondre à cette exigence a consisté à mesurer l'aptitude au ruissellement des surfaces élémentaires par simulation de pluies, à l'échelle du mètre carré, dans toute l'Afrique de l'Ouest. Une typologie générale a été proposée par Casenave et Valentin sous la forme d'un catalogue : "Les états de surface de la zone sahéenne" (1989). Selon ces auteurs, "le terme état de surface désigne un système de surfaces élémentaires à un instant donné, système qui constitue un ensemble homogène au sein duquel les différentes composantes entretiennent des relations fonctionnelles quant au ruissellement et à l'infiltration".

Une autre réponse possible, complémentaire à la précédente, consiste à utiliser les nouveaux outils de connaissance et de représentation de la surface du sol qui se développent avec la télédétection, les SIG (Système d'Information Géographique) et les MNT (Modèle Numérique de terrain). De nombreux chercheurs ont développé l'utilisation des SIG dans la modélisation hydrologique (Kovar & Nachtnebel, 1996) mais peu d'auteurs intègrent la télédétection dans l'analyse des processus hydrologiques (Schultz & Barrett, 1989). Dans cet article, en prenant

comme exemple le petit bassin versant de Samniwéogo, nous exposerons brièvement l'utilisation de ces nouveaux outils avec :

- a) la description au sol des états de surface,
- b) l'utilisation de la télédétection pour la cartographie des états de surface,
- c) la détermination des potentiels de ruissellement,
- d) la cartographie des risques d'érosion et de sédimentation.

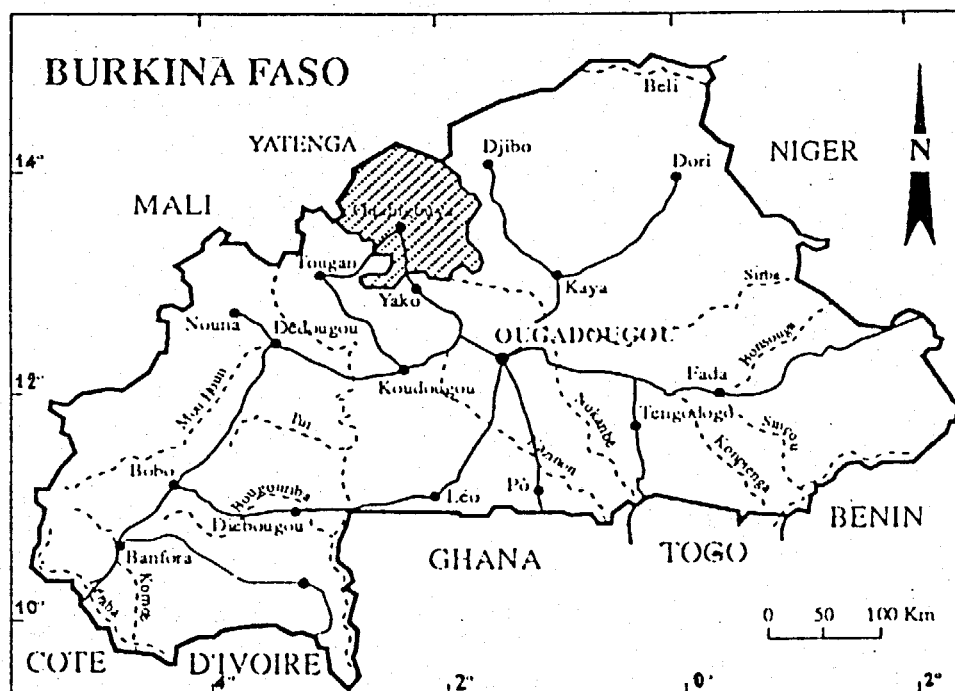


Figure 1 : Carte de situation de la province du Yatenga au Burkina Faso.




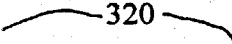
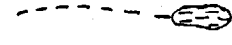

LE PETIT BASSIN DE SAMNIWEOGO

La figure 2 présente la faible topographie du petit bassin de Samniwéogo à partir d'un extrait de la carte de Thiou au 1/50 000 ème.

Géologie : Le bassin versant de Samniwéogo est localisé à la bordure ouest du massif granitique de Bidi. Il est encadré à l'est par les formations volcaniques de la région de Koumbri, à l'ouest par des formations volcano-sédimentaires. Toutes ces formations sont d'âge Birimien. Plus à l'ouest, dans la plaine du Gondo, le socle Birimien est recouvert de formations sédimentaires du Précambrien supérieur et de formations argilo-sableuses peu épaisses (quelques mètres) du Continental terminal.

Géomorphologie : Le massif granitique de Bidi est caractérisé par un relief mollement ondulé de pénéplaine à pente faible vers le nord-ouest, en direction de la plaine du Gondo. La géomorphologie régionale est commandée par les phénomènes de cuirassement qui, dans la région de Bidi, ont abouti au cours du quaternaire à la formation des trois unités suivantes : haut glaciais, moyen glaciais et bas glaciais. Le haut et le moyen glaciais forment la majorité des reliefs cuirassés de la province du Yatenga (Boulet 1968, Marchal 1983). Le haut glaciais se situe à une altitude supérieure à 360 mètres à l'est de la région vers Koumbri. Le moyen glaciais se situe entre les altitudes 320 et 360 mètres. Il forme des croupes gravillonnaires ou des glaciais monoclinaux à pente faible avec un talus nettement marqué. Le bas glaciais forme la surface fonctionnelle, rarement cuirassée.

LEGENDE

-  Savane arborée dense (Brousse tigrée)
-  Savane arborée ou arbustive
-  Savane arbustive lâche
-  320
Courbe de niveau
-  Cours d'eau et mare
-  Limite du bassin versant

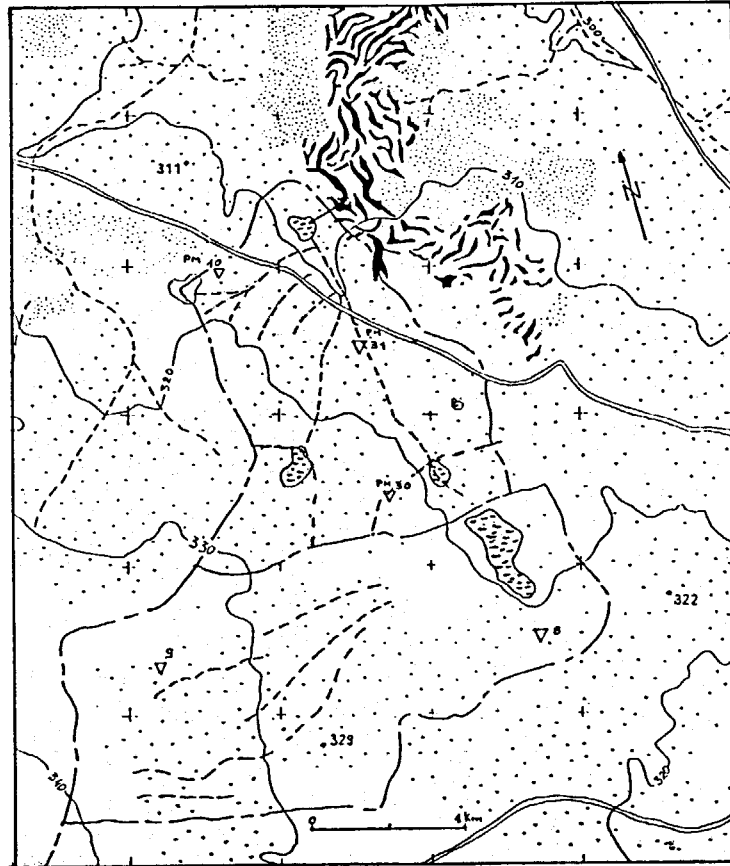


Fig. 2 : Carte topographique du bassin versant de Samniwéogo. (IGB, Thiou, 1/50 000)

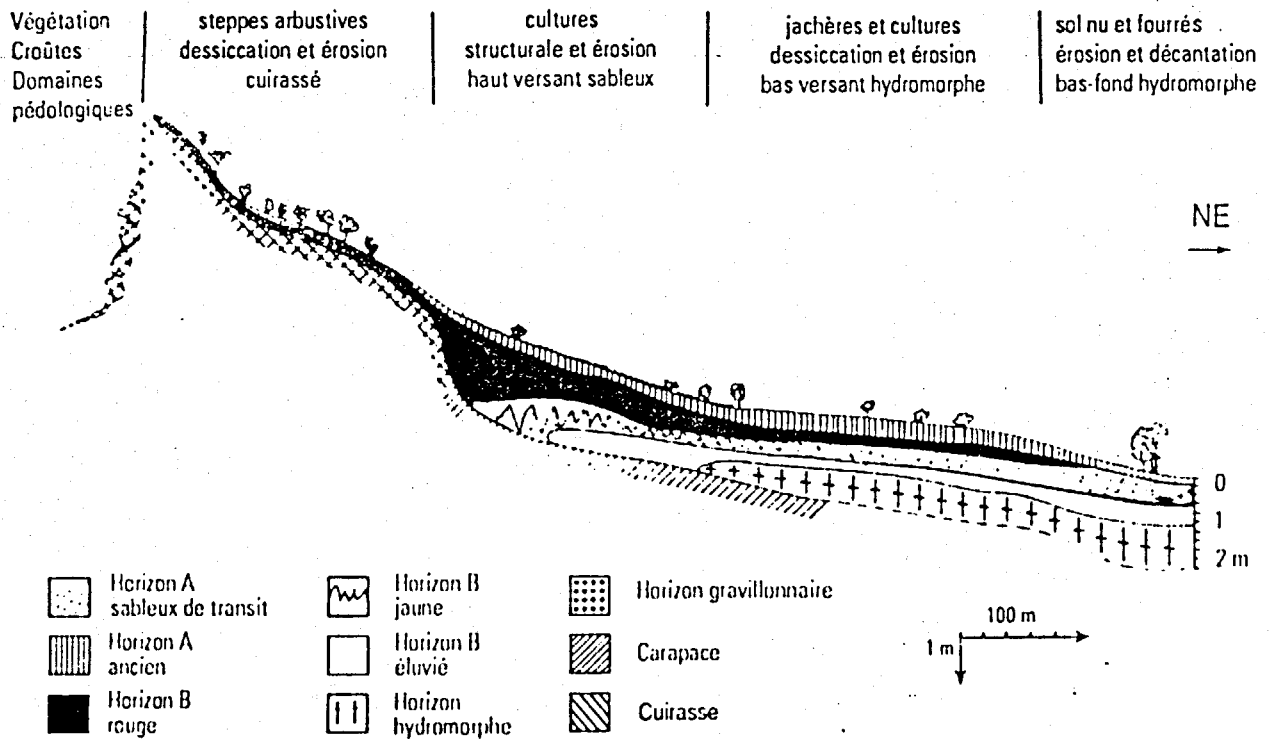


Fig. 3 : Toposéquence de Samniwéogo, versant ouest du bassin (Serpantié et al., 1992).

La limite ouest du petit bassin de Samniwéogo (Figure 3) est formée par un lambeau de cuirasse de moyen glacis prolongé par une carapace recouverte d'une couche de sables éoliens. Epaisse de 25 cm à la limite du domaine cuirassé, la couche de sables éoliens atteint rapidement 2 mètres d'épaisseur. Ces sols filtrants, sur une pente de 1 à 3 %, enrichis en argiles en profondeur, sont exploités par une culture de mil sans fumure. La toposéquence de Samniwéogo est assez typique des versants cultivés de la région de Bidi. Elle se caractérise des autres toposéquences sur cuirasse ou carapace par l'épaisseur assez forte de sa couverture sableuse éolienne.

Climat : Le climat de la région est de type tropical sud sahélien à soudano-sahélien, caractérisé par une courte saison des pluies de juin à octobre (4 mois) et une longue saison sèche de novembre à avril (8 mois). La pluviométrie moyenne interannuelle de la région était de 611 mm sur la période 1920-69, de 465 mm sur la période 1970-90. Les averses sont généralement de courte durée, avec un corps d'averse de 30 à 45 mn où les intensités maximales en 5 minutes sont souvent supérieures à 60 mm/h. Le corps de l'averse totalise 60 à 80 % de la hauteur pluviométrique totale. Il est suivi d'une traîne de durée variable où l'intensité pluviométrique chute rapidement à des valeurs inférieures à 5 mm/h. Les pluies sont donc presque toujours de nature orageuse et fortement agressives.

Hydrographie : Le réseau hydrographique du bassin de Samniwéogo est caractérisé par une forte tendance à l'endoréisme. Cet endoréisme est presque complet pour la partie amont du bassin versant dont les eaux se concentrent dans une mare pour laquelle il n'a pas été observé de déversement sur la période 1987-92. Il est incomplet pour la partie aval, pour laquelle les eaux de la mare de Samniwéogo se déversent plusieurs fois par an en direction du bas-fond de Bidi. L'orientation générale du réseau hydrographique est double: une orientation nord à nord-ouest qui correspond à la direction régionale des écoulements vers la plaine du Gondo et une orientation est à nord-est, secondaire, qui correspond à la pente locale du relief. Il en résulte un tracé en baïonnette du réseau hydrographique, caractéristique des tracés hydrographiques commandés par la tectonique régionale.

LA DESCRIPTION AU SOL DES ETATS DE SURFACE

En zone soudano-sahélienne, les surfaces naturelles se différencient principalement par le type de sol, le couvert végétal et l'organisation superficielle du sol (encroûtement). Le type de sol varie peu au cours du temps mais la croissance de la végétation annuelle engendre des variations saisonnières du couvert végétal. Les surfaces cultivées pérennes se localisent à proximité des lieux d'habitation (champs de case). Les surfaces cultivées non pérennes se localisent à l'écart des lieux d'habitation (champs de brousse). Sur les champs de brousse, les surfaces cultivées varient chaque année en fonction des assolements et des stratégies paysannes. Par contre, les types de culture, la nature et la dynamique des surfaces au cours du cycle cultural y sont relativement constants.

Le bassin de de Samniwéogo se situe à l'écart des lieux d'habitation et les paysans y développent donc des cultures non pérennes. Le bassin se divise schématiquement en trois grands ensembles géomorphologiques: le domaine cuirassé, le domaine sableux à drainage limité en profondeur et le domaine sableux hydromorphe.

Le domaine cuirassé se situe au sommet des versants où la densité du couvert végétal différencie deux sous-ensembles : une unité de savane arbustive dense et une unité de savane arbustive dégradée.

Le domaine sableux à drainage limité en profondeur se situe à l'aval du domaine précédent. La cuirasse y est nappée d'une couverture de sables éoliens. La densité du couvert végétal et la

mise en culture subdivisent ce domaine en trois faciès étagés: une savane arbustive lâche, une savane arbustive lâche dégradée et des champs cultivés.

Le domaine sablo-argileux hydromorphe est localisé dans la partie aval de la toposéquence et sur les replats topographiques. Le sol, mal drainé, est hydromorphe à faible profondeur (0,5m.). Le type de couvert végétal et la mise en culture subdivisent ce domaine en quatre unités: les champs cultivés, une savane herbeuse très dégradée, une savane herbeuse dense et une savane arborée et arbustive dense.

La typologie des surfaces élémentaires

Tableau 1 : Les surfaces élémentaires de la région de Bidi.

Types de surfaces élément.	Coefficients hydro-pluviométriques				Int. de pluie lim. de ruissellement		Caractéristiques des surfaces, description
	a	b	c	d	I_0	I_{min}	
Surfaces élémentaires cultivées							
C1.1	0,38	0,0050	-0,10	8,4	35	30	Sols sableux fins après sarclage ou labour
C1.2	0,65	0,0050	-0,040	7,2	12	10	Sols sableux fins 100 mm après sarclage
C1.3	0,81	0,0025	-0,012	4,1	6	5	Sols sableux fins 200 mm après sarclage
C2.1	0,48	0,0050	-0,075	10,0	30	25	Sols limono-sableux après sarclage
C2.2	0,75	0,0012	0,18	8,2	10	7	Sols limono-sableux 100 mm après sarclage
C2.3	0,86	0,0025	0,08	4,3	6	5	Sols limono-sableux 200 mm après sarclage
Surfaces élémentaires à faible activité faunique et sans charge grossière							
DES 1	0,30	0,0030	0,010	8,0	30	20	Sol sableux et couvert herbeux sup. à 50 %
DES 2	0,43	0,0010	0,10	10,0	25	15	Sols sableux et couvert herbeux inf. à 50 %
DES 3	0,52	0,0018	0,001	12,0	30	20	Sols lim.-sableux et couv. herb. sup. à 50 %
DES 4	0,51	0,0010	0,070	7,6	12	12	Sols lim.-argileux et couv. herb. sup. à 50 %
ST2.1	0,50	0,0040	0,020	10,0	10	5	Sol nu à 2 micro-horizons structuraux
ST2.2	0,30	0,0030	0,010	8,0	20	10	Idem ST2.1 et couvert herb. sup. à 50 %
ST3	0,85	0,0030	0,010	8,0	10	4	Sol nu à 3 micro-horizons structuraux
DEC 1	0,80	0,0010	0,080	12,0	10	2	Croûte de décantation sur sol lim.-argileux
DEC 2	0,45	0,0020	0,140	7,7	15	5	Croûte de décantation sur sols sableux
DEC 3	0,80	0,0010	0,080	12,0	2	0,4	Croûte de décantation sur sol argileux
ERO 1	0,95	0,0010	0,090	9,0	3	1	Sol nu d'érosion sur sols argileux gravillon.
ERO 2	0,79	0,0010	0,20	9,5	10	8	Sol nu d'érosion sur sols sableux
ERO 3	0,86	0,0010	0,12	7,7	10	6	Sol nu d'érosion sur sols limono-sableux
Surfaces élémentaires à faible activité faunique avec charge grossière supérieure à 40 %							
GRO 1	0,99	0,0010	0,050	6,0	10	2	Graviers et gravil. enchâssés dans une croûte
GRO 2	0,87	0,0010	0,080	6,1	15	5	Graviers et gravil. libres sur une croûte

A. Casenave et C. Valentin (1989) définissent la surface élémentaire comme une unité pédologique superficielle sur un même type de sol dont la surface est caractérisée par un couvert végétal homogène et une organisation qui résulte des transformations subies sous l'effet des facteurs météorologiques, phytoécologiques, fauniques et anthropiques.

Dans la région de Bidi, Lamachère a distingué 21 types de surfaces élémentaires (in Mansour, 1995) brièvement décrits dans la dernière colonne du tableau 1. Sur ce tableau figurent également les coefficients hydro-pluviométriques caractérisant l'aptitude de ces surfaces au ruissellement et à l'infiltration sous pluies simulées.

Les états de surface

A l'intérieur des 3 domaines géomorphologiques du bassin de Samniwéogo, Guillet (1991) a extrait un échantillon de 75 sites (environ 1000 m² pour chaque site) choisis selon des critères morphopédologiques. Ces sites ont fait l'objet de descriptions minutieuses du couvert végétal, du type de sol, de sa porosité, de l'activité biologique superficielle et de la répartition des surfaces élémentaires.

Un codage systématique des descriptions a permis un traitement statistique des données par analyse factorielle des correspondances et classification à l'aide de la méthode des distances minimales de tri (DIMITRI, Girard 1983). Neuf types de surfaces naturelles de référence (Guillet, 1991) ont été définis. Ils sont symbolisés par les lettres A à I, décrits ci-après avec leur composition en types de surfaces élémentaires par les valeurs des taux moyen de recouvrement.

SR "A" : milieu cuirassé ou rocheux. Les cuirassements ou enrochements granitiques sont plus ou moins fissurés, avec des éléments grossiers à la surface du sol. Une végétation arbustive se développe dans les anfractuosités de la cuirasse. Un tapis herbacé couvre les dépôts sableux éoliens formant des micro-buttes. Composition: 0,02 DES1 + 0,05 DES2 + 0,03 ST21 + 0,15 DEC1 + 0,05 DEC2 + 0,20 ERO1 + 0,40 GRO1 + 0,10 GRO2.

SR "B" : milieu dégradé sur cuirasse. Les sols sableux peu épais sont couverts de pellicules d'érosion de couleur rouge à jaune, avec des figurés superficiels en forme de polygones. Le méso-relief est constitué de micro-dunes, la couverture végétale faible à nulle. Les formations cuirassées sont peu profondes, la pente est modérée. Composition: 0,35 DES1 + 0,10 ST21 + 0,10 DEC1 + 0,10 DEC2 + 0,15 ERO1 + 0,20 GRO1.

SR "C" : milieu sableux de haut de pente bien drainé en surface. Ces surfaces se développent sur les zones légèrement concaves des hauts de pentes à cuirasse ou carapace peu profonde. La couverture végétale y est dense, herbacée et arbustive. Les perforations animales y sont importantes. L'hydromorphie s'y manifeste parfois à faible profondeur. Composition: 0,45 DES1 + 0,05 ST21 + 0,05 DEC1 + 0,20 DEC2 + 0,20 ERO1 + 0,05 GRO1.

SR "D" : milieu dégradé de haut de pente assez bien drainé. Des pellicules d'érosion brun-jaune, sans algues, apparaissent sur sols sableux avec peu d'éléments grossiers. Les figurés d'érosion (rainurages et fentes de retrait) y sont fréquents. Le méso-relief est peu important, cultural ou micro-dunaire; la pente est faible à modérée. La couverture végétale est faible. Composition: 0,05 DES1 + 0,30 DES2 + 0,05 ST21 + 0,10 ST3 + 0,05 DEC2 + 0,45 ERO2.

SR "E" : domaine sableux. Des pellicules de dessiccation couvrent des sols sableux rouges à jaunes. Le méso-relief est important. La couverture végétale est modérée, principalement herbacée (*Zornia*, *Eragrostis*) avec des arbustes aux abords des talwegs (*Guiera Senegalensis*). La pente est modérée. Composition: 0,50 DES1 + 0,10 DES2 + 0,05 ST21 + 0,20 DEC2 + 0,15 ERO2.

SR "F" : milieux cultivés et jachères de bas de pente. Les sols sont sableux fins, brun-jaune à gris, couverts de pellicules de dessiccation. Cette surface est peu colonisée par les micro-algues. Les perforations fauniques y sont assez fréquentes. Le méso-relief est prononcé, la couverture végétale constituée principalement d'herbes annuelles (*Shoenefeldia gracilis.*). La pente est faible. Composition: 0,50 DES3 + 0,20 DES4 + 0,20 DEC2 + 0,10 ERO3.

SR "G" : milieux dégradés de bas de pente. Des pellicules d'érosion et de décantation apparaissent sur sols sableux, avec ou sans algues. L'érosion forme des micro-marches, le rainurage superficiel est polygonal. La couverture végétale est faible à nulle. L'hydromorphie apparaît à faible profondeur (1m); la pente est faible. Composition: 0,05 DES1 + 0,30 DES2 + 0,05 ST21 + 0,15 DEC2 + 0,45 ERO2.

SR "H" : bas-fond sableux. Des croûtes de ruissellement, de dessiccation ou de décantation couvrent des sols sablo-argileux, souvent colonisées par les feutrages algaires à *Scytonema sp.*; l'aspect du sol est compact, sans porosité biologique. La couverture végétale est faible arbustive et arborée. Composition: 0,20 DES3 + 0,40 DES4 + 0,30 DEC2 + 0,10 ERO3.

SR "I" : bas fond hydromorphe peu ou pas cultivé. Des croûtes de décantation, associées à des cyanophycées, apparaissent sur des sols argileux. Les perforations animales sont nombreuses; les fentes de retrait forment de larges ouvertures. La couverture végétale est dense, herbacée, arbustive et arborée. La pente y est nulle à très faible. Composition: DEC3.

LA CARTOGRAPHIE DES ETATS DE SURFACE

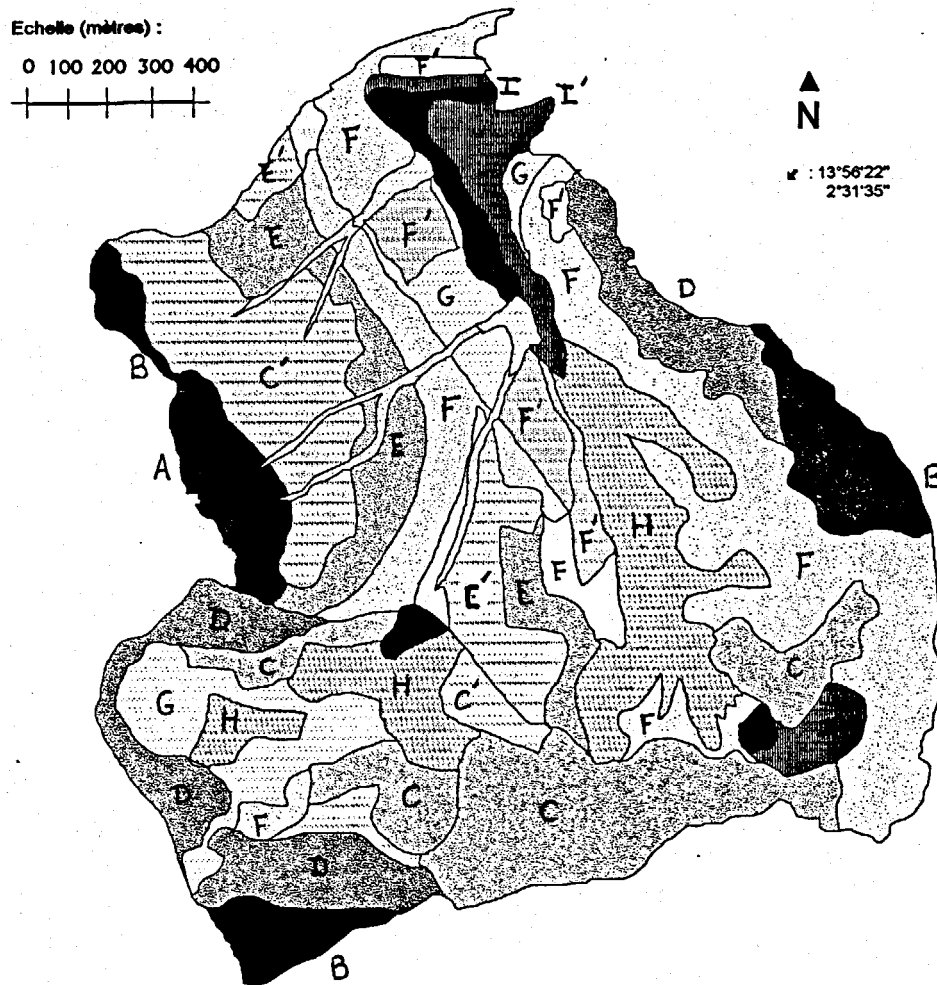
La cartographie des états de surface du petit bassin de Samniwéogo a été réalisée à partir d'une image SPOT prise le 22 juin 1987, en début de saison des pluies. A cette époque de l'année, le faible taux de recouvrement de la végétation herbeuse permet une bonne identification des types de sols.

Tableau 2 : Correspondance entre classes radiométriques et Surfaces de Référence

Surfaces de Référence	Classes radiométriques							Sommes des sites	
	α	β	χ	δ	ε	ϕ	γ		η
A	9	1	1						11
B		1	5						12
C		2			2		2		6
D		1			6	1			8
E		2		10	3	3	1		19
F					8				8
G						7			7
H								3	3
I		1					2	4	7
Canaux	Valeurs moyennes et fourchettes de réflectance des canaux SPOT								
XS 1	51-85	80-85	82	83	90-110	100-120	77	64-85	
XS 2	51-95	95-135	82	83	90-115	98-130	81	57-80	
XS 3	94-135	115	125	148	130-150	144-166	-	123-153	

Une visualisation satisfaisante des principales unités géomorphologiques a été obtenue en améliorant le contraste de l'image par un simple recalibrage des bandes spectrales. Huit classes radiométriques ont été définies en utilisant l'adaptation dynamique (hypercubes) comme méthode de classification de l'image satellite. Les correspondances entre ces classes radiométriques et les Surfaces de Référence (Tableau 2) sont établies par simple comptage des sites d'observation au sol après localisation sur l'image satellite.

L'association de la carte issue du traitement numérique de l'image satellitaire et de la carte des zones cultivées, établie pour l'année 1987 par des levés de terrain reportés sur agrandissements de photographies aériennes, permet de dresser une carte des états de surface du bassin versant de Samniwéogo. Cette carte est présentée sur la figure 4.



LEGENDE

- | | |
|--|--|
| A Cuirasse ou roche en affleurement | |
| B Milieu dégradé sur cuirasse | |
| C Sables de haut de pente bien drainés | C' Sables de haut de pente bien drainés cultivés |
| D Milieux dégradés de haut de pente sur sols sablo-limono-argileux | |
| E Jupe sableuse à <i>Zornia Glochidiata</i> | E' Jupe sableuse cultivée à mi-versant |
| F Jachères de bas versant sur sols sableux | F' Cultures de bas versant sur sols sableux |
| G Milieu dégradé de bas versant | G' Cultures sur milieu dégradé de bas-versant |
| H Bas-fond sableux à fort couvert herbeux | H' Bas-fond sableux cultivé |
| I Bas-fond argileux à inondation temporaire | I' Bas-fond argileux inondable cultivé |

Figure 4 : Carte des états de surface du petit bassin de Samniwéogo.

LA DETERMINATION DES POTENTIELS DE RUISSELLEMENT

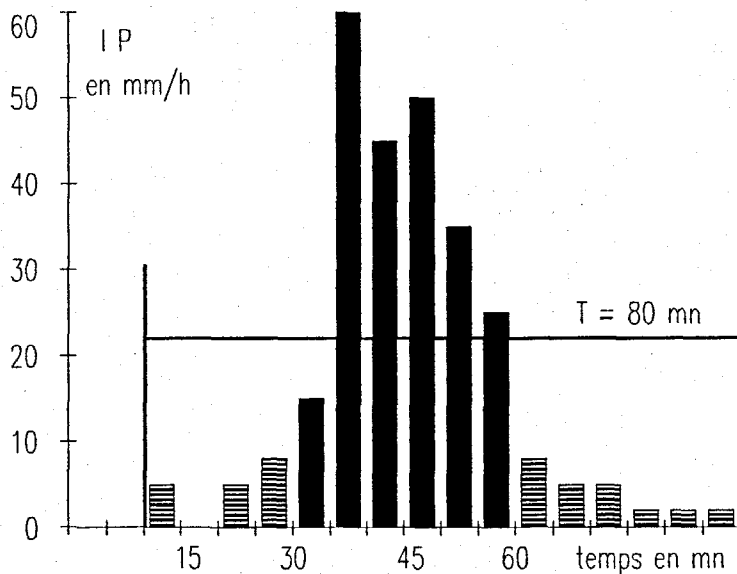
Les relations hydro-pluviométriques à l'échelle élémentaire

Les expériences de simulation de pluie conduisent à des relations hydro-pluviométriques de la forme :

$$Lr_{n,i} = (a_i + b_i IK_n) Pu_{n,i} + c_i IK_n - d_i \quad (1)$$

Où : $Lr_{n,i}$ est la lame ruisselée en mm sur la surface élémentaire i attachée au pluviomètre n , $Pu_{n,i}$ est la pluie utile en mm de la surface élémentaire i attachée au pluviomètre n , a_i , b_i , c_i et d_i sont les paramètres hydrodynamiques caractéristiques de la surface élémentaire i , de son sol, de sa couverture végétale et de son organisation superficielle, IK_n est l'indice des précipitations antérieures correspondant à un indice d'humectation défini par la relation : $IK_{n,j} = (IK_{n,j-1} + P_{n,j-1}) e^{-\alpha T}$ (2), où T est l'intervalle de temps en jours séparant les pluies journalières des jours j ($P_{n,j}$) et $j-1$ ($P_{n,j-1}$) au même pluviomètre n et α un coefficient égal à 0,5 en zone sahélienne.

Figure 5 : Calcul de la pluie utile pour $IL=10$ mm/h.



La pluie utile est définie ici comme la hauteur pluviométrique de l'averse de durée T dont l'intensité IP est supérieure à l'intensité de pluie limite du ruissellement IL , autre valeur caractéristique de la surface élémentaire. Il varie avec le degré d'humectation du sol.

$$Pu_{n,i} = \sum_T (IP_n * \Delta t) \quad \text{pour } IP_n > IL_i \quad (3)$$

Chaque type de surface élémentaire peut donc être caractérisé dans son comportement hydrologique par la connaissance des 5 paramètres : a , b , c , d et IL . Les expériences de simulation de pluie réalisées dans la région de Bidi ont permis de déterminer ces coefficients pour une dizaine de surfaces élémentaires, soit environ la moitié des types de surfaces élémentaires recensés. Pour les autres types de surfaces élémentaires nous avons eu recours au catalogue des états de surface de la zone sahélienne (Casenave et Valentin, 1989). Les résultats de ces déterminations sont présentés au tableau 1.

Le calcul du potentiel de ruissellement à l'échelle des états de surface

La formulation du potentiel de ruissellement de chaque classe d'état de surface est la suivante :

$$PR_u = \sum_{n,i} (\alpha_{n,i,u} * Lr_{n,i,u}) \quad \text{avec } Lr_{n,i,u} = Lr_{n,i} \text{ de la relation (1)} \quad (4)$$

Où : PR_u est le potentiel de ruissellement de la classe u d'état de surface, $Lr_{n,i,u}$ est la lame ruisselée de la surface élémentaire i attachée au pluviomètre n , $\alpha_{n,i,u}$ est le coefficient de pondération de la surface élémentaire i attachée au pluviomètre n .

Pendant une durée variable au cours de la saison des pluies (une semaine à quelques mois) on peut associer à chaque classe d'état de surface, une liste de surfaces élémentaires avec leurs taux de recouvrement. La composition de chaque classe est en effet susceptible d'évoluer au cours de la saison des pluies, ce qui revient à modifier la liste des surfaces-types élémentaires et leurs taux de recouvrement en fonction du développement de la végétation, du calendrier cultural et de l'effet des averses sur les sols sarclés.

La formulation proposée ci-dessus (relations 1 à 4) 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.

Ainsi calculée, la lame ruisselée doit être considérée comme un potentiel de ruissellement, moyenne pondérée des ruissellements à l'échelle élémentaire.

L'évolution des états de surface

Sur les zones cultivées, les types de surfaces élémentaires se distinguent les uns des autres par un encroûtement de plus ou plus important et un micro-relief de plus en plus faible lorsqu'on passe des types C1.1 et C2.1 aux types C1.2 et C2.2 puis C1.3 et C2.3. En début de saison des pluies, les types moyennement encroûtés dominent en association avec les types très encroûtés. Dès la fin du premier sarclage ou du labour, tous les sols cultivés ont des états de surface de type C1.1 ou C2.1 (en fonction de la nature du sol).

Après un sarclage, au fur et à mesure des chutes de pluie, les types non encroûtés (C1.1 et C2.1) vont évoluer vers les types C1.2 et C2.2 puis ceux-ci vont aussi évoluer vers les types C1.3 et C2.3, stades ultimes de l'encroûtement. En faisant varier les taux de recouvrement de chaque classe de surfaces cultivées au fur et à mesure de la chute des pluies, on peut reconstituer leur évolution. Le tableau 3 illustre ces changements dans la répartition des types de surfaces élémentaires sur les surfaces cultivées pour deux cas extrêmes: au début de la saison des pluies et après un sarclage.

Tableau 3 : Répartition des types de surfaces élémentaires sur les surfaces cultivées

Types de surfaces élémentaires	Classes d'états de surface au début de la saison des pluies					Classes d'états de surface après un sarclage				
	C'	E'	F'	G'	I'	C'	E'	F'	G'	I'
C1.1	0,10	0,20	0,30			1,0	1,0	1,0		
C1.2	0,40	0,50	0,60							
C1.3	0,50	0,30	0,10							
C2.1				0,10	0,10				1,0	1,0
C2.2				0,50	0,50					
C2.3				0,40	0,40					

Sur les zones naturelles, non cultivées, les types de surfaces élémentaires évoluent au cours de la saison des pluies par croissance du couvert végétal. Pour l'année 1987 sur le bassin versant de Samniwéogo, les premières levées viables de graminées ont eu lieu entre le 25 et le 29 juin car les levées du début du mois de juin ont eu beaucoup de difficultés à passer la longue période sèche comprise entre le 12 et le 23 juin. En effet, pour que les levées soient viables il faut généralement qu'à une pluie de 10 mm, cumulée sur 2 à 3 jours, succède une période pluvieuse moins de 7 jours après la levée (Tezenas du Montcel, 1994).

A la fin du mois de juillet 1987, 30 jours après les premières levées viables, on peut considérer que le couvert herbacé a comblé 30 à 40 % de l'écart entre son taux final et son taux initial de recouvrement. On peut également considérer que le taux final de recouvrement herbeux est atteint dès le début du mois de septembre, c'est à dire 60 à 70 jours après la levée. Nous avons ainsi établi cinq stades successifs d'évolution de la couverture herbeuse en considérant, pour la progression du taux de recouvrement:

- une première période d'avril au 15 juillet avec un taux de recouvrement minimal de début de saison des pluies,
- une seconde période du 15 au 31 juillet avec une progression de 15 %,
- une troisième période du 1 au 15 août avec une progression de 40 % ,
- une quatrième période du 15 août au 31 août avec une progression de 70 % ,
- une cinquième période à partir du 1 septembre avec un taux de recouvrement maximal de fin de saison des pluies.

Tableau 4 : Répartition des types de surfaces élémentaires sur les zones naturelles du petit bassin de Saminwéogo en début et en fin de saison des pluies.

Types de surfaces élémentaires	Etats de surface en début de saison des pluies									Etats de surface avec chang. en fin de saison des pluies					
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	C	D	E	F	G	H
DES 1		0,25	0,25	0,05	0,50	0,05				0,45	0,25	0,60	0,25		
DES 2		0,10	0,20	0,30	0,10	0,30					0,20	0,10	0,35		
DES 3							0,10	0,20						0,10	0,40
DES 4							0,20	0,50						0,50	0,40
ST2.1		0,10	0,05	0,05	0,05	0,05				0,05	0,05	0,05	0,05		
ST3				0,10							0,10				
DEC 1	0,15	0,10	0,05							0,05					
DEC 2	0,05	0,10	0,20	0,05	0,20	0,15		0,20		0,20	0,05	0,20	0,15		0,20
DEC 3									1,00						
ERO 1	0,20	0,15	0,20							0,20					
ERO 2				0,45	0,15	0,45					0,35	0,05	0,20		
ERO 3							0,70	0,10						0,40	
GRO 1	0,40	0,20	0,05												
GRO 2	0,10														

La partie droite du tableau 4 ne fournit les taux de recouvrement en fin de saison des pluies que pour les classes C, D, E, F, G et H, dont la composition en types de surfaces élémentaires a changé au cours de la saison. Les classes A, B et I n'ayant pas changé dans leur composition, ne figurent pas dans cette partie du tableau.

Les potentiels de ruissellement

Le tableau 5 présente quelques exemples de calcul du potentiel de ruissellement pour le bassin de Samniwéogo. On peut ainsi remarquer qu'à l'échelle d'une saison des pluies telle que l'année 1987, de pluviosité assez faible, les états de surface grossiers et encroûtés, qui forment le sommet de la toposéquence de Samniwéogo, possèdent un fort potentiel de ruissellement

(environ 38 %). A l'échelle d'une forte averse, ce potentiel s'accroît pour atteindre des valeurs supérieures à 60%.

Tableau 5 : Potentiels de ruissellement des classes d'états de surface du bassin versant de Samniwéogo

	Potentiels de ruissellement des surfaces naturelles (A, B, C, D, E, F, G, H, I) et des surfaces cultivées (C', E', F', G', H')													
	A	B	C	C'	D	E	E'	F	F'	G	G'	H	H'	I
Pluie de 52,7 mm en début de saison des pluies avec IK = 5 mm														
PR ₁₅₀	34,2	18,3	13,3	24,8	13,3	6,5	22,0	11,5	19,1	19,0	33,1	11,0	33,1	22,7
Pluie de 52,7 mm en fin de saison des pluies avec IK = 0,3 mm, juste après un sarclage														
PR ₂₅₀	33,6	17,9	12,9	0,0	10,8	4,2	0,0	6,3	0,0	14,4	0,0	6,7	0,0	22,2
Pluie de l'année 1987 (399,1 mm)														
PR _{an}	154	75,6	49,6	77,0	42,8	15,5	69,0	27,4	63,0	66,9	102	23,5	102	60,4

Les potentiels de ruissellement sont exprimés en mm. Ils sont alors équivalents à des lames ruisselées. Ils peuvent aussi être exprimés en % de la hauteur pluviométrique, comme des coeff. de ruissellement.

Les surfaces naturelles peu encroûtées (C, D, E, F et H) ont des potentiels de ruissellement faibles : 4 à 10 % à l'échelle annuelle, 10 à 25 % pour une forte pluie.

Les surfaces cultivées (C', E', F', G' et H') possèdent des potentiels annuels de ruissellement sensiblement plus élevés que les surfaces naturelles, 16 à 25 %, selon le type de sol. Pour les fortes pluies, elles ont des potentiels de ruissellement qui varient très fortement en fonction de l'occurrence de la pluie après le sarclage. Juste après un sarclage, les potentiels de ruissellement sont très faibles, sensiblement plus faibles que sur les jachères. Par contre 100 mm après le sarclage, ils deviennent assez forts (30 à 40 %), nettement plus forts que ceux des surfaces naturelles sur le même type de sol. Deux cents mm après sarclage, les potentiels de ruissellement des surfaces cultivées deviennent très forts (55 à 80 %).

LA CARTOGRAPHIE DES RISQUES D'EROSION

En zone soudano-sahélienne, érosions hydrique et éolienne sont souvent associées sur un même versant. Dans cette zone, sans sous-estimer l'action de l'érosion éolienne, par ailleurs difficile à évaluer, celle-ci se manifeste par des déplacements et de petites accumulations de matériaux fins au cours de la saison sèche. Les phénomènes érosifs les plus gênants pour la conservation des sols apparaissent plutôt provoqués par l'érosion hydrique.

Les risques d'érosion, hydrique ou éolienne, sont en relation directe d'une part avec la nature du sol et d'autre part avec son état de surface. Dans cette région d'Afrique, la carte des états de surface constitue donc un premier document indispensable à la caractérisation des risques d'érosion.

En ce qui concerne l'érosion hydrique, outre la plus ou moins grande vulnérabilité des surfaces à l'érosion, leur position sur le versant par rapport aux surfaces qui les précèdent en l'amont joue un rôle déterminant. Pour cartographier les risques hydriques d'érosion ou de sédimentation, les deux phénomènes étant associés sur un même versant, il apparaît donc essentiel de tenir compte de la topographie et de l'organisation du réseau de drainage qui collecte les écoulements de l'amont vers l'aval du versant.

Les classes H et I, situées dans le bas-fond de Samniwéogo, sont essentiellement des lieux de dépôts de matériaux transportés par les ruissellements sur les versants. Pour la classe H, les dépôts sont sablo-limono-argileux. Ils sont argileux pour la classe I.

Le ruissellement à l'échelle des versants.

Le calcul du potentiel de ruissellement des états de surface montre qu'à l'échelle annuelle :

- la classe A présente un fort potentiel de ruissellement (38 %),
- les classes B, G, I, G', H', C', E' et F' ont un potentiel de ruissellement moyen (15 à 25 %),
- les classes C et D ont un potentiel de ruissellement assez faible (10 à 13 %),
- les classes E, F et H ont un potentiel de ruissellement très faible (3 à 7 %).

Pour une forte averse (50 mm), les surfaces naturelles, non cultivées, conservent le même ordre hiérarchique décroissant de leurs potentiels de ruissellement avec un accroissement général de 15 à 20 %.

En ce qui concerne les surfaces cultivées, le potentiel de ruissellement d'une forte averse dépend de la somme des pluies tombée depuis le dernier sarclage. Si le sarclage vient d'être réalisé, les potentiels de ruissellement sont très faibles (inférieurs à 5 %). Si le sol sarclé a déjà reçu 150 à 200 mm de pluie, les potentiels de ruissellement sont forts (50 à 60 %) et sont très proches de ceux de la classe A (64 %).

Cependant, le calcul du potentiel de ruissellement ne tient compte que de l'aptitude au ruissellement des surfaces élémentaires. Or le ruissellement qui transite réellement sur une surface dépend de la position de cette surface sur le versant. Pour en tenir compte, nous proposons de définir le ruissellement potentiel par unité de largeur de versant comme la somme des potentiels de ruissellement des surfaces qui se situent en amont, diminuée de l'infiltration complémentaire qui suit l'arrêt du ruissellement sur ces surfaces. Cette infiltration complémentaire est due principalement à la durée du ruissellement qui ne coïncide pas avec la durée de la pluie. Sur les parcelles agronomiques de Samniwéogo, sur une longueur de 100 mètres, l'écoulement des eaux en aval se prolonge 30 à 45 minutes après l'arrêt des pluies d'intensité suffisamment forte pour ruisseler. A l'échelle du petit bassin de Samniwéogo, l'écoulement du marigot se prolonge 1 heure à 2 heures après l'arrêt de la pluie. Pour tenir compte de la position des surfaces sur le versant et calculer les ruissellements potentiels, il faut revenir à l'analyse topographique et hydrographique du bassin versant.

La cartographie des risques d'érosion hydrique.

Le risque d'érosion hydrique dépend conjointement du ruissellement potentiel et de la vulnérabilité des surfaces à l'érosion. Pour calculer le ruissellement potentiel par largeur de versant, il faut faire au préalable l'analyse hydrographique du bassin. Cette analyse doit nous conduire à la définition des chemins de l'eau à l'échelle du bassin versant. Elle n'est possible qu'en utilisant un Modèle Numérique de Terrain et un logiciel adéquat calculant, en chaque pixel de l'image discrétisée, la longueur du chemin suivi par l'eau avant d'y parvenir.

En ce qui concerne le petit bassin de Samniwéogo, la carte topographique au 1/ 50 000 ème ne suffit pas à un tracé des chemins de l'eau sur les versants. Nous avons donc renoncé provisoirement à établir une carte détaillée des risques d'érosion hydrique et nous nous sommes contentés ici d'utiliser l'esquisse géomorphologique de F. Guillet (1991) pour établir, en combinant cette carte avec celle des états de surface, une esquisse des risques d'érosion. L'esquisse géomorphologique de F. Guillet présente également l'avantage d'un dessin

symbolique des formes d'incisions au creux des thalwegs et des formes localement concaves ou convexes de la pente du terrain.

Les risques d'érosion hydrique sont d'autant plus forts que la vulnérabilité de la surface est forte et que le ruissellement potentiel est élevé, c'est à dire que la surface se situe à l'aval d'une classe à fort potentiel de ruissellement ou d'une série de surfaces à potentiel moyen ou élevé.

Les classes A, B et D, situées au sommet des versants, présentent des risques faibles pour la classe A, assez faibles pour les classes B et D, avec cependant un accroissement du risque d'autant plus fort que l'on s'éloigne de la ligne de crête et que l'on descend sur le versant, c'est à dire que l'épaisseur de la zone à fort potentiel de ruissellement est grande.

Les classes H et I, ainsi que H' et I', correspondent à des situations topographiques de bas-fond qui correspondent plutôt à des zones d'accumulation de sédiments essentiellement sablo-limoneux pour la classe H, argileux pour la classe I.

Les surfaces les plus exposées aux risques d'érosion hydrique sont finalement les surfaces cultivées, c'est à dire les classes C', E' et F' lorsqu'elles sont situées en aval de zones à fort potentiel de ruissellement. On peut donc considérer que, sur une longueur à peu près équivalente à la longueur du versant dégradé qui surmonte une zone de type C, E ou F, le risque d'érosion est maximal si le sol est mis en culture sans aucun aménagement antiérosif.

Le risque d'érosion ne croît pas de manière systématique vers l'aval des versants car le ruissellement se concentre assez rapidement dans le creux de petits thalwegs où les écoulements creusent des rigoles en forme du U, parfois assez profondes. Le risque d'érosion hydrique est donc également maximal le long des thalwegs sur la partie amont des versants du bassin de Samniwéogo. En aval, la pente devient inférieure à 1 %, les rigoles s'élargissent en prenant la forme d'un V élargi. Le risque d'érosion est ensuite rapidement remplacé par un risque de sédimentation à l'approche du bas-fond.

CONCLUSION

La carte présentée sur la figure 6 ne constitue qu'une esquisse des risques d'érosion hydrique sur le petit bassin versant de Samniwéogo. Pour parfaire cette esquisse et produire un document plus élaboré, il nous faut réaliser un Modèle Numérique de Terrain sur le bassin puis utiliser un Système d'Information Géographique permettant d'associer :

- la carte des états de surface du bassin (ou celle des potentiels de ruissellement),
- la carte de vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique,
- la carte des ruissellements potentiels par largeur de versant.

Cependant, la production d'un tel document ne constitue pas la finalité essentielle de ce travail. La conservation des sols à long terme constitue notre objectif final. Or le constat d'un plus grand risque d'érosion hydrique sur les sols sableux de haut versant du bassin versant de Samniwéogo avait été fait par les paysans du village de Bidi depuis longtemps, sans que ceux-ci aient trouvé l'énergie nécessaire à la réalisation des travaux d'aménagement antiérosif. Il a fallu attendre en 1983 l'arrivée de chercheurs Orstom pour que se développent toute une série de travaux antiérosifs basés sur l'utilisation de pierres latéritiques extraites du talus formant la limite ouest du bassin versant. L'efficacité des cordons pierreux pour lutter contre l'érosion hydrique a pu être démontrée (Lamachère et Serpantié, 1991; Guillet et al., 1991) par des expériences et observations sur parcelles agronomiques. Jusqu'à présent, seules les saignées produites par la concentration des ruissellements n'ont pas fait l'objet d'aménagements antiérosifs sur le petit bassin versant de Samniwéogo. D'autres expériences toutes aussi intéressantes ont été entreprises au Burkina Faso dans la province du Yatenga (Roose et al., 1992). Souhaitons que ces techniques, encore insuffisamment utilisées, s'étendent au Yatenga dans les zones les plus exposées aux risques d'érosion. En raison de leur coût assez lourd en

main d'oeuvre, il n'est cependant pas question de les généraliser outre mesure. Dans le choix des zones à traiter et des techniques à utiliser, techniques qui doivent être adaptées au risque encouru, il reste encore aux chercheurs beaucoup à faire pour quantifier le risque et permettre aux paysans d'intervenir à bon escient, à moindre coût et avec les techniques appropriées.

BIBLIOGRAPHIE

Boulet (R.) 1968. Etude pédologique de la Haute-Volta. Région Centre Nord. ORSTOM Dakar, multigr. 351 p., 43 tabl., 1 carte + annexes.

Casenave (A.) et Valentin (C.) 1989. Les états de surface de la zone sahéenne. *Ed. ORSTOM, Collection Didactiques*, 227 p.

Girard M.-C., 1983. Recherche d'une modélisation en vue d'une représentation spatiale de la couverture pédologique. *Thèse Doct. ès Sc. Univ. de Paris VII in SOLS-INAPG n°12*.

Guillet (F.) 1991. Etude et modélisation hydro-pédologique d'un bassin versant de la zone sahélo-soudanienne au Burkina Faso (utilisation du modèle "SOURCE"). Thèse de doctorat de l'Université Paris VI en Sciences de la terre, 267 p.

Guillet (F.), Lamachère (J.M.), Sabatier (J.L.) et Serpantié (G.) 1991. L'aménagement des conditions de ruissellement sur les pentes cultivées soudano-sahéliennes. Résultats d'une triple approche : enquêtes, expérimentation, modélisation. In "Utilisation rationnelle de l'eau des petits bassins versants en zone aride", actes des Jour. scient. du Génie Para-sécheresse de l'UREF, E.I.E.R., Ouagadougou, 12-15 mars 1990. Ed; John Libb. Eur., Paris. 87-108.

Kovar (K.) et Nachtnebel (H.P.) 1996. Application of Geographic Information Systems in hydrology and Water Resources Management. *Proceedings of the HydroGIS'96 conference held in Vienna, Austria, from 16 to 19 April 1996. IAHS Publication N° 235*.

Lamachère (J.M.) et Serpantié (G.) 1991. Valorisation agricole des eaux de ruissellement et lutte contre l'érosion sur champs cultivés en mil en zone soudano-sahélienne. In "Utilisation rationnelle de l'eau des petits bassins versants en zone aride", actes des Journées scientifiques du Génie Para-sécheresse de l'UREF, E.I.E.R., Ouagadougou, 12-15 mars 1990. Ed; John Libbey Eurotext, Paris. 165-178.

Mansour R., 1995. Analyse hydrologique de la mare de Samniwéogo (Nord Yatenga, Burkina Faso). *Mémoire de DEA. Univ. de Montpellier II, L.H.M., Orstom Montpellier*. 88 p.

Marchal (J.Y.) 1983. La dynamique d'un espace soudano-sahélien. *Travaux et Documents ORSTOM*, n° 167.

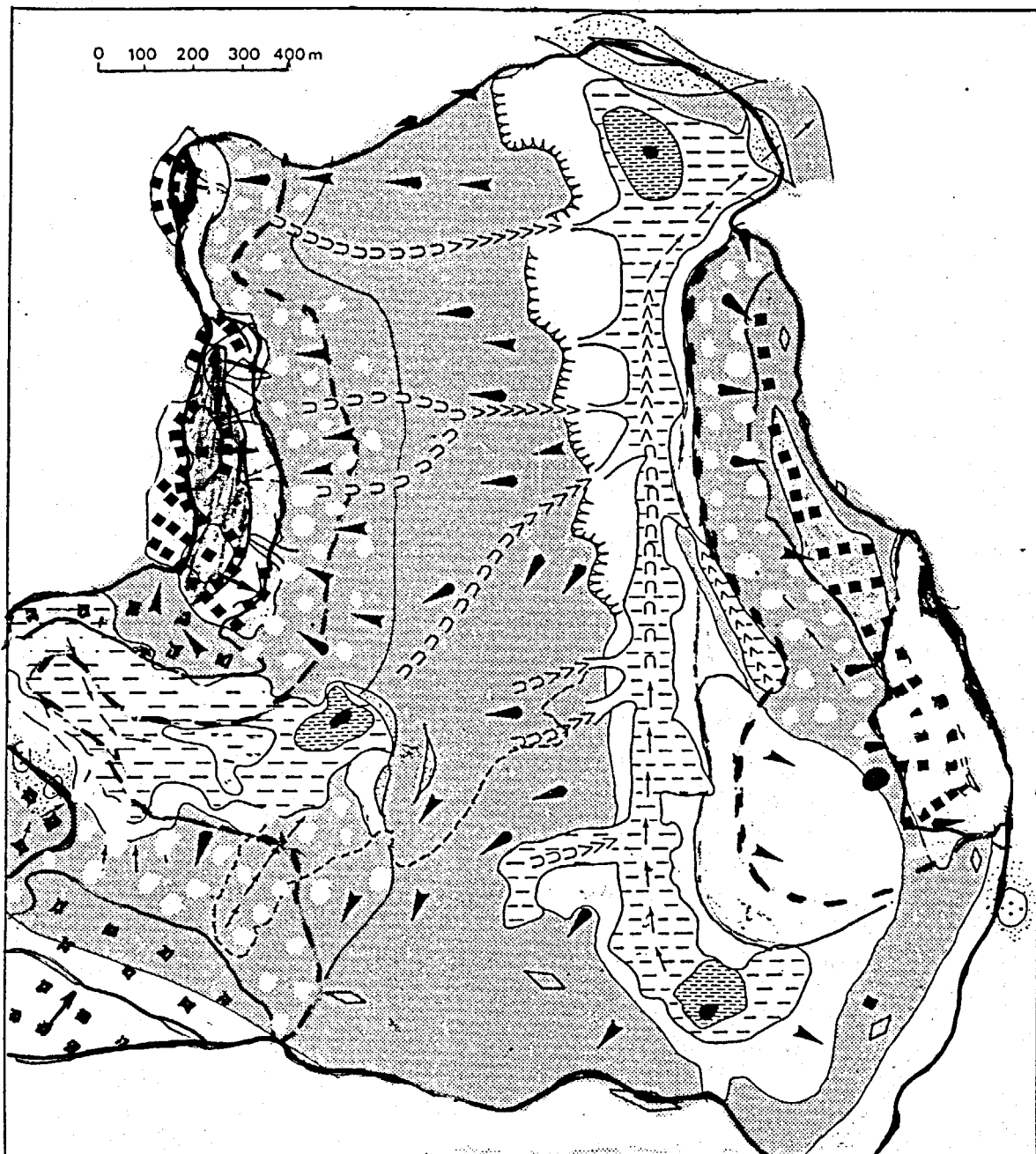
Rodier J., Meunier M., Puech C. (1984) Le point sur les méthodes de calcul des débits de crues décennales en Afrique de l'Ouest et Centrale. *Bull. de liaison du CIEH n°58, Ouagadougou*, 2-9.

Roose (E.), Dugué (P.) et Rodriguez (L.) 1992. La GCES : une nouvelle stratégie de lutte anti-érosive appliquée à l'aménagement de terroirs en zone soudano-sahélienne du Burkina Faso. In *Bois et Forêts des Tropiques*, n° 233 : 49-62.

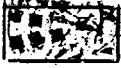
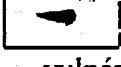

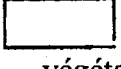
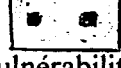
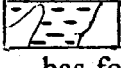


Schultz G.A. and Barrett E.C. (1989) *Advances in Remote Sensing for Hydrology and Water Resources Management. Technical Documents in Hydrology, UNESCO, Paris*.

Serpantié (G.), Tezenas du Montcel (L.) et Valentin (C.) 1992. La dynamique des états de surface d'un territoire agropastoral soudano-sahélien. In *l'aridité une contrainte au développement*. Ed. scient. Le Floch (E.), Grouzis (M.), Cornet (A.) et Bille (J.-C.); ORSTOM Editions, Coll. Didactiques, Paris. 419-447.

Tezenas du Montcel (L.) 1994. Les ressources fourragères et l'alimentation des ruminants domestiques en zone sud-sahélienne (Burkina Faso, Yatenga). Effets des pratiques de conduite. Thèse de doctorat en sciences de l'Université Paris XI Orsay, 273 p.



LEGENDE

- | | | | |
|---|---|--|---|
| HAUT VERSANT | | BAS VERSANT | |
|  | Cuirasse en affleurement, vulnérabilité faible, risque faible. |  | Sols sableux épais, vulnérabilité faible, risque faible. |
|  | Sols peu épais encroûtés sur cuirasse, vulnérabilité assez faible, risque moyen à fort. |  | Sols sablo-limoneux, avec végétation dégradée, risque moyen. |
|  | Sols sableux avec végétation dégradée vulnérabilité moyenne, risque fort. |  | Sols sablo-limoneux de bas-fond, risque de sédimentation. |
|  | Sols sableux épais bien drainés vulnérabilité très forte s'ils sont cultivés, risque fort à très fort s'il sont cultivés. vulnérabilité faible avec un bon couvert herbeux, |  | Sols argileux de bas-fond, risque de sédimentation argileuse et d'inondation prolongée. |

Thalweg à risque très fort.

Figure 6 : Esquisse d'une carte des risques d'érosion hydrique sur le bassin de Samniwéogo, d'après l'esquisse géomorphologique de F. Guillet (1991).



Pour citer cet article / How to cite this article

Lamachère, J. M.; Guillet, F. - Télédétection, états de surface et cartographie des risques d'érosion en zone soudano-sahélienne (bassin versant de Samniwéogo, Province du Yatenga, Burkina Faso), pp. 375-390, Bulletin du RESEAU EROSION n° 16, 1996.

Contact Bulletin du RESEAU EROSION : beep@ird.fr