

# TÉLÉDÉTECTION ET RÉGIONALISATION DE L'APTITUDE AU RUISSELLEMENT ET À L'INFILTRATION DES SOLS EN AFRIQUE SAHÉLIENNE ET NORD-SOUDANIENNE

J.M. LAMACHÈRE<sup>1</sup>, C. PUECH<sup>2</sup>

---

## RÉSUMÉ

La diffusion d'images satellitaires à haute résolution met à la disposition des hydrologues des outils très puissants de régionalisation des paramètres hydro-pédologiques de surface liés au ruissellement et à l'infiltration. En Afrique de l'Ouest, ces outils sont d'autant plus puissants que le couvert végétal, bien identifié par les appareils embarqués à bord des satellites, y joue, par sa présence ou son absence, sa structure et sa densité, un rôle essentiel sur l'aptitude des sols à l'infiltration.

Cet article présente une méthode d'observation des états de surface, suivant des lignes et des sections, couplée à une interprétation numérique d'images satellitaires permettant de cartographier le couvert végétal, les types de sols, les zones de culture et les jachères. La description continue des lignes et des sections fournit également la répartition statistique des surfaces élémentaires sur les unités paysagiques et les pixels. Les surfaces élémentaires ayant été caractérisées par des relations hydrodynamiques grâce à des mesures effectuées au simulateur de pluies, il est alors possible de définir pour chaque unité paysagique et chaque pixel leur aptitude moyenne au ruissellement et à l'infiltration.

Expérimentée une première fois sur le bassin versant de la mare d'Oursi avec un échantillonnage en lignes, cette méthode a été redéfinie pour être appliquée sur neuf bassins versants au Burkina Faso dans le cadre d'un projet PNUD d'étude hydrologique avec traitement d'images satellitaires puis utilisée dans le cadre d'un projet FAO d'étude des crues et des apports sur un ensemble de quatre bassins versants expérimentaux gérés par l'Orstom pendant au moins six ans.

---

<sup>1</sup>Orstom 01, BP 182, Ouagadougou, Burkina Faso

<sup>2</sup>Laboratoire Commun de Télédétection, Cémagref/Engref, BP 5095, 34033 Montpellier cedex 01

Associant la cartographie des états de surface pour définir la fonction de production hydrique de chaque pixel, à un modèle numérique de terrain pour définir la fonction de transfert des eaux, PUECH C., modélise sommairement le fonctionnement hydrologique des bassins versants et propose de généraliser ce type de modélisation à un grand nombre de bassins sahéliens disposant de mesures hydrologiques, dans le but d'en régionaliser les paramètres de calage.

Cependant, certains types de surfaces élémentaires, telles que les surfaces cultivées, évoluent rapidement au cours de la saison des pluies et le ruissellement global d'un bassin n'est pas la somme des ruissellements partiels. Des recherches complémentaires sur l'évolution du comportement hydrologique des surfaces élémentaires et sur les transferts hydriques à l'échelle des unités paysagiques et des versants, paraissent désormais indispensables à la modélisation complète des processus hydrologiques.

## INTRODUCTION

Les méthodes classiques de prédétermination des écoulements sur les petits bassins versants se heurtent à une difficulté d'appréciation de l'aptitude au ruissellement. Depuis la parution, en 1989, du catalogue des états de surface de la zone sahélienne (CASENAVE A., et VALENTIN C., 1989), cette opération est grandement facilitée dans toute l'Afrique de l'Ouest. Cet ouvrage, fruit de dix ans de recherche des pédologues et des hydrologues de l'Orstom, fournit un inventaire complet de tous les types de surfaces élémentaires rencontrées de l'ouest du continent africain au sud du Sahara. Il fournit également les relations hydrodynamiques qui sont associées à chaque type de surface élémentaire et propose une méthode d'observation et de cartographie des états de surface basée sur l'interprétation des photographies aériennes et l'échantillonnage par points correspondant sur le terrain à des surfaces de 1 000 à 2 000 m<sup>2</sup>.

Le but essentiel de cet article, est de présenter une nouvelle méthode de cartographie des états de surface fondée sur le traitement numérique d'images satellitaires et leur interprétation à partir d'un échantillonnage au sol, en lignes et en sections, formant les parcelles d'entraînement pour le traitement des images, parcelles couvrant au sol des surfaces de 1 à 15 hectares.

L'utilisation potentielle de telles cartographies pour des bassins versants de la zone étudiée pour lesquels des observations hydrologiques précises sont disponibles est ensuite développée. En particulier, PUECH C., présente un essai d'association entre modèle numérique de terrain et carte des états de surface dans une modélisation simple des ruissellements sur un bassin versant, le but recherché étant d'utiliser ces méthodes dans la prédétermination de bassins versants non jaugés.

L'article se termine par des propositions de recherche visant à améliorer la connaissance du fonctionnement hydrologique des surfaces élémentaires, des unités paysagiques et des versants, afin de diminuer l'incertitude des prédéterminations effectuées sur les bassins versants non jaugés.

## CONTEXTE DE L'ÉTUDE

### ZONE D'ÉTUDE

La zone d'étude a privilégié deux axes :

- un premier axe nord-sud au Burkina Faso qui concerne une dizaine de bassins versants couvrant des superficies de 10 à 400 km<sup>2</sup> sous une pluviométrie annuelle moyenne allant de 350 mm à 1 200 mm (figure 1) ;
- un deuxième axe est-ouest comprenant trois groupes de bassins versants, un au Sénégal, deux au Burkina Faso, sous une pluviométrie annuelle moyenne allant de 700 à 1 000 mm.

Les mesures hydrologiques effectuées sous pluies simulées en Afrique de l'Ouest ont mis en évidence l'influence déterminante des organisations pédologiques superficielles et la strate herbacée sur le comportement des sols à l'infiltration et au ruissellement.

#### **EN ZONE SAHÉLIENNE SÈCHE ( $200 < P < 400$ mm)**

Le couvert végétal herbacé est peu dense, rare et discontinu. Les organisations pédologiques superficielles jouent un rôle primordial sur le comportement hydrodynamique superficiel des sols.

#### **EN ZONE DE SAVANE SÈCHE ( $400 < P < 800$ mm)**

L'analyse statistique des résultats acquis sur quarante-huit parcelles expérimentales soumises à des pluies simulées au Burkina Faso, a clairement établi que le pourcentage de couverture végétale herbacée est le principal facteur explicatif du ruissellement et de l'infiltration (ALBERGEL *et al.*, 1986). En second lieu, viennent les organisations pédologiques superficielles.

#### **EN ZONE DE SAVANE HUMIDE ( $800 < P < 1\ 600$ mm)**

Le fonctionnement hydrique des sols est complexe, sujet à des variations saisonnières importantes. La couverture pédologique, la strate herbacée et les organisations superficielles du sol, jouent des rôles équilibrés sur l'aptitude des sols au ruissellement et à l'infiltration.

## IMAGES SATELLITAIRES

À l'exception du bassin versant de la mare d'Oursi, nous avons privilégié les images Landsat TM aux images Spot, car le changement de résolution en passant des images Spot (20 m) aux images Landsat TM (30 m) ne gêne pas fondamentalement l'interprétation des images. La gamme plus complète des longueurs d'onde offerte par Landsat ainsi que les dimensions nettement plus grandes des surfaces au sol couvertes par les images Landsat TM, ont motivé notre préférence.

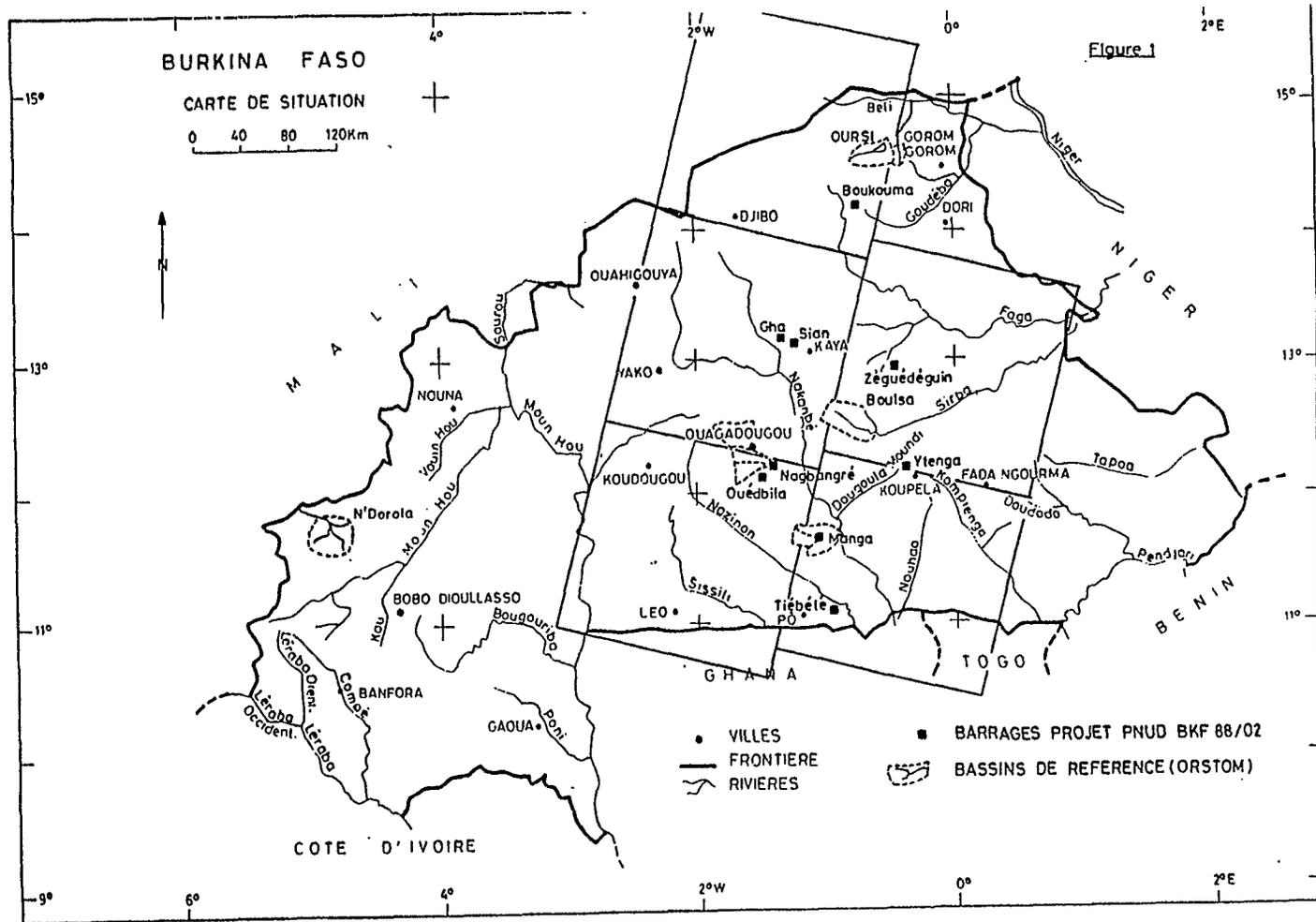
Les dates des images ont été fixées en début de saison sèche et les relevés de terrain ont été effectués avec un décalage de deux à trois années après les prises de vues car seul le satellite Spot offre la possibilité de programmer les prises de vues. Cette possibilité n'a été pleinement utilisée que dans le cadre du projet Spot-Oursi pour lequel les relevés de terrain ont coïncidé avec les dates de prises de vues.

## RÉFÉRENCES HYDROLOGIQUES : LES TYPES DE SURFACES ÉLÉMENTAIRES

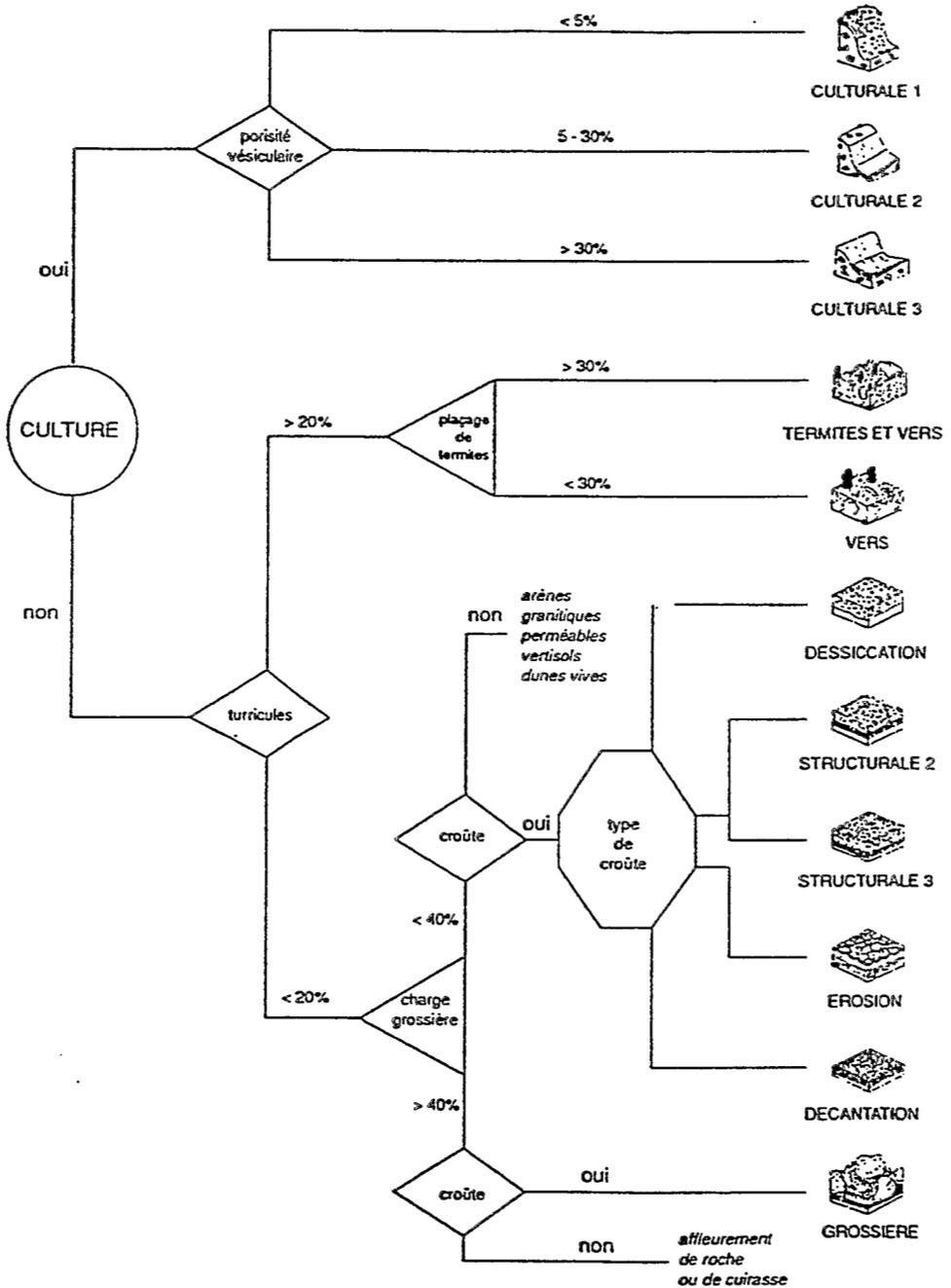
L'idée de base est l'utilisation des relations hydrodynamiques établies sur des surfaces élémentaires de 1m<sup>2</sup> par l'appareil dit « mini-simulateur de pluie » que l'Orstom utilise en Afrique de l'Ouest depuis une bonne dizaine d'années. Une synthèse de ces mesures propose une liste de surfaces types de la zone sahélienne, à chaque surface étant associée une équation de la lame ruisselée en fonction de la pluie (CASENAVE., A et VALENTIN C., 1989).

La synthèse des mesures fait ressortir que la présence d'une croûte de battance à la surface du sol modifie grandement les conditions du ruissellement. Neuf types principaux de croûtes sahéliennes ont été décrits par VALENTIN C., qui fonde la typologie des surfaces élémentaires sur la reconnaissance de ces organisations superficielles du sol et sur la description du couvert végétal, du microrelief, de la mésofaune, de la porosité du sol et de sa granulométrie.

Une clef de détermination des principaux types de surfaces élémentaires a été établie. Présentée sur la figure 2, elle distingue en une première division dichotomique les surfaces cultivées des surfaces naturelles. Les surfaces cultivées sont subdivisées en trois types selon l'abondance de la porosité vésiculaire. Dans la pratique de terrain, ce critère n'est guère utilisable et nous l'avons remplacé par un critère de fraîcheur du microrelief lié aux techniques culturales de travail du sol. Les surfaces naturelles sont subdivisées en trois ensembles : les surfaces à forte activité faunique, les surfaces à faible activité faunique sans charge grossière et les surfaces à faible activité faunique avec charge grossière.



**Figure 1**  
*Burkina Faso / Zone d'étude*



**Figure 2**  
Clef de détermination des types de surfaces

VALENTIN C., et CASENAVE C., distinguent finalement douze grands types de surfaces élémentaires et dix variantes pour lesquels on trouvera une complète description et des illustrations photographiques dans le catalogue des états de surface de la zone sahélienne. À chaque type de surface élémentaire est associée une relation hydrodynamique reliant la pluie (P), l'indice des pluies antérieures (IK) et la lame ruisselée (Lr) de la forme :

$$Lr = aP + bIK + c P.IK - d \quad (1)$$

où :

- $Lr$ ,  $P$  et  $Ik$  sont exprimés en mm ;
- $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ , sont des coefficients dépendant du sol et de son état de surface ;
- $IK$ , indice des précipitations antérieures est une fonction de la pluie antérieure et de l'indice ayant précédé cette pluie ;
- l'indice du jour  $IK_j$  est calculé à partir de l'indice antérieur  $IK_{j-t}$ ,  $t$  étant le nombre de jours séparant deux pluies successives  $P_{j-t}$  et  $P_j$ .

$$IK_j = (IK_{j-t} + P_{j-t}) e^{-0,5t} \quad (2)$$

Les relations hydrodynamiques figurant dans le catalogue des états de surface, ont été établies avec des protocoles pluviométriques standards mettant en jeu des pluies de forte intensité, de fréquences annuelle et décennale. Elles s'appliquent donc relativement bien à ce type de pluies. Pour les pluies ne correspondant pas à une distribution standard, il est préférable de faire appel aux relations faisant intervenir l'intensité de pluie ( $P_i$ ), l'intensité de ruissellement ( $R_i$ ) et l'intensité de pluie limite du ruissellement ( $P_iL$ ), relations qui sont de la forme :

$$\begin{array}{ll} P_i > P_iL & R_i = a (P_i - P_iL) \\ P_i < P_iL & R_i = 0 \end{array} \quad (3)$$

$P_i$ ,  $P_iL$  et  $R_i$  étant exprimés en  $\text{mm.h}^{-1}$ . Toutefois, ce type de relation n'est pas très facile à intégrer en fonction du temps, car les variations du coefficient  $a$  et celles de  $P_iL$  sont mal connues pour les averses dont l'intensité est inférieure à  $30 \text{ mm.h}^{-1}$  et pour les averses dont l'intensité n'est pas monotone croissante ou décroissante. Le catalogue des états de surface de la zone sahélienne fournit les valeurs de l'intensité de pluie limite du ruissellement mais ne fournit pas les valeurs du coefficient  $a$  qu'il faut déduire des relations  $Lr = f(P, IK)$  à partir des protocoles pluviométriques standards.

## MESURES DE TERRAIN

### OBSERVATIONS ET MESURES AU SOL

Dans le catalogue des états de surface de la zone sahélienne, VALENTIN C., propose une méthode d'observation des états de surface dont nous nous sommes largement inspirés pour définir une méthode d'observation au sol adaptée à l'analyse des images satellitaires.

VALENTIN C., propose un échantillonnage par points dont la densité varie en fonction du type de paysage. Les points sont placés sur des itinéraires correspondant à des toposéquences, avec une distribution des points d'observation selon des intervalles réguliers. Chaque point d'un itinéraire correspond sur le terrain à des observations effectuées sur une surface circulaire d'une vingtaine de mètres de rayon où l'on observe la répartition spatiale des surfaces élémentaires, du relief, du microrelief, du couvert végétal herbacé, arboré et arbustif.

Si l'échantillonnage par points paraît convenir à l'interprétation des photographies aériennes, il est inadapté à l'analyse des images satellitaires en raison de la taille au sol des pixels qui varie de 900 m<sup>2</sup> pour les images Landsat TM, à 400 m<sup>2</sup> pour les images Spot. Un point d'observation au sol de 20 mètres de rayon correspond donc théoriquement à 1,5 pixel sur les images Landsat TM et à 3 pixels sur les images Spot. De plus, l'incertitude de positionnement des pixels sur image (dans le meilleur des cas égale à 1 à 2 pixels) exige une prise d'échantillons plus large que le pixel lui-même. Pour procéder à une analyse d'images satellitaires en utilisant les surfaces décrites au sol comme parcelles d'entraînement, il fallait donc modifier la procédure d'échantillonnage en agrandissant la surface couverte par les observations. Deux procédures d'échantillonnage ont été successivement définies : l'échantillonnage en lignes et l'échantillonnage en sections.

Les lignes correspondent à des prises d'observations sur des parcelles de 300 à 500 mètres de long et 20 mètres de large. Elles ont été utilisées de manière systématique sur le bassin versant de la mare d'Oursi où elles ont servi de parcelles d'entraînement au traitement numérique des images Spot (LAMACHÈRE J.M., 1988). Elles présentent cependant l'inconvénient de proposer un échantillonnage qui n'est pas suffisamment représentatif pour le décodage des images satellite : positionnement très incertain, faible dimension et nombre trop faible. Par exemple, pour le bassin de Manga-Louré (100 km<sup>2</sup>), 14 lignes de 0,5 ha représentent à peine 0,07 % de la superficie. Pour contourner cet écueil, nous avons défini, en collaboration avec le LCT, un échantillonnage complémentaire en sections.

La section correspond à une prise d'information du type itinéraire, par segment élémentaire de 100\*100 mètres, et dont la longueur totale est de 1 500 à 2 000 mètres.

Dans la procédure descriptive, les lignes sont découpées en segments de longueur variable correspondant à des unités homogènes, alors que les sections sont découpées en segments de longueur fixe égale à 100 mètres. Les lignes sont décrites au cours d'un cheminement pédestre et tous les éléments intervenant dans la définition des états de surface type du Sahel sont notés. Les sections sont parcourues de manière plus rapide (en voiture avec compteur hectométrique), en décrivant les éléments susceptibles d'être observables à l'échelle du satellite (sols, végétation, occupation du sol), ainsi que la correspondance en états de

surface élémentaires tirés de l'information des lignes associées. Ceci permet d'étendre la description fine des lignes à une surface totale plus conséquente. Ainsi, pour le bassin de Manga, on a étudié quatorze sections de 15 ha, soit un taux de sondage de 2,1 %.

La description par lignes et sections nous a semblé résoudre l'adaptation de la méthode par points au décodage de l'image satellite.

## **CHOIX ET REPÉRAGE DES LIGNES ET DES SECTIONS**

Pour avoir un échantillon représentatif des unités paysagiques présentes sur l'ensemble de la zone à cartographier, lignes ou sections doivent être réparties équitablement entre toutes les unités présentes sur la zone en fonction de leur importance. Elles sont localisées une première fois sur les images satellitaires ayant subi éventuellement un premier traitement numérique. Elles sont ensuite tracées au crayon gras sur les photographies aériennes ou sur des cartes topographiques au 1/50 000.

Sur le terrain, l'origine des lignes et des sections a d'abord été repérée par rapport à un marigot, un croisement de piste ou un village, au compteur hectométrique d'un véhicule : la précision normale était de 100 m mais avec des possibilités d'erreurs grossières, notamment en cas de déplacement de pistes depuis la date des documents cartographiques ou photographiques utilisés. Par la suite, on a utilisé systématiquement un navigateur par satellite (G.P.S.), ce qui limite les erreurs de 30 à 40 m.

## **ÉLÉMENTS DÉCRITS**

### ***LE COUVERT ARBORÉ ET ARBUSTIF***

Le couvert arboré est rarement dense. On peut donc assez facilement procéder au comptage des arbres pour chaque espèce en estimant la taille des couronnes. Lorsque le couvert arbustif est clair, on procède comme pour le couvert arboré. Dès que le couvert arbustif devient un peu plus dense, le comptage devient beaucoup trop long. On note donc simplement les espèces dominantes et le taux de recouvrement moyen.

### ***LE COUVERT HERBACÉ ET L'OCCUPATION DU SOL***

On note pour chaque segment le type d'occupation du sol : habitat, cultures, surfaces naturelles, bas-fonds, lits de marigot, et son taux de recouvrement. Pour chaque type d'occupation du sol, on note le type de couvert herbacé : herbes rases, hautes herbes, touffes d'Andropogon, brûlis et leur taux de recouvrement. On note également le taux de recouvrement de la litière sur les surfaces naturelles, du paillage sur les cultures, en même temps que les espèces cultivées : sorgho, mil, coton, arachide, riz, sésame, oseille.

### **LE RELIEF**

Sur les lignes, le relief est mesuré avec un niveau de chantier. Les formes particulières de mésorelief et de microrelief sont notées avec une attention spéciale pour les formes de relief des sols cultivés : billons isohypses ou isoclines, billons cloisonnés, buttes de sarclage, labours, cordons pierreux, sarclage à plat, diguettes. À l'échelle des sections, nous donnons en outre l'allure de la pente longitudinale : montée normale, forte ou faible, descente normale, forte ou faible et terrain plat, ceci ne devant servir que pour un recalage éventuel des buttes et marigots sur l'image.

### **LE TYPE DE SOL ET SA COULEUR**

Pour des raisons pratiques, la prise d'information en sections se fait en véhicule avec arrêt tous les 100 ou 200 mètres. À chaque arrêt, on effectue une reconnaissance du sol en surface. Il y a donc le plus souvent, sur les sections, huit prises d'échantillons de sol distantes de 200 mètres. L'estimation des proportions granulométriques est effectuée à l'oeil et au toucher en humectant l'échantillon avec une pissette, la fraction limoneuse étant associée à la fraction argileuse. Sur les lignes, une reconnaissance du sol est effectuée lors de la description des surfaces élémentaires.

Les couleurs des sols ont été codifiées dans l'ordre croissant du blanc (valeur 1) au noir (valeur 5). La couleur verte, associée à la présence d'une végétation chlorophyllienne, a été codifiée avec le chiffre 6. Sur chaque segment, on s'efforce de noter les couleurs dominantes et leurs taux de recouvrement.

### **L'ÉROSION ET L'ACTIVITÉ FAUNIQUE**

Les formes engendrées par l'érosion et les traces d'activité faunique sont notées au fur et à mesure de la progression sur le terrain. Sur les lignes, l'inventaire des formes d'érosion et des traces d'activité faunique est à peu près exhaustif. Par contre, sur les sections, la visibilité à partir de la piste limite l'inventaire à des distances qui varient en fonction du couvert végétal.

### **LES SURFACES ÉLÉMENTAIRES**

L'ensemble des observations précédentes servent en particulier à préciser les états de surface types rencontrés. L'identification précise et la description des types de surfaces élémentaires sont effectuées tout d'abord lors de la description des lignes. Pour les sections, c'est cet inventaire préalable, réalisé sur les lignes associées, qui permet d'affecter à chaque segment un mélange d'états de surface types, en se référant éventuellement au catalogue des états de surface de la zone sahélienne au cas où il subsisterait un doute sur leur identification.

## DÉPOUILLEMENT, PRÉSENTATION

Les observations sont consignées sur des tableaux conformes aux modèles ci-dessous. Chaque colonne correspond à un type d'observation. Les couverts arborés et arbustifs sont indiqués en mètres carrés pour les lignes, en pourcentage de recouvrement pour les sections. Pour les arbres, on effectue la somme des surfaces au sol couvertes par les couronnes. Pour les arbustes, on reprend les estimations visuelles en combinant diverses descriptions fournies par l'observateur.

La plupart des autres estimations sont directes et ne nécessitent aucun calcul. Des tests de cohérence entre différents types d'observations permettent de rectifier les erreurs les plus grossières.

Les espèces végétales arborées et arbustives sont notées régulièrement mais ne figurent pas dans les tableaux récapitulatifs.

Des résumés regroupent par ligne ou par section l'essentiel des observations et donnent, à titre d'information, la répartition des types de surface élémentaires et la relation hydrodynamique moyenne qui correspond à cette répartition.

### EXEMPLE : RÉSUMÉ DE LA SECTION 16, BARRAGE DE LOURÉ-MANGA

Savane arborée claire, localement assez dense, sur sol limono-sableux en marge d'un bas-fond à sols vertiques.

Couvert arboré	: 12 %	Couvert herbacé	: 70 à 80 %
Couvert arbustif	: 3 %	Brûlis	: 16 %
		Cultures	: 15 %

#### Répartition des surfaces élémentaires :

DES 1	: 27 %	C 1	: 4 %	VERT:	10 %
VERS	: 50 %	C 2.1	: 2 %	DEC	: 7 %

#### Relations hydrodynamiques

PU < 40 mm	$Lr = 0,22 \text{ PU} + 0,003$	$\text{PU.IK} + 0,04 \text{ IK} - 4,8$
PU > 40 mm	$Lr = 0,29 \text{ PU} + 0,0024$	$\text{PU.IK} + 0,05 \text{ IK} - 6,9$

Le meilleur exemple d'utilisation de la technique de l'échantillonnage en lignes seules reste, au Burkina Faso, le programme Spot-Oursi développé sur le bassin versant de la mare d'Oursi en 1986, à l'occasion du lancement du satellite français Spot (LAMACHÈRE J.M., 1988).

La technique de l'échantillonnage en lignes et sections a été pratiquée sur un ensemble de neuf bassins versants au Burkina Faso dans le cadre du projet PNUD-BKF/88/002 (CIEH, LCT, ORSTOM, BUNASOLS, 1990 et 1992), puis sur un ensemble de trois bassins versants au Burkina Faso et au Sénégal dans le cadre d'un projet FAO en cours de réalisation.

**Tableau 1**  
**Barrage de Louré (Manga)**  
**Ligne n° 12 au 10/04/90**

Limites entre états de surface	Distance en m	Couvert végétal				Types de surfaces élémentaires				
		Arboré		Herbacé		DES 1 %	DEC %	VERS %	GRO 1 %	VERT %
		arbre m <sup>2</sup>	arbustes m <sup>2</sup>	herb %	litière %					
1/2	20,6	74,4	0	100	100	100				
2/3	28,6	19,3	4,0	90	90		100			
3/4	27,6	0	11,1	100	100		100			
4/5	33,0	0	25,3	100	100			100		
5/6	38,4	20	0	100	100			100		
6/7	27,4	201	6,2	100	100			100		
7/8	36,3	54,8	19,6	100	100			100		
8/9	28,3	28,3	58,8	70	70				100	
9/10	12,4	75,5	0	20	30				100	
10/11	49,0	26,2	32,2	100	100				100	
11/12	49,8	0	199,2	100	100					100
	351,4	7,1 %	5,1 %	94	94	6	16	38	26	14



## DÉCODAGE DES IMAGES SATELLITE : CARTOGRAPHIE D'UN INDICE DE RUISSELLEMENT

Malgré la petite taille de la surface de mesure du mini-simulateur de pluies (seulement 1 m<sup>2</sup>), il est apparu intéressant d'essayer de coupler les renseignements issus du catalogue des états de surface sahéliens avec ceux de la télédétection.

La méthodologie utilisée consiste à déterminer, à l'aide d'une image satellite haute résolution et des données de terrain selon les sections décrites plus haut, la composition en états de surface types représentative de chaque pixel. À partir de cette connaissance, il est possible d'associer à chaque pixel équation hydrodynamique et fonction de la pluie, ce qui conduit à une cartographie d'un index du ruissellement du bassin versant.

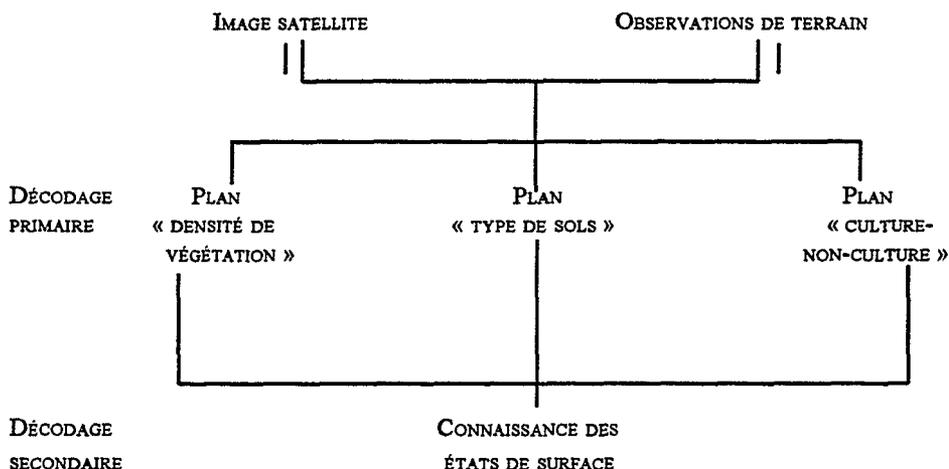
Mais la détermination des différents états de surface nécessite celle de nombreux paramètres que l'on peut classer en éléments *a priori* détectables sur image satellite (par exemple : culture/non culture), mais aussi en observations d'une finesse trop grande pour être déterminées à partir des images (par exemple : nombre de micro-horizons, présence de termites, etc.). Ainsi, la totalité des renseignements voulus ne pourront être obtenus directement par les images satellites ; il faudra donc opérer par étapes successives.

### DÉCODAGE PRIMAIRE

Les classifications d'images ont été faites sur un mode dirigé, en utilisant les mesures de terrain de type sections, sur logiciel « Multiscope » et par la méthode du maximum de vraisemblance sous hypothèse gaussienne. On a défini trois classifications séparées donnant des plans physiques d'explication élémentaire, que nous appellerons plans primaires :

- un premier plan dit « végétation » a été élaboré sur la base de cinq classes de densité arborée ;
- un plan « occupation du sol », séparant les zones de culture, jachère et « nature » ;
- un plan « types de sols » différenciant zones d'affleurements rocheux et cuirasses, blocs et graviers, gravillons, sables grossiers, sables fins, limons.

Les conclusions auxquelles on arrive sont tout à fait convenables.



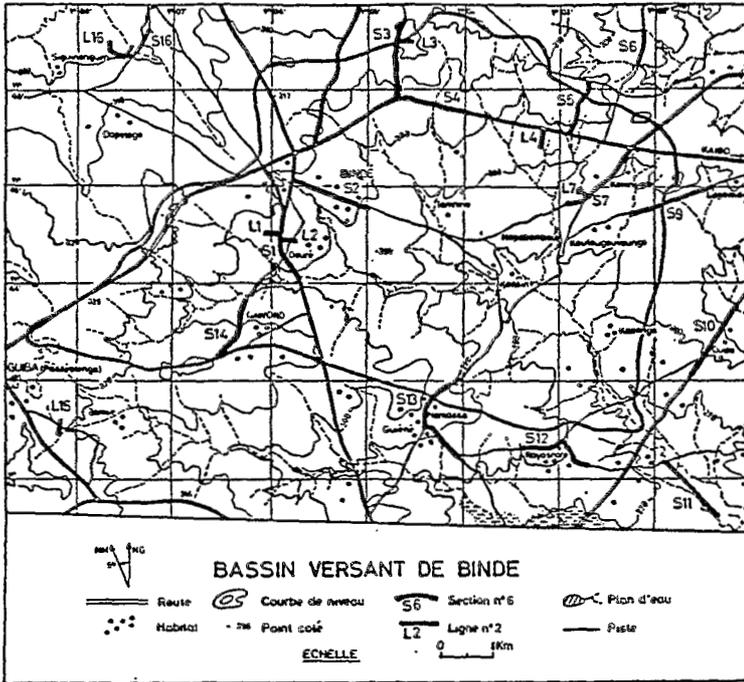
### DÉCODAGE SECONDAIRE : OBTENTION DES CARTES D'ÉTATS DE SURFACE ET D'APTITUDE AU RUISSELLEMENT

Partant de la connaissance de ces trois états (sol S, végétation V, Culture/Nature C) pour chaque pixel de l'image, le passage aux états de surface types se fait par l'utilisation de corrélations tirées de l'observation des états de surface décrits dans chaque segment élémentaire des sections observées.

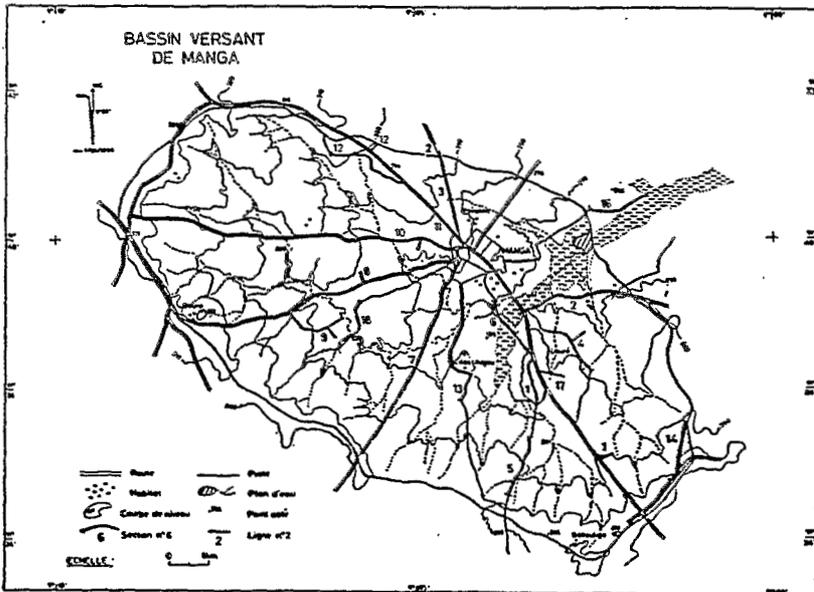
Nous partons de l'hypothèse que, localement, la présence de critères secondaires (micro-horizons, mésofaune, et autres critères « fins ») est liée à celle de paramètres plus globaux (sol, végétation, occupation du sol) et qu'il est possible d'obtenir des associations suffisamment corrélées à partir des observations simultanées le long des sections. Ces associations conduisent, à l'issue de cette étape, à affecter à tout pixel un mélange d'états de surface types et donc une relation hydrodynamique moyenne donnant la lame ruisselée correspondant à l'équation 1 (figure 3).

Il est alors possible de calculer, pour une pluie et un indice de pluies antérieures donné, la relation hydrodynamique  $L_r(P, IK)$  correspondant à chaque pixel, ce qui permet un passage à une cartographie des lames ruisselées (figure 4).

Notons que la valeur obtenue n'est que la lame ruisselée équivalente obtenue selon le protocole du mini-simulateur de pluie et que sa validité n'est valable qu'à l'échelle expérimentale ( $1 \text{ m}^2$ ) et dans les conditions de l'expérience (isolement avec les zones voisines en particulier). On ne peut donc strictement parler que d'un index du ruissellement.



**Figure 3**  
Image des classes d'états de surface



**Figure 4**  
Bassins de Binndé et Kazanga  
Image des lames ruisselées correspondant à la pluie décennale de 120 mm

## PASSAGE DU PIXEL AU BASSIN VERSANT

Au-delà de ce but simplement cartographique, il est intéressant de voir dans quelle mesure il est possible de passer à la connaissance des débits sur l'ensemble du bassin versant avec tous les problèmes liés au changement d'échelle qui en découlent.

### EN VOLUME : COEFFICIENT DE CALAGE

La méthode la plus simple consiste à faire cette extrapolation par la somme des équations des lames élémentaires pondérées au prorata de leurs étendues respectives.

$$Lrc = \sum_i (Lr_i * s) / S \quad (\text{Lame ruisselée calculée})$$

$$Krc = \sum_i (Lr_i * s) / S / P10 \quad (\text{Coefficient de ruissellement calculé})$$

où :

- $Lr_i$  est la lame ruisselée produite par le pixel  $i$  ;
- $S$  la surface du bassin,  $s$  la surface du pixel ;
- $P10$  est la pluie décennale pour un événement.

Mais le ruissellement global d'un bassin n'étant pas la somme des ruissellements partiels du fait de la non-linéarité des processus, une dérive se produit entre somme de ruissellements élémentaires et ruissellement global, que l'on peut expliquer par un « effet d'échelle » ou de globalisation, et qui vient du comportement différent de parcelles juxtaposées.

La solution habituellement utilisée consiste à utiliser un « coefficient de calage », rapport entre valeurs calculées (somme des valeurs étendue au bassin versant) et valeurs observées (par mesures hydrologiques directes des débits à l'exutoire).

Ces coefficients de calage sont variables dans l'espace d'un bassin à l'autre, ce qui gêne l'exportation de la méthode vers des bassins non jaugés. Par exemple, sur les trois bassins de Manga, nous avons obtenu des coefficients de 0,53 à 0,90 (figure 5 et 6). Malgré ces graves inconvénients, on garde l'espoir de parvenir directement de la mesure locale à l'estimation de la lame ruisselée à l'échelle du bassin versant (ALBERGEL J., 1987).

Ce type de méthode est appliqué au Sahel depuis quelques années, avec recours à une cartographie manuelle aidée éventuellement par photo-interprétation de photographies aériennes. L'originalité de notre approche consiste à essayer de faire cette cartographie par télédétection selon un protocole précis qui puisse être stable et réutilisable d'un opérateur à l'autre.

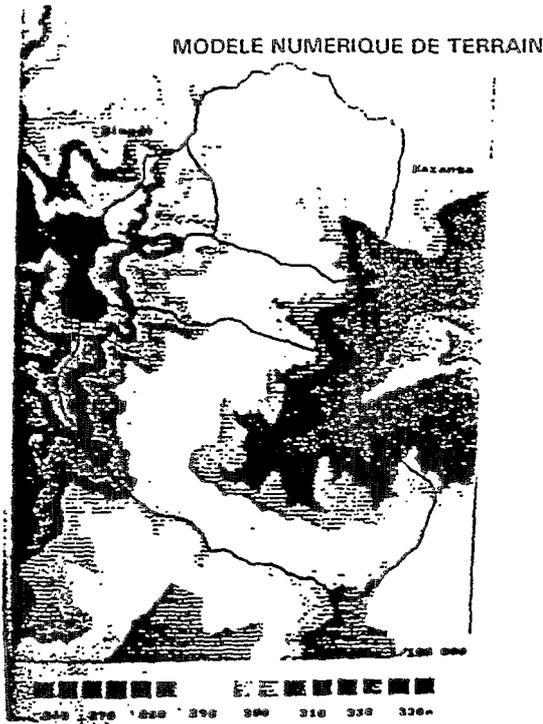


Figure 5  
Fonction de calage sur Louré - Intervalle de confiance à 95 %

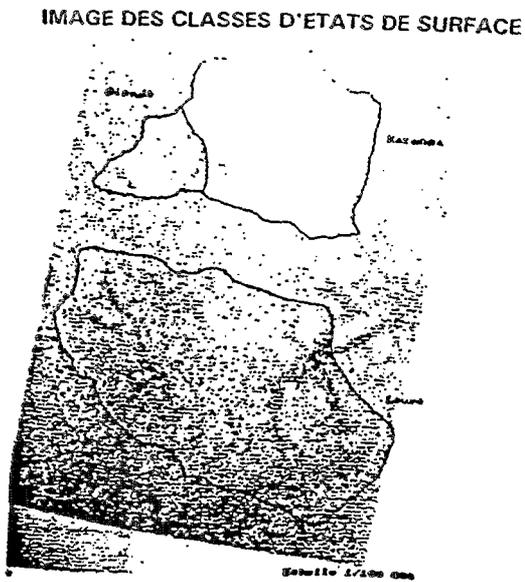


Figure 6  
Évaluation du débit de crue décennale - Bassin de Manga

## HYDROGRAMMES DE CRUE

Pour passer du volume de crue au débit maximal de crue, il est nécessaire d'avoir des informations sur la forme de l'hydrogramme, soit par des coefficients types de passage du débit moyen au débit maximal, soit mieux, si c'est possible, par reconstitution de l'hydrogramme de crue.

Nous présentons ici, une ébauche de modélisation de l'hydrogramme par couplage entre télédétection (définissant pixel à pixel des facteurs de ruissellements) et MNT (modèle numérique de terrain définissant les conditions de transfert des eaux, cf. figure 7). Cet essai est destiné à montrer qu'à partir des outils spatialisés que nous offrent la télédétection et les modèles numériques de terrain, il est possible de construire une chaîne entièrement automatisée permettant d'approcher le débit de crue du bassin.

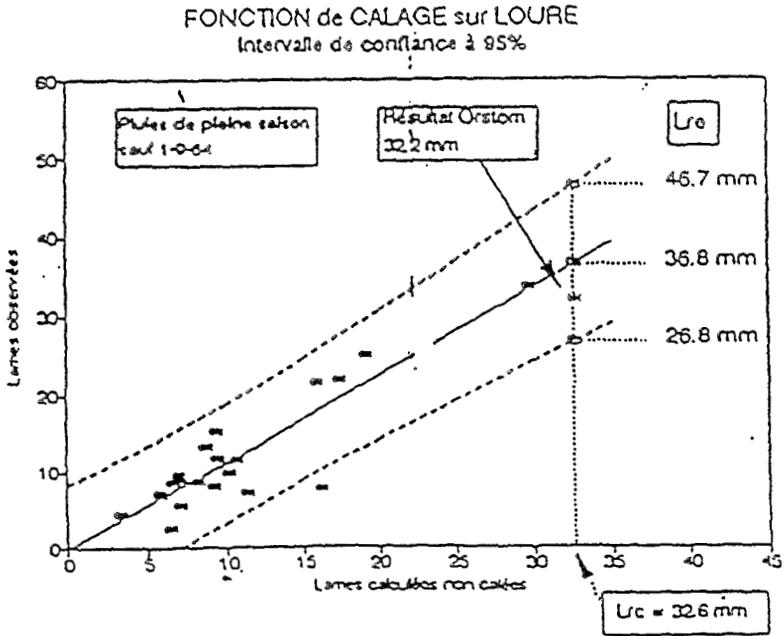
Notre modélisation s'intéresse au seul ruissellement de surface et part des hypothèses déjà énoncées pour la partie volume de crue. Elle utilise un schéma de type « hydrogramme unitaire » pour le transfert, reconstitué à partir d'hypothèses simples sur les vitesses de propagation des eaux dans le bassin.

Un modèle de propagation a été écrit en langage turbo C sur micro-ordinateur et appliqué aux bassins versants étudiés. La comparaison entre les hydrogrammes de crues estimés à l'aide de notre méthodologie et ceux observés ou estimés de façon traditionnelle, donne une grande cohérence globale des observations et des estimations. Les résultats que l'on observe pour les trois bassins étudiés sont tout à fait acceptables et donc encourageants (figure 8 et 9).

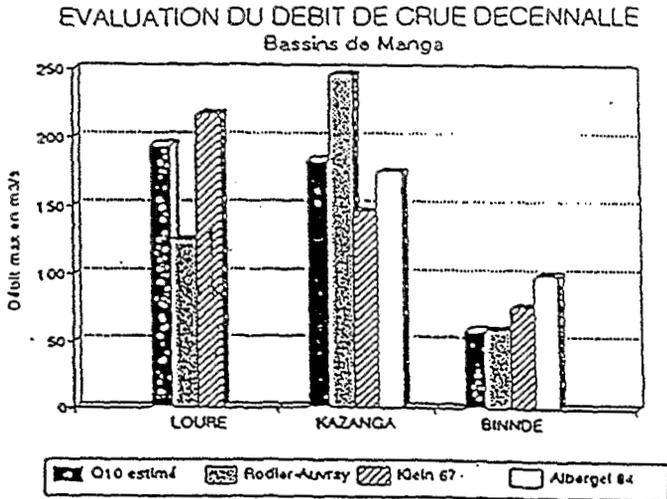
BASSINS DE BINNDE ET KAZANGA  
IMAGE DES LAMES RUISSELLEES CORRESPONDANT  
A LA PLUIE DECENNALE DE 120 MM



Figure 7  
Modèle numérique de terrain



**Figure 8**  
*Crue annuelle estimée sur Binndé  
À partir du hyélogramme décennal type*



**Figure 9**  
*Hydrogramme unitaire reconstitué  
Bassin de Kazanga*

## CONCLUSION

L'objectif de nos travaux était avant tout de définir, en la testant, une méthode aussi fiable que possible de caractérisation de l'aptitude au ruissellement des bassins versants en zone sahélienne et nord-soudanienne. Les premiers résultats du décodage des images satellitaires sont encourageants et permettent de penser qu'un grand avenir est réservé à leur exploitation pour cartographier l'aptitude des sols au ruissellement et à l'infiltration.

Le passage d'un décodage d'image à une quantification hydrologique à l'échelle d'un bassin versant pose encore de nombreux problèmes. Notamment celui des transformations subies par les surfaces élémentaires au cours de la saison des pluies et celui des transferts hydriques à l'échelle des unités paysagiques et des versants.

En ce qui concerne les transformations subies par les surfaces élémentaires en cours de saison des pluies, il existe encore peu d'informations, faute d'observation de l'évolution des états de surface et de suivi de leur comportement hydrodynamique. Les sols cultivés sont les premiers à subir des transformations rapides et radicales par le travail du sol, sous l'action des gouttes de pluie ou par la croissance du couvert végétal. Les premières informations disponibles à ce jour sont relatives à l'évolution de l'aptitude au ruissellement des sols sableux fins après sarclage (LAMACHÈRE J.M., 1991), mais elles ne peuvent être extrapolées à tous les types de sols cultivés et à tous les types de travail du sol.

Les surfaces naturelles subissent, elles aussi, de profondes transformations en relation avec le développement du couvert végétal, sa sénescence ou sa destruction par le feu et le surpâturage. Des observations ont été effectuées en zone sahélienne sèche sur le bassin versant de la mare d'Oursi au cours de l'hivernage 1986 (DEVINEAU J.L., 1992). D'autres observations sont en cours sur l'évolution de la savane africaine dans le cadre du programme Salt (Savane A Long Terme), mais elles doivent être complétées par des informations hydrologiques pour être utilisables dans la définition des fonctions de production des surfaces élémentaires.

À l'échelle des unités paysagiques, il semble nécessaire de procéder à une description spatiale minutieuse des états de surface, des sols et des chemins de l'eau, puis d'associer cette description à des mesures de ruissellement sur un ensemble de micro-bassins versants soigneusement sélectionnés. La même démarche doit être appliquée à l'échelle des versants pour appréhender leur fonctionnement hydrologique et modéliser les transferts hydriques à cette échelle.

Nos travaux de terrain, menés au Burkina Faso depuis les zones sahéliennes sèches jusqu'aux zones de savane humide, ne fournissent pour l'instant qu'une répartition des états de surface qui est une moyenne de saison sèche. Ils ne fournissent que peu d'informations sur les conditions de transfert des eaux au sein d'une même unité paysagique, ou de l'amont vers l'aval d'un versant, en fonction de la structure du paysage et de l'évolution du couvert végétal.

Quoiqu'il en soit, la modélisation mathématique offre de multiples ressources pour passer outre à l'insuffisance de nos informations descriptives. La solution la plus simple consiste à procéder à un calage des paramètres du modèle hydrologique à partir de mesures globales effectuées à l'exutoire des bassins versants. C'est la solution retenue dans le cadre de nos travaux de modélisation hydrologique. Elle ne diffère pas de celle proposée par (ALBERGEL J., 1987) dans l'ouvrage « Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso : du m<sup>2</sup> au km<sup>2</sup> » et présente les mêmes inconvénients d'une difficile régionalisation, faute de pouvoir estimer les paramètres de calage à partir d'éléments descriptifs collectés sur le bassin versant. Pour sortir de cette impasse, il semble bien qu'il faille emprunter le difficile chemin d'une connaissance plus approfondie du ruissellement à l'échelle des paysages et des versants en complétant celle que nous avons acquise à l'échelle de la surface élémentaire.

## BIBLIOGRAPHIE

- ALBERGEL J., RIBSTEIN P., VALENTIN C., 1986 - L'infiltration : quels facteurs explicatifs ? Analyse des résultats acquis sur quarante-huit parcelles soumises à des simulations de pluies au Burkina Faso. Journées hydrologiques de l'Orstom, Montpellier. Collection Colloques et Séminaires, 25-48.
- ALBERGEL J., 1987 - Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso : du m<sup>2</sup> au km<sup>2</sup> - Étude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. Orstom, Études et Thèses, 341 p.
- CASENAVE A., VALENTIN C., 1989 - Les états de surface de la zone sahélienne - Influence sur l'infiltration. Orstom, 1989.
- CIEH, LCT CÉMAGREF/ENGREF, BUNASOLS, 1990 - Utilisation de la télédétection satellitaire pour la caractérisation hydrologique de neuf bassins versants au Burkina Faso.

- Tome 1 : Bassin versant de Tiébélé
- Tome 2 : Bassin versant de Boukouma
- Tome 3 : Bassin versant de Gha et Sian
- Tome 4 : Bassin versant de Zeguedeguin
- Tome 5 : Bassin versant de Yitenga
- Tome 6 : Bassin versant de Nagbangré et Ouedbila
- Tome 7 : Bassin versant de Louré (Manga).

CIEH., LCT., CÉMAGREF/ENGREF., ORSTOM., BUNASOLS., 1992 - Étude hydrologique avec traitement d'images de neuf bassins versants de petits barrages au Burkina Faso.

Tome 1 : Rapport général, 1<sup>ère</sup> partie, 71, 54 annexes

Tome 2 : Rapport général, 2<sup>ème</sup> partie, 72-107, 74 annexes

Tome 3 : Annexes méthodologiques, 191 p.

COURAULT D., VALENTIN C., 1990 - Caractérisation spectrale des principales organisations de surface des sols du Niger, *In Xe journées de télédétection de l'Orstom, Bondy 1990.*

DEVINEAU J.L., FOURNIER A., LAMACHÈRE J.M., MALEK C., 1992 - Le programme d'évaluation préliminaire Spot n° 149 - Spot-Oursi - Observations au sol, photo-interprétation et traitements numériques d'images satellitaires sur le bassin versant de la mare d'Oursi. Communication au Colloque "Mare d'Oursi", Ouagadougou, 17 au 21 février 1992, 20 p.

HOEPFNER, GOUTORBE, SELLERS, TINGA, 1991 - Le programme HAPEX Sahel, *In « Utilisation rationnelle de l'eau de petits bassins versants en zone aride ».* Éd. AUPELF UREF, John Libbey Eurotext.

JOANNES, PARNOT, RANTRUA, SOW, 1986 - Possibilité d'utilisation de la télédétection dans le domaine de l'eau en Afrique. CIEH, *Série Hydrologie*, Ouagadougou, 141 p.

LAMACHÈRE J.M., 1988 - Programme d'évaluation préliminaire Spot PEPS n°149 - Spot Oursi - Les états de surface de la région d'Oursi - Observations au sol et hydrodynamique, Orstom Ouagadougou, 98 p.

- LAMACHÈRE J.M., 1991 - Aptitude au ruissellement et à l'infiltration d'un sol sableux fin après sarclage. Proc. of the Niamey workshop, feb. 1991, *AISH Publ. 199*, 109-119.
- OCDE (Organisation de Coopération et de Développement Économiques), Club du Sahel, 1989 - Compte rendu de la conférence sur la télédétection satellitaire au service du Sahel, Niamey.
- PUECH C., LAILY B., 1990 - Utilisation de la télédétection satellitaire pour la caractérisation hydrologique de neuf bassins versants au Burkina Faso. Projet PNUD-CIEH, Ouagadougou.
- PUECH C., 1990 - Apport de la télédétection à l'aménagement des bassins versants par petits ouvrages en Afrique soudano-sahélienne, *In* « Utilisation rationnelle de l'eau de petits bassins versants en zone aride ». Éd. AUPELF UREF, John Libbey Eurotext, 1991.
- PUECH C., CHABI G., 1983 - Méthode de calcul des débits de crues décennales pour les petits et moyens bassins versants en Afrique de l'Ouest et Centrale. CIEH, *Série Hydrologie*.
- RODIER J.A., AUVRAY C., 1965 - Estimation des débits de crues décennales pour les bassins versants de superficie inférieure à 200 km<sup>2</sup> en Afrique occidentale. Orstom-CIEH.