TELEDETECTION ET APTITUDE AU RUISSELLEMENT DES BASSINS VERSANTS SAHELIENS

Par Christian PUECH et Olivier DELAHAYE [1]

RESUME

Les méthodes classiques de détermination des débits de crues sur les petits bassins versants du Sahel sont très imprécises et il est reconnu que c'est la mauvaise connaissance de l'aptitude des bassins au ruissellement qui est responsable de cette imprécision. L'objectif de cet article est de préciser l'apport de la télédétection dans cette connaissance et dans la détermination du ruissellement. Le choix de la référence pour la liaison type de sol/ruissellement a été celui du catalogue des états des diverses surfaces du Sahel de Casenave et Valentin, qui synthétise les résultats du mini-simulateur de pluie sur une dizaine d'années dans la région. Les étapes de la démarche sont les suivantes :

1) détermination des plans élémentaires «densité de végétation», «type de sol» et «culture/non culture» à partir d'images Landsat TM de saison sèche (Décembre 1988) et de mesures de terrain par transects ;

2) reconnaissance sur le terrain des différents états de surface type, par mesures de terrain précises, dites «lignes» ;

3) passage des plans élémentaires à la cartographie des états de surface types par corrélation entre les deux résultats précédents ;

4) obtention d'une équation de lame ruisselée pour chaque pixel, donnant par exemple la lame ruisselée décennale.

Au delà de cette cartographie des lames ruisselées, nous avons tenté une modélisation des écoulements sur les bassins versants de Manga (10, 55 et 98 km²) au Burkina Faso, en nous servant du cheminement des eaux dicté par un modèle numérique de terrain. Les résultats obtenus sont encourageants.

Nous nous penchons dans cet article sur les raisons qui permettent de penser qu'au Sahel le contexte est favorable pour l'utilisation de la télédétection pour résoudre ce problème, mais aussi sur tous les écueils de la méthode proposée qui ne sont pas entièrement contournés.

Mots clés : télédétection, hydrologie, bassins versants, Sahel.

ABSTRACT

Conventional methods for flow discharge determination in the small watersheds in Sahel are very imprecise. It is well known that insufficient knowledge of the natural capacity of watersheds for run-off is responsible for that imprecision. The aim of this article is to precise the contribution of remote sensing to this knowledge and thus to run-off determination. Soil type/run-off binding reference has been chosen in the superficial conditions in Sahel listing by Casenave and Valentin. This listing synthezises the results of the rain mini-simulator obtained since about ten year measurements in the region. Steps for the study are the following :

1) Determination of elementary plans «vegetation density», «soil type» and «crop/no crop» from Landsat TM images during dry season (Déc. 1988) and on field measurements along transects.

2) Site investigation of the different types of superficial conditions, by precise field measurements, named «lines».

3) Transfer from elementary plans to typical superficial conditions survey by correlation between the two preceding results.

4) Elaboration of an equation giving the run-off depth for each pixel, e.g. giving the decennal run-off depth.

Beyond this run-off depths cartography we tried to modelize streaming on the Manga water-sheds (10, 55, and 98 km²) in Burkina Faso, using traversing of waters given by a numerical site model. Achieved results are attractive.

In this article we examine reasons which allow to think that context in Sahel is propitious to the use of remote sensing to solve this problem. Yet all the snags in the method are not already solved.

Key words : remote-sensing, hydrology, watersheds, Sahel.

[1] Laboratoire commun de télédétection LCT CEMAGREF/ENGREF. Communication présentée aux 4èmes journées scientifiques du réseau télédétection de l'UREF, «Télédétection appliquée à la cartographie thématique et topographique». Montréal - Octobre 1991.

INTRODUCTION

Les méthodes classiques de détermination des écoulements sur les petits bassins versants sahéliens se heurtent à la difficulté d'appréciation de l'aptitude au ruissellement. Les méthodes d'estimation élaborées pour la détermination des crues (Rodier- Auvray, 1965, Puech-Chabi, 1983) et pour celle des apports (Rodier, 1975-76) considèrent le bassin versant de façon globale.

La précision globale des estimations peut être médiocre, les résultats dépendant de la détermination des paramètres de description des bassins qui est relativement subjective, notamment la perméabilité. La détermination de ce dernier paramètre dépend grandement de l'expertise de l'hydrologue et l'ingénieur de projet peut se sentir démuni face à ce problème.

Il est aussi des cas où la répartition des zones perméables et imperméables sur le bassin versant est inversée par rapport aux bassins ayant servi de base à l'élaboration des méthodes. Ainsi, on peut dire que c'est de la mauvaise connaissance de l'aptitude au ruissellement que viennent la plupart des difficultés d'estimation des débits sur ces bassins versants.

Nous nous sommes posé la question de savoir en quoi la télédétection et les techniques de description spatiale associées pouvaient aider à une connaissance plus correcte de ces bassins, plus indépendante de l'opérateur et, partant, à une meilleure détermination des critères de ruissellement. Nous décrivons ici l'état actuel de notre recherche en ce sens.

UN DOMAINE A PRIORI FAVORABLE A L'UTILISATION DE LA TELEDETECTION

La perspective d'utilisation de la télédétection part d'un certain nombre de constatations faisant a priori du Sahel une zone où les informations satellitaires peuvent être facilement valorisées dans le contexte de la connaissance des ruissellements. Ces constatations sont les suivantes :

- grandes étendues sans données précises ;
- écoulement souterrain négligeable devant le ruissellement au cours des crues ;
- ruissellement essentiellement fonction de facteurs de surface ;
- éléments de surface décryptés facilement sur les images satellites du fait de l'alternance des saisons sèche et pluvieuse et de la faible couverture arborée ;
- précision très médiocre des méthodes de calcul des débits de crue sur petits bassins.

Dans ce projet nous tentons d'utiliser cette conjonction d'éléments favorables pour permettre une approche nouvelle de l'estimation du ruissellement. Notre effort s'est porté sur plusieurs niveaux de recherche, autant de maillons permettant d'aller des données images jusqu'aux valeurs de débits.

NIVEAU GLOBAL

Une première utilisation possible de la télédétection pour la connaissance des débits pour les bassins du Sahel a été exposée lors des Journées Techniques de l'AUPELF-UREF à Ouagadougou en Mars 1990 (1). Elle consiste à utiliser les images satellites pour définir les états de surface de la zone d'étude et de relier chacun de ces états à un critère de perméabilité. La connaissance de la répartition spatiale des états de surface sur les bassins à étudier permet alors de déterminer un paramètre global de perméabilité sur l'ensemble du bassin, au prorata de la répartition des divers états de surface rencontrés. On peut opérer de la même façon pour la connaissance du facteur pente à partir d'une série de photos aériennes et/ou d'un modèle numérique de terrain si l'on dispose des éléments pour le calculer. Dès lors, il devient possible d'utiliser ces renseignements dans une détermination des débits qui utilise les méthodes classiques.

Dans cette méthodologie, la télédétection est utilisée comme aide à l'estimation des paramètres ; elle se place en quelque sorte comme un garde fou à opposer aux estimations plus ou moins subjectives habituelles.

Les résultats obtenus par cette méthode, appliquée sur le bassin versant du Baongo près de Titao au Burkina Faso, ont été validés à 2 niveaux :

- Validation de la carte des états de surface obtenus à partir de l'image SPOT XS du 21.10.1988 par comparaison à des photos aériennes basse altitude concomitantes à la fois aux observations de terrain et à l'image satellite.

- Validation des débits estimés, en les comparant au débit observé sur le terrain lors d'une crue pratiquement décennale. Le débit observé (52,5 m^3/s) est très proche des estimations effectuées à l'aide des méthodes classiques dans lesquelles on a injecté les paramètres estimés comme indiqué ci-dessus (respectivement 47,8 et 60 m^3/s). Mais il est difficile de conclure sur une seule observation.

(1) Communication reprise dans le n° 81 du bulletin de liaison du CIEH de juillet 1990.

Au cours de cette première étude ont été abordés les problèmes de méthodologie de terrain et de décodage des images dans un contexte de «paysage ouvert» où les entités à décrypter au sol ne correspondent pas à un critère unique et précis (tels que «blé», «maïs», ...), mais à une juxtaposition sur le terrain d'entités différentes en pourcentages variables : sols nus, savanes, cultures, habitations, arbres divers, composant à l'intérieur même d'un pixel SPOT (20*20 m) un amalgame souvent complexe.

NIVEAU SPATIALISE

Nous abordons dans cet article une deuxième approche possible de l'utilisation des images satellites, visant cette fois une connaissance spatialisée de l'aptitude au ruissellement de ces bassins.

L'hypothèse de base est d'essayer de récupérer les informations sur les transformations élémentaires pluie-débit fournies par l'appareil dit «mini-simulateur de pluie» que l'ORSTOM utilise dans le Sahel depuis une bonne dizaine d'années. Il se trouve en effet qu'une synthèse sur les états de surface du Sahel donnant pour chacun d'entre eux une équation de lame ruisselée en fonction de la pluie a été récemment réalisée par l'ORSTOM (Casenave et Valentin, 1989). Malgré tous les défauts de cette connaissance, dus essentiellement à la taille de la mesure effectuée (seulement 1m!), il est apparu intéressant d'essayer de coupler ce type de renseignement à ceux issus de la télédétection.

La méthodologie a consisté à déterminer à l'aide d'images satellites la composition en «états de surface types» représentative de chaque pixel. A partir de cette connaissance il est possible de connaître pour chaque pixel élémentaire la fonction de production associée à une pluie donnée, ce qui conduit à une cartographie des possibilités de ruissellement du 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.

Mini-simulateur de pluie et états de surface

Le mini-simulateur de pluies de l'ORSTOM est un appareil qui simule une pluie sur un carré élémentaire de $1m^2$. Les essais sont menés de façon à pouvoir relier la lame ruisselée aux valeurs de pluie P et à l'Indice de pluie antérieure Ip caractérisant l'état d'humidité du sol. Un protocole précis de pluie en fontion du temps est appliquée.

Les résultats de ces simulations permettent, en théorie, d'associer à chaque type de surface de taille $1m^2$, une équation hydrologique reliant la pluie, l'indice des pluies antérieures et la lame ruisselée, de la forme suivante :

$$Lr = a.P + b.Ik + c.P.Ik + d \qquad (1)$$

dans laquelle :

Lr = valeur moyenne de la lame ruisselée pour le type modal (mm)

P = pluie journalière de récurrence annuelle ou décennale (mm)

a, b, c, d coefficients dépendants du sol.

Ik = indice des précipitations antérieures (de Kohler), fonction de la pluie et de l'indice de la veille. L'indice du jour n est calculé à partir de l'indice du jour n-1 par :

$Ik_n = (Ik_{n-1} + P_{n-1}).e^{-xt}$ (2) avec t = le temps en jours

x = coefficient d'ajustement, généralement pris égal à 0.5

Le mini-simulateur a été utilisé sur de nombreux états de surface du Sahel, à tel point que Casenave et Valentin ont pu en sortir une synthèse en 1989. Cette synthèse fait ressortir les points connus précédemment, à savoir que la présence d'une croûte de battance sur le sol modifie grandement les conditions du ruissellement. Plusieurs types de croûtes ayant été définis, chacun avec sa propre réponse, il apparaît important de pouvoir les distinguer convenablement. Le catalogue présenté à l'avantage de proposer une base de références homogène et stable sur la zone en question, et il semble donc a priori intéressant de chercher à s'y ramener.

Tableau I : *Classes des états de surface types*

Code	Désignation
C1	Cultures 1
C2	Cultures 2
C3	Cultures 3
TER	Termites et vers
VER	Vers
DES	Croûte de dessication
ST1	Croûte structurale à 1 horizon
ST2	Croûte structurale à 2 horizons
ST3	Croûte structurale à 3 horizons
ERO	Croûte d'érosion
DEC	Croûte décantation
GRO	Croûte grossière
RUI	Croûte de ruissellement
EOL	Croûte de dépôts éoliens

On trouve le premier écueil de la méthode quand on se préoccupe de savoir quelles observations sont nécessaires pour définir sans ambiguïté ces états de surface types. On s'aperçoit alors que la détermination des différentes types de croûtes observables nécessite la connaissance

de paramètres tels que culture/non culture c'est-à-dire des éléments a priori détectables sur image satellite, mais aussi une série d'autres observations qui sont, au contraire, d'une finesse trop grande pour être déterminées à partir des images : par exemple le nombre de micro-horizons, la présence de termites, ... (Cf. figure 1). Il en ressort que les images satellites ne pourront pas nous donner directement les renseignements voulus mais qu'il faudra opérer par étapes successives.

Figure 1 : *Clef de détermination des types de surfaces d'après Casenave et Valentin (1989)*

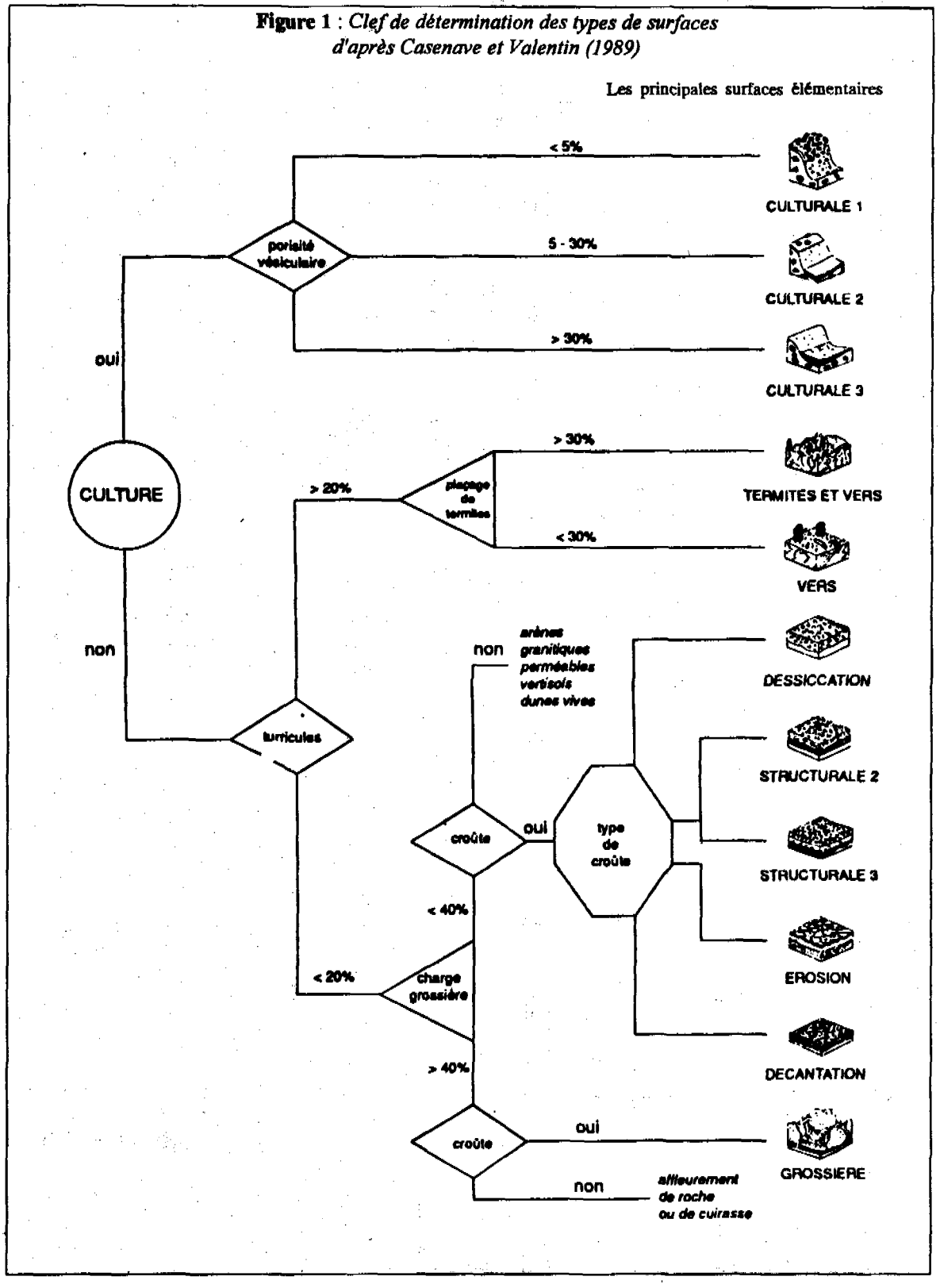
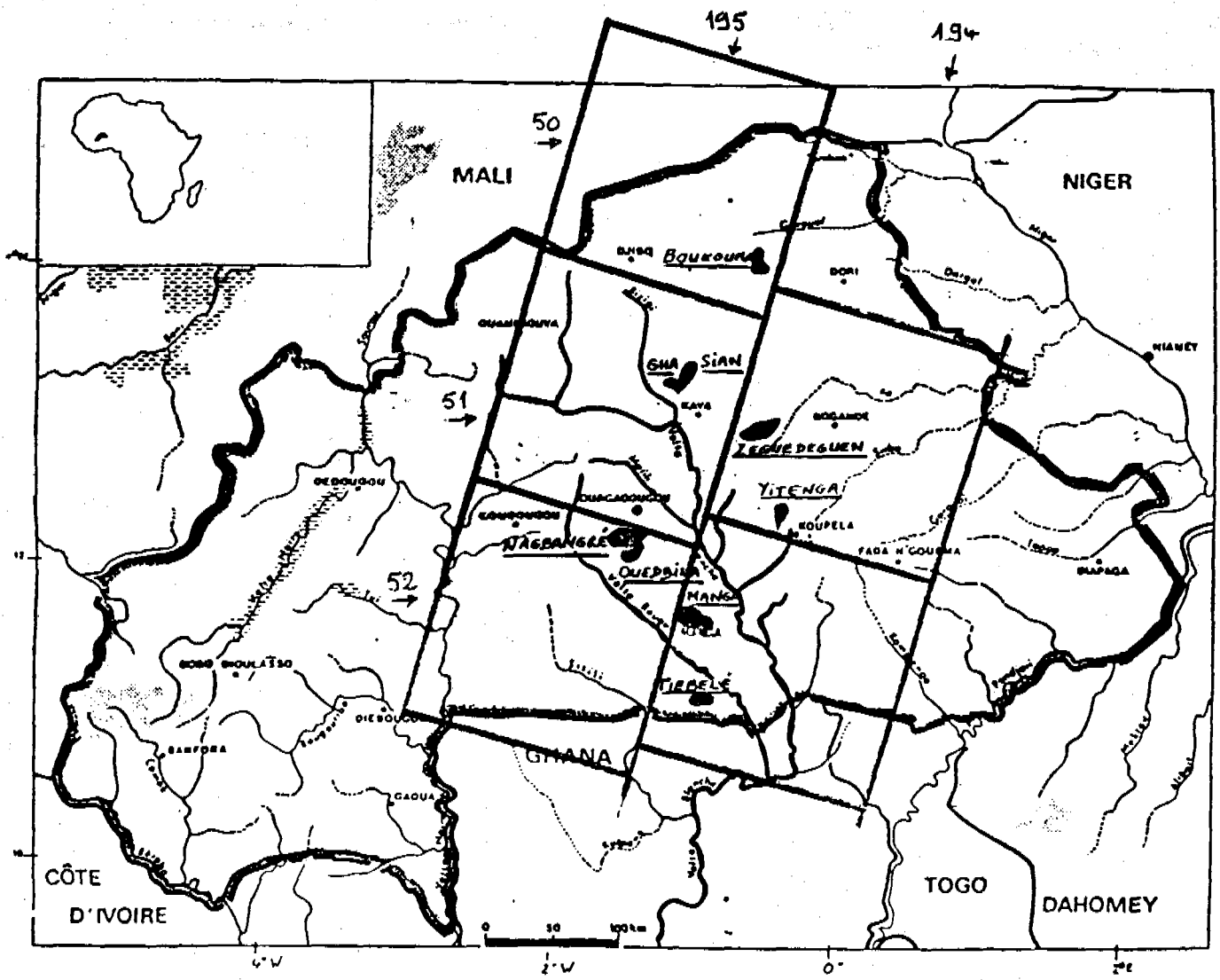


Figure 2 : *Situation des bassins versants étudiés et des images satellites utilisées*



Bassin	Taille en Km²	P/an	Date IMAGE	Date Relevés de terrain
BOUKOUMA	430	550	23 11 88	juillet 90
SIAN	750	700	7 11 88	fin mai 90
GHA	30	700		
ZEGUEDEGUEN	490	700	18 12 88	novembre 90
YITENGA	100	800	18 12 88	mai 90
NAGBANGRE	450	800	23 11 88	mars avril 90
OUEDBILA	150	850		
LOURE/MANGA	100	900	18 12 88	fév avril 90
TIEBELE	30	1150	18 12 88	avril 90

Télédétection et résultats cartographiques associés

Zone d'étude

La zone d'étude couvre tout le Sahel. Cependant nous avons privilégié deux axes pour nos calculs de faisabilité :

- Un premier axe nord-sud au Burkina Faso qui concerne une dizaine de bassins versants de 10 à 400 km^2 sous une pluviométrie annuelle moyenne allant de 400 mm à 1200 mm (Cf. figure 2). Les données satellitaires correspondant à tous les bassins de cet axe ont été traitées, et nous présentons ici les résultats du groupe de Manga, contenant trois bassins très proches dont 2 emboîtés : les bassins de Louré, Kazanga, Binndé (Cf. Tableau 2 pour leurs caractéristiques).

- Un deuxième axe de support d'étude est en cours : il concerne 4 groupes de bassins du Sénégal au Burkina Faso, et doit nous aider à voir les limites dans le cas de variations des types de sols. Dans ce deuxième groupe, nous avons gardé les bassins de Manga, présentés ici, afin de pouvoir relier les résultats de cette série à ceux de la série précédente.

Images satellites utilisées

Dans cette approche, nous avons préféré les images Landsat TM aux images SPOT, pour les raisons suivantes :

- Le changement de résolution en passant de SPOT (20 m) à Landsat TM (30 m) ne nous a pas semblé fondamentalement gênant dans ces paysages «ouverts» sahéliens combinant plusieurs entités distinctes superposées. La détection parfaite de toutes les composantes individuelles au sol demanderait en fait une résolution compatible avec chaque arbre individualisé, ce qui n'est ni possible avec les satellites civils d'observation de la terre actuellement en service, ni peut-être souhaitable quand on s'intéresse à la caractérisation de bassins versants de dizaines voire de centaines de kilomètres carrés.

- L'apport de TM nous a paru, par contre, intéressant par la gamme plus complète de longueurs d'onde et la possibilité de décoder des informations plus nombreuses à partir d'une seule image.

- Enfin, un des critères de choix et non des moindres, est la possibilité d'avoir sur la même image, à la même date, des bassins versants contigüs ou emboîtés, et donc de pouvoir couvrir l'ensemble de la zone d'étude avec une seule et même classification d'images.

La date d'image retenue est le début de la saison sèche, car elle permet à la fois de bien caractériser les sols, élément essentiel de notre quête, et de différencier culture/non culture ce qui est aussi nécessaire pour utiliser la grille d'états de surface types. Pour les bassins versants de Manga qui vont servir d'exemples à notre démarche, l'image utilisée est la k195-j52 du 18.12.1988.

Méthodologie de terrain mise en oeuvre (figure 4)

La méthodologie de terrain s'inspire à la fois de ce que nous avons mis au point dans l'étude globale précitée, et des nécessités nouvelles imposées par la grille de connaissance des états de surface types. Dans la pratique nous avons réalisé une double mesure de terrain :

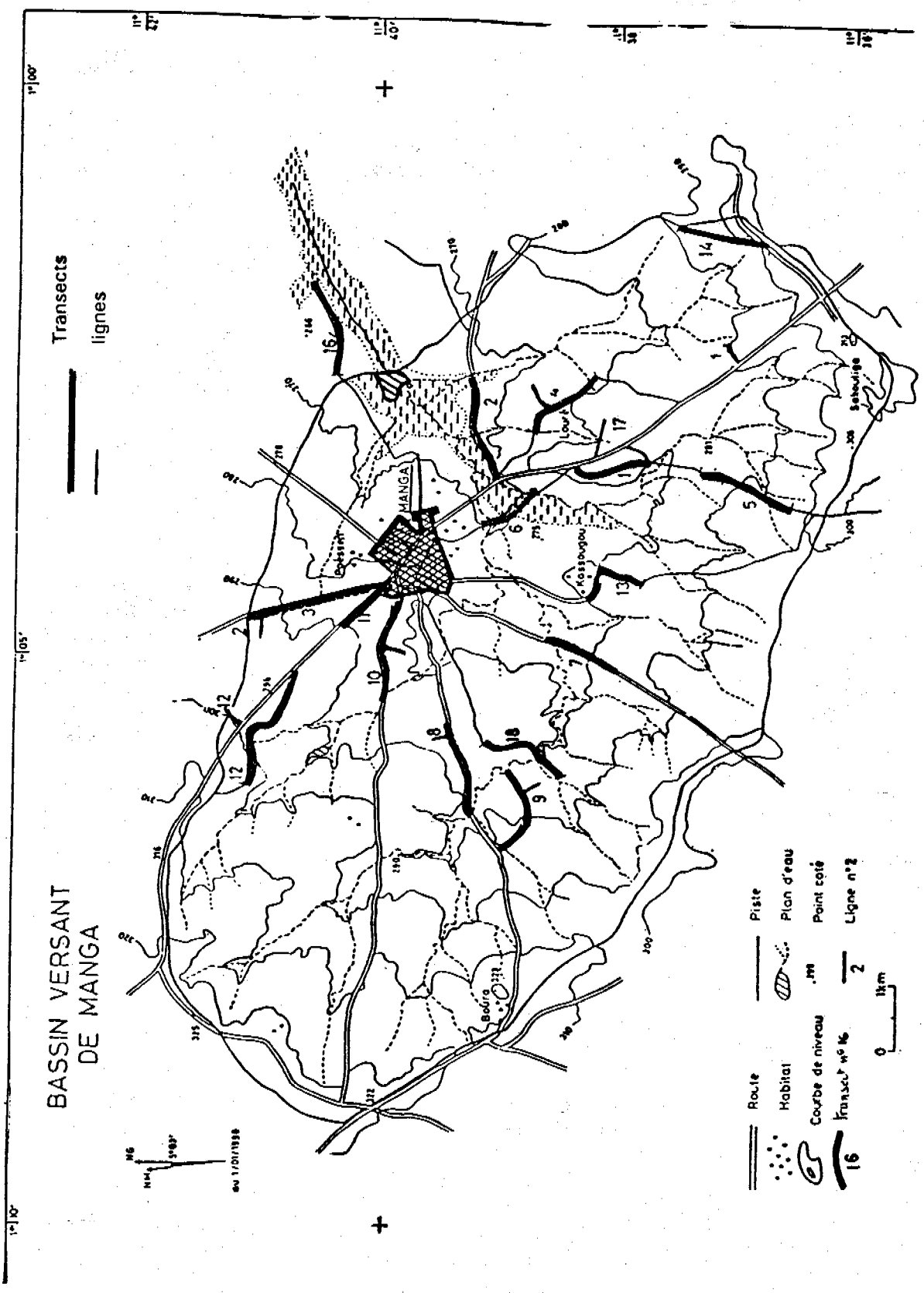
Une première série de mesures était destinée à décoder les images de télédétection en plans élémentaires physiques tels que «végétation», «sols», «occupation du sol». Etant donné les difficultés de positionnement sur le terrain, il est exclu de vouloir faire des observations de terrain avec la précision d'un pixel et nous avons dû nous résoudre à faire des mesures sur des zones homogènes ayant une taille de plusieurs pixels contigüs.

C'est pourquoi nous avons opéré par «transects» avec des blocs d'observation ayant une échelle compatible avec la taille des pixels utilisés : on a retenu des carrés de 100 x 100 m le long de parcours de 2000 m. Ont été relevés de façon aussi précise que possible les éléments de type et densité de végétation, de type, couleur et occupation du sol, chacun en pourcentage sur le carré de mesure.

Tableau 2 : *Caractères physiques et morphologiques des bassins de la région de Manga*

	Louré	Kazanga	Binndé
Superficie en km²	98,0	54,8	9,7
Périmètre en km	42,0	32,0	13,8
Indice de compacité	1,19	1,21	1,24
Rectangle équivalent			
Longueur en km	14,0	11,0	4,93
Largeur en km	7,0	5,0	1,97
Cote minimum en m	260	269	299
Cote maximum en m	330	330	330
Cote 95% de surface	316,6	319,1	324,5
Cote 5% de surface	270,1	274,5	300,5
Indice global de pente	3,32 m/km	4,09	4,87

Figure 3


BASSIN VERSANT
DE MANGA
Transects
lignes
MANGA
Bobiro
Route
Habitat
Piste
Plan d'eau
Point coté
Ligne n°2
1km

Le nombre de transects étudiés a varié de 10 à 20 selon la superficie des groupes de bassins versants étudiés (de 30 à 400 km²).

Par exemple sur le bassin versant de Louré-Manga (98 km²), 12 transects d'une longueur totale de 18.000 mètres ont été étudiés (Cf. figure 3). Ceci correspond donc à une «surface enquêtée» de 1,8 km² pour une superficie de 30 km² (soit un taux d'échantillonnage de 1,8/30 = 6%).

Une deuxième série de mesures, sur une échelle plus fine et un nombre de paramètres plus grand, a aussi été faite conjointement afin de connaître, localement, la liaison entre les paramètres visibles sur images satellitaires et ceux nécessaires à l'utilisation de la grille des états de surface types. Ces mesures ont été faites par «lignes» de 250 m de long, et l'on a associé une «ligne» à chaque «transect» défini plus haut.

Un grand problème s'est révélé lors des premières manipulations : le positionnement exact des transects dans l'image s'est révélé être très délicat par l'absence de points de repère précis dans ces zones, et l'absence de cartes topographiques adaptées, et ceci malgré l'utilisation conjointe de photographies aériennes. Dans certains cas, le positionnement du transect par l'équipe de terrain s'est révélé avoir dérivé de 1000 à 1500 m par rapport à la position exacte (insuffisance de points de repère ou déplacement de pistes entre la date de réalisation des divers documents et celle du contrôle de terrain). La solution, très satisfaisante, mise ensuite en pratique a été l'utilisation systématique d'un appareil de positionnement par satellite (GPS : Global Positioning System), qui, utilisé en relatif, a donné les positions avec une précision meilleure que 20 m, c'est-à-dire une mesure totalement compatible avec la taille du pixel satellite.

Dépouillement des images (Partie II du schéma général, figure 4)

Les classifications d'images ont été faites sur un mode dirigé, sur logiciel «multiscope» en utilisant la méthode du maximum de vraisemblance, et l'on a cherché à définir une série de classifications différentes donnant des plans physiques d'explication élémentaires.

L'apprentissage a été fait essentiellement à partir des mesures de terrain par transects, en nous basant sur la portion de relevés présentant une stabilité du critère étudié sur un ensemble d'au moins 3 carrés consécutifs (300 m). Il a été complété à partir d'éléments évidents de l'image : eau, village, cuirasses latéritiques, marigots ...

Un premier plan dit «végétation» a été élaboré sur la base de 5 classes de densité de végétation séparées par les seuils 2 %, 5 %, 15 % et 40 %. La précision géographique, par exemple sur le bassin de Louré-Manga, est de 71 %, 90 %, 31 %, 30 % et 69 % pour les 5 classes de végétation et 92 % pour l'eau.

De même a été défini le plan «occupation du sol» cherchant à séparer les zones de culture, jachère et «nature». Après regroupement de classes on arrive à une précision géographique de 71 % pour la classe culture majoritaire et 70 % pour celle de nature majoritaire.

Enfin, le plan «types de sols» a différencié les zones suivantes : affleurements rocheux et cuirasses, blocs et graviers, gravillons, sables grossiers, sables fins, limons. La précision géographique par classe varie de 54 % à 90 %.

Les confusions auxquelles on arrive sont tout à fait convenables surtout si l'on se place dans le contexte de prise d'information de cette zone. En effet les matrices de confusion dont nous venons de donner quelques résultats ci-dessus, ne sont pas adaptées à la détermination de la qualité de décodage de l'image satellite avec ce type de paysage et des parcelles d'apprentissage de cette taille.

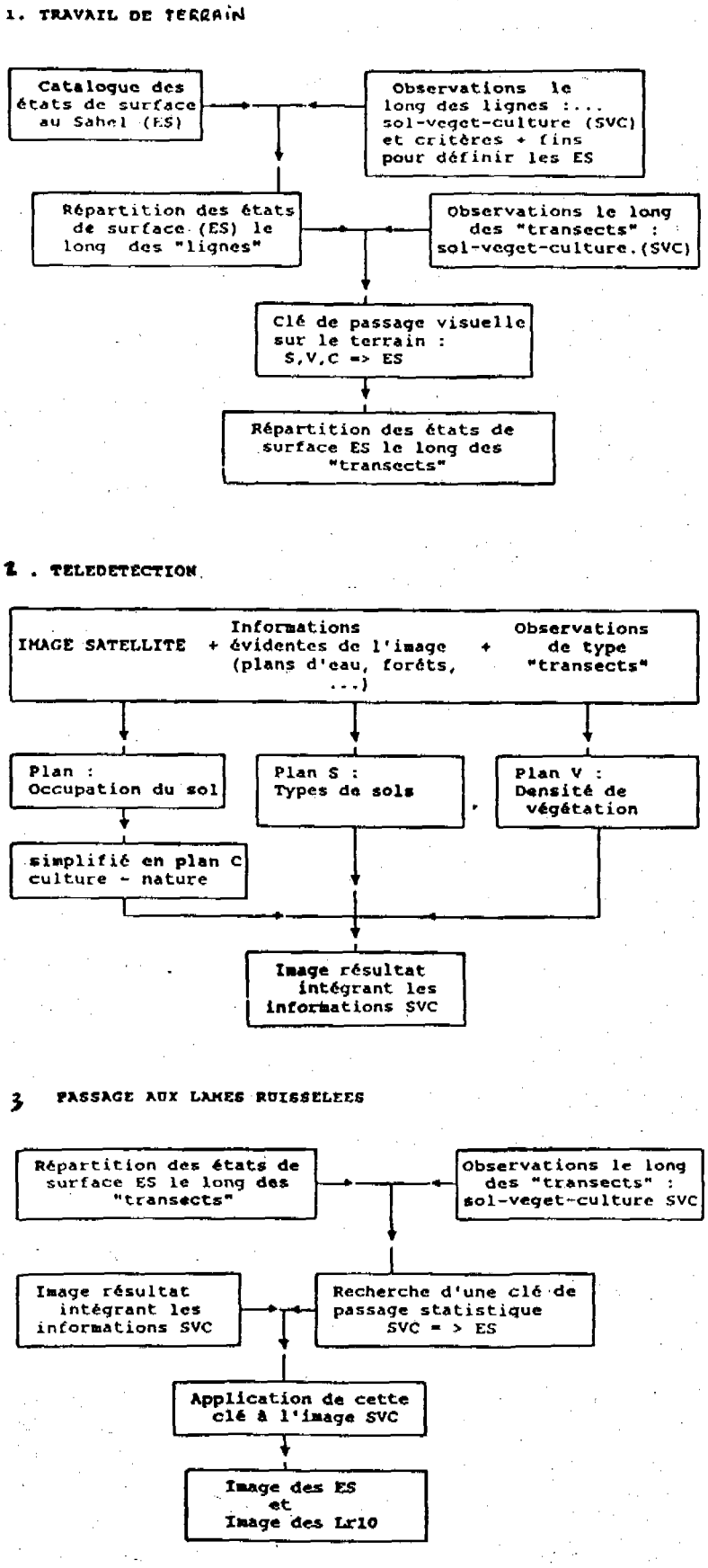
Prenons un contre-exemple simple : supposons une parcelle d'apprentissage (100 x 300 m²) à laquelle nous avons attribué une densité de végétation moyenne de classe 3 (5 % à 15 %). Dans la réalité cette parcelle peut être composée d'un mélange de pixels de classes 2, 3 et 4 dont la densité moyenne est comprise entre 5 et 15 %. La classification, au contraire, individualise chacun des pixels et les range dans la classe correspondante. Aussi, quand on comptabilise à la fin du calcul les pixels bien classés, même si le calcul est parfait, on doit observer sur la matrice de confusion une dérive de pixels vers les zones voisines : classe 3 vers classes 2 et 4 dans l'exemple ci-dessus.

C'est en fait ce que l'on a observé sur les matrices calculées et ceci nous permet de dire que la qualité de décodage de l'image est peut être bien meilleure que celle indiquée par les chiffres ci-dessus. La seule façon de trancher sera de procéder à des validations autres de ces résultats.

Obtention des cartes d'états de surface et de l'aptitude au ruissellement (Partie III du schéma général, figure 4)

Arrivés à cette étape, nous connaissons pour chaque pixel de l'image l'état de sa surface par le triplet sol/végétation/occupation du sol. Nous l'appellerons SVC, C pour le plan Culture/non culture qui est un dérivé de l'occupation du sol (Cf figure 6).

Figure 4 : *Schéma de la méthode utilisée pour décoder les images*



C'est ici que nous faisons intervenir la deuxième série de mesures de terrain, qui nous donne pour le bassin versant étudié, des statistiques sur l'apparition simultanée des critères «grossiers» (SVC) déjà cartographiés et de ceux plus fins nécessaires à l'utilisation de la grille de détermination.

Nous partons de l'hypothèse que, localement, la présence ou l'absence de micro horizons, termites et autres critères «fins» ... est associée à la description grossière des paysages. Et que si, localement, on a pu déterminer la combinaison d'états de surface types associée à tel triplet SVC, on suppose que dans toute l'image on retrouvera la même association.

Il suffit donc de trouver localement une règle statistique de passage entre les triplets SVC et les combinaisons d'états de surface. On peut, si le bassin versant est grand et la stabilité statistique non assurée, travailler en parties d'images segmentées.

Ainsi à tout triplet SVC, donc à tout pixel est associé une équation de lame ruisselée de forme :

$$Lr = a.P + b.P.Ip + c.Ip + d$$

a, b, c, d sont des coefficients fonction du triplet, donc dépendants du type d'état de surface.

Le passage à une carte des valeurs de ruissellement ne pose alors plus de problèmes puisqu'il suffit de faire l'hypothèse d'une pluie donnée et d'un indice de pluies antérieures donné pour avoir la cartographie de la production élémentaire au niveau du pixel. La figure 7 est un exemple d'un tel résultat pour les bassins de Manga, avec une pluie de 120 mm et un indice de pluies antiérieures de 20 mm.

Essai d'utilisation de cette carte dans une connaissance globale des débits sur le bassin versant

L'extrapolation de ces résultats élémentaires à une surface hétérogène plus grande, comme le bassin versant, pose de grands problèmes.

Détermination du volume de crue

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.

$Lrc = \Sigma i\ (Lri * s)/S$ (Lame ruisselée calculée)
$Krc = \Sigma i\ (Lri * s)/S/P10$ (Coefficient de ruissellement

où Lri 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 évènement.

Or, on sait bien que le ruissellement global d'un bassin n'est pas la somme des ruissellements partiels. Une dérive certaine se produit, que l'on peut appeler «effet d'échelle», ou de globalisation, et qui vient du comportement différent de parcelles juxtaposées ... ce qui fait que, théoriquement, on n'a pas le droit de faire cet amalgame.

Ce problème d'échelle est, pour l'instant, le point le plus obscur de la démarche qui atteint ici ses limites : un tel passage, de 1 m à la taille d'un petit bassin de l'ordre de 10 à 100 km², correspond à un facteur d'échelle de 10^7 à 10^8 ! Or, il est déjà évident que le comportement hydrologique d'un mètre carré est très différent de celui d'un champ ou d'un versant. Que dire alors quand on passe au bassin en entier ? De plus cette méthodologie ne tient pas compte :

- des pentes : heureusement celles-ci sont généralement faibles dans le Sahel et leur influence sur le ruissellement moins importante que celle des états de surface ;

- de la modification des infiltrations due au ruissellement provenant de l'amont du carré de mesure ;

- de la succession des perméabilités lors du cheminement des eaux : la présence d'une zone sableuse n'a pas le même effet en haut de versant et en bas de pente.

C'est pourtant la solution que l'on retrouve habituellement dans les documents de l'ORSTOM, qui contourne par l'aval la difficulté en utilisant un «coefficient de calage» : rapport entre valeurs calculées et valeurs observées, qui rattrape ou cache tous les défauts de la méthode. Ce coefficient est établi à partir de mesures hydrologiques (débits) qui sont comparées aux résultats calculés par mini-simulation de pluie étendue au bassin versant.

Ce coefficient de calage nécessaire pour raccorder cette estimation à la réalité peut s'exprimer sous forme d'une régression linéaire :

$$(Lr.observée) = A * (Lr.calculée) + B \quad (3)$$

La validité de la méthode n'est donc pas résolue puisque ce coefficient de calage est une «boîte noire» déterminée a posteriori et qui englobe tout ce que ce modèle ne sait pas encore quantifier, comme en particulier la hiérarchi-

BASSINS VERSANTS DE MANGA
BURKINA FASO

MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN



Figure 5

IMAGE DES CLASSES D'ETATS DE SURFACE

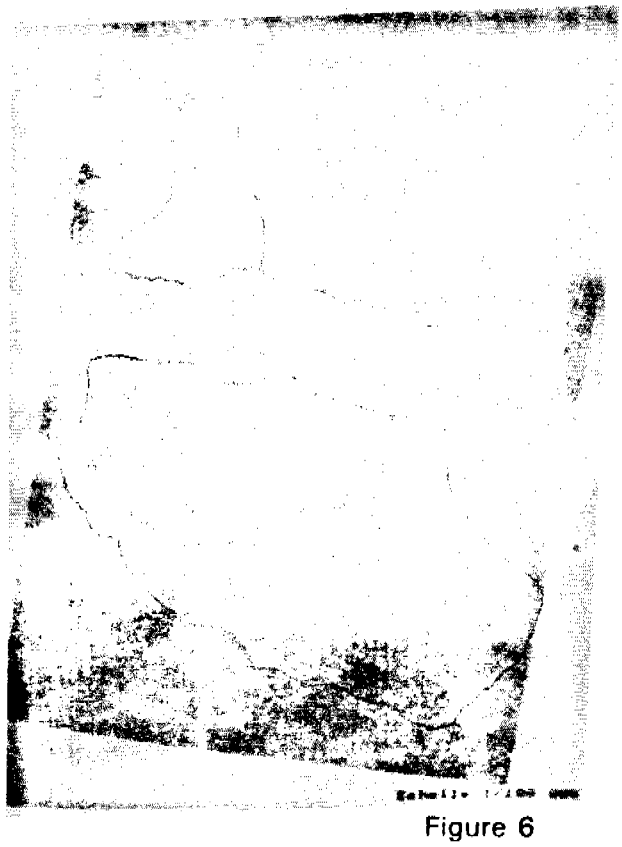


Figure 6

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



Figure 7

sation des états de surface au sein du bassin versant, les effets de pentes,... De plus, ces coefficients de calage sont non seulement variables dans l'espace (d'un bassin à l'autre), mais aussi dans le temps (d'une année à l'autre sur le même bassin).

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 1987).

Sur les 3 bassins de Manga, nous avons établi cette fonction de calage en comparant les résultats bruts de lames ruisselées données par notre détermination et les observations hydrologiques effectuées sur le terrain en 1963-65 et 1983-85 par les équipes de l'ORSTOM. On a obtenu (Cf la figure 8 qui montre le calcul effectué sur Louré) :

Tableau 3 : *Paramètres des hydrogrammes-type*

Bassin versant	Louré	Kazanga	Binndé
Durée de l'averse unitaire	1 h	20 mn	10 mn
Temps de montée	4h 15	70 mn	30 mn
Temps de réponse	3h 45	90 mn	40 mn
Temps de base	25h	6h 20	3h 40
Débit max par lame de 1mm	4,9	7,8	2,9
Coefficient de forme Qm/Qb	4,5	3,3	2,7

Tableau 4 : *Résultats de 1967 des études des crues*

	Louré	Kazanga	Binndé
Pluie journ. ponctuelle d'occurence annuelle	63	63	53 mm
Coefficient d'abattement	0,82	0,80	0,86
Pluie annuelle moyenne	52	51	54 mm
Coefficient de ruissellement annuel	31 %	29 %	25 %
Débit annuel			
Hyétogramme à un corps	115	79	38 m3/s
Hyétogramme à deux corps	86	65	29
Valeur adoptée	100	72	33 m3/s
Pluie journ. ponctuelle d'occurence décennale	100,6	100,6	100,6 mm
Coefficient d'abattement	0,78	0,80	0,84
Pluie décennale moyenne	78,5	80	84,5mm
Coefficient de ruissellement décennal	41 %	41 %	38 %
Débit décennal			
Hyétogramme à un corps	253	157	87 m3/s
Hyétogramme à deux corps	181	135	64
Valeur adoptée	217	146	76 m3/s
Lame ruisselée Décennale Lr_{10} 32,2	33.0	32.1 mm	

Tableau 5 : *Comparaison des coefficients de ruissellement pour une averse décennale obtenus par les différentes méthodes*

Bassin	Louré	Kazanga	Binndé
P_{10} prise en compte	101	101	101
P_{10} abattue	79.8	83.0	92.4
% des classes culture	55.9%	58.2%	63.2%
Lr_{10} calculée	33.8	38.9	41.0
Kr_{10} calculé			
sans vég. herbacée	42.4%	46.9%	44.4%
avec vég. herbacée	28.4%	32.4%	28.6%
Valeurs obtenues par mesures			
Kr10 par Sircoulon en 1964	50 %	53 %	43 %
Kr10 par Klein en 1967	41 %	41 %	38 %
Kr10 par Albergel en 1984		35.5%	39 %
Par la méthode Rodier-Auvray	36 %	40 %	38 %

Quelques résultats

Figure 8 : *Fonction de calage sur Louré*
intervalle de confiance à 95 %

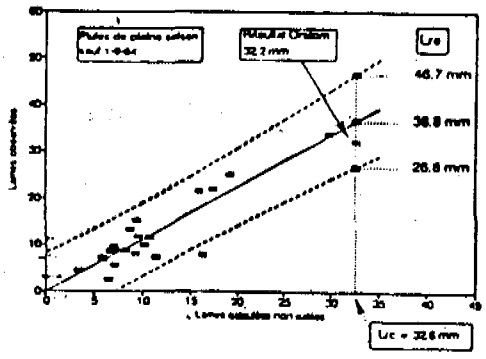


Figure 9 : *Evaluation du débit de crue décennale*
Bassins de Manga

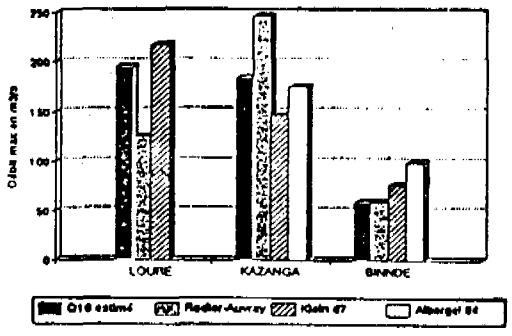


Figure 10 : *Comparaison des coefficients de ruissellement décennal*
Bassins de Manga

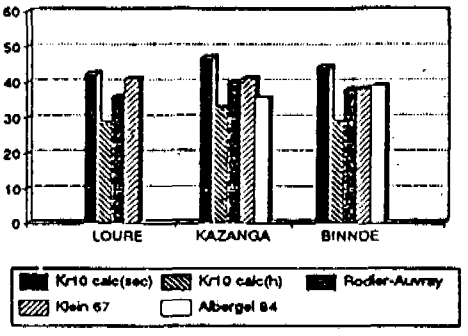


Figure 11 : *Crue annuelle estimée sur Binnde à partir du hyétogramme décennal-type*

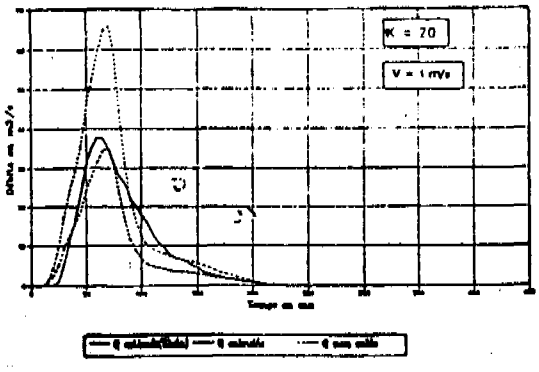
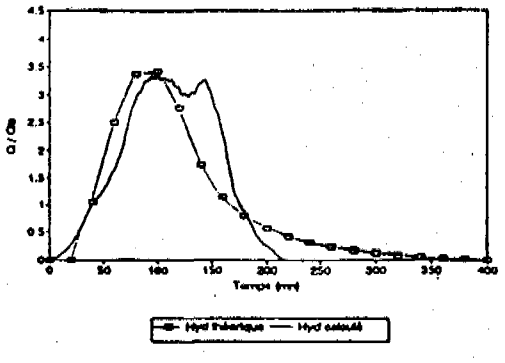


Figure 12 : *hydrogramme unitaire reconstitué*
Bassin de Kazanga



Bassin de Louré :

$$LrO = 0.90\,Lrc + 1.5 \quad r = 0.81 \quad n = 23$$

Bassin de Kazanga :

$$LrO = 0.53\,Lrc + 0.2 \quad r = 0.64 \quad n = 72$$

Bassin de Binndé :

$$LrO = 0.53\,Lrc - 0.56 \quad r = 0.86 \quad n = 106$$

Appliquant ces résultats à l'averse décennale, il est alors possible de trouver les valeurs de ruissellement décennales de chaque bassin, ce que l'on a synthétisé dans le tableau 5 et la figure 10 ci-avant où l'on peut comparer les résultats (Kr10) calculés à ceux obtenus par l'ORSTOM sur le terrain (Kr10 par Sircoulon, Klein, Albergel).

Détermination de l'hydrogramme de crue

Pour passer du volume de crue au débit maximal de la 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, effectuée surtout dans le souci de montrer qu'à partir d'une connaissance pixel à pixel des facteurs de ruissellements et d'une fonction de transfert déterminée elle aussi pixel à pixel, il était possible d'aller jusqu'au bout du calcul. Et que, grâce aux outils spatialisés que nous offrent la télédétection et les modèles numériques de terrain, il était possible de construire une chaîne entièrement automatisée pour déterminer le débit de crue du bassin.

La modélisation présentée part des hypothèses déjà énoncées pour la partie volume de crue, à savoir que la lame ruisselée calculée sur chaque pixel à l'étape précédente est un bon index de la partie du ruissellement qui va effectivement arriver jusqu'à l'exutoire. Elle utilise aussi de nouvelles hypothèses basées sur l'utilisation d'un modèle numérique de terrain pour la détermination de la fonction de transfert associée à chaque pixel.

A partir du modèle numérique de terrain (MNT, figure 5), on peut en effet calculer pour chaque pixel la distance qui le relie à l'exutoire compte tenu du cheminement hydraulique le long des pentes. Si l'on suppose, en première approximation, que la vitesse de propagation des eaux est constante dans tout le bassin dès que l'eau est arrivée dans des chenaux de drainage, il est possible de déterminer le temps mis par une goutte d'eau pour aller d'un point quelconque à l'exutoire.

Nous pouvons résumer les hypothèses utilisées de la façon suivante :

1. La pluie est homogène dans le temps et dans l'espace pendant l'épisode pluvieux étudié (cette hypothèse n'est pas impérative mais si on l'utilise, cela limite l'emploi du modèle à des bassins de taille inférieure à 120 km^2).

2. Tout le débit provient du ruissellement.

3. La connaissance des paramètres d'écoulement est possible par télédétection.

4. Les équations de lame ruisselée du catalogue des états de surface sont extrapolables au bassin en entier : c'est un des plus gros problèmes posés par cette méthode. On a vu qu'un coefficient de calage global était nécessaire.

5. Les pentes ne sont pas prises en considération pour la fonction de production : ceci vient directement des résultats du simulateur de pluie qui n'en tient pas compte. Au Sahel les pentes sont très faibles et leur influence peut souvent être supposée peu importante et homogène d'un bassin à l'autre.

6. Les vitesses d'écoulement entre chaque point et l'exutoire sont supposées constantes, et le temps de transfert ne dépend que de la distance de drainage, calculée automatiquement à partir du modèle numérique de terrain. Le ruissellement se transporte à l'exutoire avec un simple décalage en temps : c'est le mode de transfert de type hydrogramme unitaire.

A partir de ces hypothèses un modèle de propagation a été écrit en langage Turbo.C sur micro-ordinateur et appliqué aux bassins versants étudiés. Nous donnons quelques résultats obtenus pour les bassins de Manga (Cf. figures 9, 11 et 12).

La comparaison entre les hydrogrammes de crues estimés à l'aide de notre méthodologie et ceux observés ou estimés de façon traditionnelle, donnent une grande cohérence globale des observations et des estimations. Les résultats que l'on observe pour les 3 bassins étudiés sont tout à fait acceptables et donc encourageants.

Suite de l'étude, validations

Notre souci pour la suite de cette recherche porte surtout sur la validation précise de chaque niveau de la démarche, en tenant compte de variations régionales possibles, les points essentiels étant :

La validation du traitement des images, ce que l'on peut approcher en comparant la carte des états de surface obtenue par rapport à celle définie sur le terrain.

La validation du calcul des lames ruisselées à savoir la comparaison cartographique des lames ruisselées élémentaires calculées par rapport à celles qui ont été obtenues in situ par des mesures de l'ORSTOM, et ceci dans des conditions régionales diversifiées.

La connaissance des conditions d'écoulement à la parcelle et sur un versant élémentaire. Il sera intéressant, au niveau de la parcelle, de préciser les conditions d'écoulement, de façon à pouvoir mieux simuler la composition des ruissellements élémentaires. Il manque en effet beaucoup d'informations sur le passage d'échelle du m^2 au versant puis du versant au bassin : les mesures existantes au niveau du versant élémentaires sont quasi inexistantes. Parallèlement au niveau global du bassin il est intéressant de connaître la stabilité temporelle et spatiale de la fonction de calage pour pouvoir éventuellement l'exporter sur des bassins non jaugés. Sa détermination nécessite, dans l'état actuel des choses, une campagne de mesures, mais en première approche, il est possible qu'elle puisse être considérée comme stable pour une région où climat, sol, végétation et relief sont homogènes.

Utilisation des images à basse résolution spatiale. Les calculs précédents à partir des images haute résolution nous permettent d'estimer les états de surface du bassin versant, états supposés stables dans le temps et décrits sans ambiguïté. Or, ne serait-ce qu'au cours de la saison des pluies, les états de surface du Sahel sont éminemment changeants. Il apparaît donc utile de pouvoir différencier à l'intérieur même de l'année ces variations d'états de façon à les inclure dans les calculs du ruissellement. Et une des meilleures façons d'estimer ces fluctuations passe par l'utilisation des images basse résolution (1 km) mais à forte répétitivité (1 jour) du satellite NOAA.

CONCLUSIONS

L'objectif était avant tout de définir, en la testant, une méthode aussi fiable que possible de caractérisation hydrologique des bassins versants du Sahel pour ce qui concerne leur aptitude au ruissellement, cette méthode devant combiner la connaissance au sol des états de surface type ORSTOM et l'utilisation de la télédétection satellitaire.

Si des démarches voisines ont déjà été mises en oeuvre pour le bassin du Baongo à Titao (LCT) et pour la mare d'Oursi (ORSTOM), la méthode appliquée dans cette étude en diffère sensiblement. Un des premiers problèmes a été de combiner les deux méthodologies : on s'est arrêté sur le choix de l'utilisation du catalogue des états de surface de l'ORSTOM, à coupler avec les techniques de télédétection du LCT.

Au niveau décodage des images de télédétection, l'étude montre qu'on s'approche plus finement de la réalité des états de surface par une superposition de plans descripteurs pertinents, qu'en s'appuyant sur un seul critère intégrant les états de surface.

Le couplage télédétection-hydrologie demande encore à être affiné, mais semble donner finalement des résultats cartographiques intéressants. Il faudrait toutefois les comparer à des résultats obtenus par d'autres approches pour en déduire la validité : contrôle de la validité du catalogue des états de surface par simulation de pluie directe et contrôle des estimations de lames ruisselées grâce à des mesures hydrologiques.

Un des problèmes majeurs se rencontre au moment de l'utilisation des résultats de lames ruisselées qui ne sont théoriquement valables que pour une surface de 1 m isolée du contexte. Nous avons ébauché ici les quelques possibilités d'utilisation de ces cartographies sans toutefois pouvoir les valider sur des données hydrologiques conséquentes : débit à l'exutoire, modélisation sommaire des écoulements.

REMERCIEMENTS

Les recherches présentées dans cet article ont été menées à l'occasion d'études pour des projets de développement soutenus par diverses institutions de financement. Parmi elles, nous tenons à remercier particulièrement le Ministère français de la Coopération et du Développement qui a pris en charge l'étude de Titao (Burkina Faso) dans le cadre de l'opération d'appui-formation à l'Association Française des Volontaires du Progrès, et le Programme des Nations Unis pour le Développement qui a financé «l'Etude hydrologique avec traitement d'images satellitaires de neuf bassins versants de petits barrages au Burkina Faso», étude supervisée par le Département de la Coopération Technique pour le Développement (Projet BKF/88/002) et confiée au groupement CIEH/LCT/ORSTOM/ BUNASOLS au bénéfice du Ministère de l'Eau du Burkina Faso.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Albergel J. (1987). Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso ; du m^2 au km^2. Etude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. 341 p. ORSTOM. Etudes et thèses.

Casenave A.- Valentin C. (1989). Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. ORSTOM.

CIEH/LCT/ORSTOM/BUNASOL (1992). Etude hydrologique avec traitement d'images satellitaires de neuf bassins versants de petits barrages au Burkina Faso (3 tomes). Rapport préparé à la demande du projet PNUD/DCTD/BKF/88/002 pour le Ministère de l'Eau du Burkina Faso.

Puech C. (1990). «Apport de la télédétection à l'aménagement des bassins versants par petits ouvrages en Afrique Soudano-Sahélienne». C. PUECH. Communication aux Journées Techniques AUPELF-UREF. Ouagadougou Mars 1990. 18 p. (Publié dans le Bulletin de Liaison du CIEH N°81, Juillet 1990).

Puech C. - Chabi Gonni D. (1983). Méthode de calcul des débits de crues décennales pour les petits et moyens bassins versants en Afrique de l'Ouest et Centrale. CIEH.

Rodier J. - Auvray (1965). Estimation des débits de crues décennales pour les bassins versants de superficie inférieure à 200 km^2 en Afrique Occidentale. ORSTOM CIEH.

Rodier J. (1975). Evaluation de l'écoulement annuel dans le Sahel Tropical Africain. Travaux et documents de l'ORSTOM N° 46. 121 p. Paris.

Rodier J. (1976). Evaluation de l'écoulement annuel dans les régions tropicales sèches d'Afrique Occidentale. Cahiers ORSTOM série Hydrologie vol XIII N° 4 1976. pp. 269-306.