

Cartographie des états de surface par télédétection et prédétermination des crues des petits bassins versants en zones sahélienne et tropicale sèche

J. M. LAMACHERE

*Laboratoire d'Hydrologie, Centre Orstom, 911 avenue Agropolis,
F-34032 Montpellier Cedex 1, France*

C. PUECH

*Laboratoire Commun de Télédétection, Cemagref-Engref, 500 rue J. F. Breton,
F-34093 Montpellier Cedex 05, France*

Résumé L'utilisation de la télédétection pour la cartographie des états de surface (sols, végétation, cultures et organisation superficielle du sol), permet d'envisager l'emploi, sur les petits bassins versants non jaugés, des relations proposées par Jean Rodier en 1992 dans l'ouvrage intitulé: « Du simulateur de pluie aux bassins représentatifs sahéliens ». Ces relations associent, pour de fortes pluies journalières (50 et 70 mm), les potentiels de ruissellement, calculés sur un échantillon de petits bassins versants sahéliens (1-20 km²) et les lames ruisselées observées aux exutoires. Dans une longue partie méthodologique, nous traitons en premier lieu de la cartographie des états de surface par télédétection en Afrique sahélienne et tropicale sèche, puis de l'agrégation des lames ruisselées élémentaires à l'échelle des unités cartographiques et des bassins versants. L'article se termine par une application de cette méthodologie à la prédétermination des crues de fréquence décennale. Les relations établies par Rodier permettent en effet de déterminer la classe d'infiltrabilité qui constitue un important paramètre d'entrée de la méthode Orstom (Rodier & Auvray, 1965) pour la prédétermination des crues de fréquence décennale (FAO, à paraître). Elles permettent également de calculer directement les lames ruisselées en utilisant un coefficient de calage qui intègre, pour de fortes averses, les phénomènes de transfert à l'échelle des bassins versants. La validité de cette démarche a été testée sur quelques bassins versants situés dans les régions sahélienne et tropicale sèche.

Mapping surface features with remote sensing to predict the 10-year runoff in small basins in the Sahel and dry tropical zones

Abstract In 1992, Jean Rodier published: « The rainfall simulator and representative basins in the Sahel ». This paper presents the main relationships between the runoff potential, calculated for heavy daily rainfalls (50 and 70 mm) for small sahelian basins (1-20 km²), and the surface runoff depths observed at the outlets. The runoff potential is the weighted sum of the elementary surface runoff depths calculated from the relations given in the catalogue of basic surfaces in the sahelian zone

(Casenave & Valentin, 1989). First we develop in detail the use of remote sensing to map the surface states (soil, vegetation, land use and the superficial structure of the soils). This makes it possible to employ Rodier's relationships for small basins on the same satellite picture coupled with ground observations for a single reference basin. Then we present how we define the loss functions on the map units and the basins. Finally we apply this methodology to determine the 10-year runoff from small basins in the dry areas of west Africa. With runoff potential as input, the Rodier's tables allow the determination of indices of permeability (PI , I , RI , P , TP) and/or the fitting of coefficients according to the area and permeability of the basin. The indices of permeability are significant input parameters for the Orstom method (Rodier & Auvray, 1965) used in predicting the 10-year outflows (FAO, in press). The adjustment coefficients include the transfer of runoff from upstream to the outlet in order to compute the surface runoff depths. We have tested this method on several small basins in sahelian and dry tropical zones.

INTRODUCTION

En zone sahéenne, l'amélioration de l'estimation des ruissellements à l'échelle des petits bassins versants viendra d'une meilleure connaissance des aptitudes des sols au ruissellement (Rodier *et al.*, 1984). 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 & 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, nous exposerons brièvement l'utilisation de ces nouveaux outils en zone tropicale sèche avec:

- (a) la description au sol des états de surface;
- (b) l'utilisation de la télédétection pour la cartographie de la végétation, des sols et des cultures (décodage primaire des images);
- (c) la cartographie des états de surface par utilisation d'un SIG (décodage secondaire des images satellites); et
- (d) la modélisation des lames ruisselées par agrégation des relations hydropluviométriques élémentaires à l'échelle des unités hydrologiques et des bassins versants.

Nous développerons ensuite une application de ces nouveaux outils à la prédétermination des lames ruisselées de fréquence décennale sur les petits bassins versants des régions sahélienne et tropicale sèche. Cette application comprendra:

- (e) la détermination de la classe d'infiltrabilité de la méthode Orstom (FAO, à paraître);
et
- (f) la détermination de la lame ruisselée décennale.

UTILISATION DE LA TELEDETECTION EN HYDROLOGIE A L'ECHELLE DES PETITS BASSINS VERSANTS

La télédétection

La télédétection satellitaire haute résolution propose actuellement des images au pas d'espace de 20 m (Spot XS) ou 30 m (Landsat TM). Chaque élément de l'image (pixel) est connu par sa radiométrie, respectivement selon 3-7 bandes spectrales. Dans le cas des images prises dans le spectre visible, la détection est limitée aux couches de surface en l'absence de nuages. L'accès aux couches pédologiques ou géologiques ne peut se faire que par corrélation avec des éléments révélateurs, en surface, de la nature du sol ou du sous-sol.

A l'échelle des petits bassins versants, les informations potentiellement utilisables en hydrologie concernent la connaissance spatiale à une date donnée de l'occupation du sol et de la végétation et la connaissance temporelle de leur évolution au travers d'images multidates (Engman & Gurney, 1991). Le traitement des images consiste à définir: soit des classes radiométriquement homogènes, auxquelles sont rattachées chaque pixel individuellement; soit des unités cartographiques formées d'agrégats de pixels hétérogènes organisés en ensembles structurés. La définition de ces ensembles structurés est pour l'instant une opération visuelle de photo-interprétation. Cette opération doit révéler des objets thématiques que l'on cherche à mettre en évidence. Le traitement des images est donc *a priori* spécifique de la thématique étudiée.

Hydrologie et télédétection

Pour les petits bassins versants, la détermination des caractéristiques hydrologiques est, jusqu'à présent, surtout globale. L'utilisation de données nouvelles, produites par télédétection, ouvre des possibilités multiples soit par l'utilisation des modèles globaux existants, par exemple le modèle S'WRRB (Arnold *et al.*, 1989) et la méthode du Service de Conservation des Sols (USDA, 1985), en améliorant la connaissance des paramètres d'entrée des modèles, soit par l'utilisation de nouveaux modèles conçus pour le traitement d'informations spatialisées, par exemple le modèle Modlac (Girard, 1982) et le modèle r.water.fea (Vieux & Gauer, 1994).

Un contexte favorable au Sahel ...

Pour l'estimation des ruissellements, le Sahel peut être considéré comme une zone favorable à l'utilisation de la télédétection. On y note en effet:

- (a) Un contexte géographique et climatique favorable:
 - (i) peu de relief, entraînant à la fois une grande homogénéité climatique et peu de déformations géométriques des images;
 - (ii) peu de nuages; ce qui est important pour une bonne visibilité sur de longues périodes; et
 - (iii) une végétation dispersée et peu abondante, limitant l'extension des feux de brousse et permettant, en saison sèche, d'observer la nature des sols.
- (b) Un contexte cartographique peu précis:
 - (i) peu de cartes à grande échelle (faible couverture au 1/50 000), ce qui justifie l'achat d'images à haute résolution; et
 - (ii) une couverture aérienne rarement renouvelée, ce qui justifie l'achat d'images satellites récentes.
- (c) Un contexte hydrologique particulier:
 - (i) des pluies violentes et de courte durée qui conduisent à la formation de sols encroûtés; et
 - (ii) un fort ruissellement de surface. « Au Sahel, le ruissellement de surface est prépondérant » a écrit Jean Rodier (1992).

Dans le contexte sahélien et, par extension, dans le domaine tropical sec, le lien entre télédétection et hydrologie va se faire selon le constat que les états de surface sont primordiaux pour la connaissance des ruissellements. Dans ces deux zones géographiques, toute méthodologie efficace de prédétermination des crues utilisant la télédétection passera donc par une cartographie des états de surface.

Des limites liées à la complexité des paysage

Dans les zones sahéliennes, le paysage est un amalgame complexe d'entités dont la taille, la densité et la répartition varient de façon continue ou discontinue sur de faibles distances: rares sont les endroits où des limites précises, d'ensembles homogènes, sont observées. On y rencontre le plus souvent des zones naturelles composées de savanes arbustives ou arborées, à faible densité de recouvrement végétal, et des zones cultivées, où cette densité de recouvrement est très faible. Les zones totalement homogènes sur les images satellites (plans d'eau, dunes vives, forêts, brûlis) y sont exceptionnelles.

La description au sol des classes radiométriquement homogènes, issues d'un traitement numérique des images, ou celle des unités cartographiques, résultant d'une photo-interprétation, doivent tenir compte de cette grande variabilité spatiale de la végétation et de ses conséquences sur l'organisation superficielle des sols. L'observation des états de surface doit donc comprendre une description de ses différentes composantes: strates arborée, arbustive et herbacée, types de sol, d'organisation superficielle et d'occupation du sol.

Choix méthodologiques

Pour transformer une description de la surface du sol en lame ruisselée, plusieurs démarches sont possibles. Elles sont basées sur le choix préalable de l'échelle de modélisation hydrologique, en relation avec les possibilités de transformation de l'information

spatiale en information de ruissellement. Nos choix méthodologiques sont les suivants:

- (a) utilisation des relations hydro-pluviométriques du catalogue des états de surface (échelle 1 m²) comme fonctions de production;
- (b) cartographie des états de surface par télédétection et utilisation d'un SIG; et
- (c) agrégation des lames ruisselées élémentaires par sommation à l'échelle des unités cartographiques (classes d'états de surface) et des bassins versants; utilisation d'une fonction de calage pour reconstituer les lames ruisselées à l'exutoire.

DESCRIPTION ET CARTOGRAPHIE DES ETATS DE SURFACE

Nous avons choisi comme système de référence la typologie des surfaces-types élémentaires établie par Casenave & Valentin (1989). Pour la description des états de surface, nous avons utilisé une méthode mise au point par Lamachère, et pour leur cartographie, une méthode mise au point par Puech (Lamachère & Puech, 1995).

Description au sol des états de surface

Pour les bassins versants de taille supérieure à 10 km², les observations au sol sont effectuées par blocs contigus de 100 × 100 m, sur une section longue de 2-3 km où sont réalisées deux types d'observations:

- (a) **les observations primaires** (nature et densité de la végétation, type et couleur des sols, occupation du sol) qui servent au décodage des images satellitaires en plans élémentaires (végétation, sols, occupation du sol); et
- (b) **les observations secondaires** (pourcentage des surfaces-types élémentaires dans chaque bloc) qui servent à déterminer la composition statistique en surfaces-types élémentaires des unités cartographiques.

On étudie de 10 à 20 sections de 2000-3000 m par bassin versant, soit un taux de sondage de 10-1% pour des bassins versants de 20-400 km². Le positionnement des observations sur le terrain est facilité par l'emploi du GPS (Global Positioning System), appareil de positionnement par satellite. Pour des bassins versants de superficie inférieure à 10 km², les observations au sol sont effectuées sur des bandes rectilignes longues de 300-500 m, larges de 20 m, qui procurent un taux de sondage équivalent et une meilleure précision dans la description des états de surface.

Cartographie des états de surface

Décodage primaire des images satellites Les classifications numériques des images satellites sont faites sur un mode dirigé en utilisant les classifications usuelles en traitement d'image (par exemple la méthode du maximum de vraisemblance), selon trois classifications thématiques qui définissent:

- (a) un premier plan « végétation » élaboré sur la base des classes de densité du couvert végétal;
- (b) un plan « occupation du sol » séparant les zones cultivées des zones non cultivées; et

(c) un plan « sols » différenciant les sols par la taille des éléments en surface: cuirasses, blocs, graviers, gravillons, sables grossiers, sables fins, limons et argiles.

Pour la cartographie des sols, les essais effectués sur les bassins de Manga et d'Oursi au Burkina Faso, de Thyssé Kaymor au Sénégal, où la végétation naturelle couvre peu la surface du sol, se sont révélés d'assez bonne qualité. Par contre, sur les bassins versants de la région de N'Dorola au Burkina Faso, l'importance du couvert végétal ne permet pas de distinguer les différents types de sols et il faut faire intervenir le relief pour opérer cette différenciation. A titre d'exemple, nous présentons dans le Tableau 1 une matrice de confusion entre classes radiométriques et types de sols. Cette matrice montre une excellente identification des classes 1, 2, 3, 4 et 8, une assez bonne identification des unités 6, 7 et 10 mais une définition difficile pour les unités 9 et 11, très difficile pour l'unité 5 qui se confond avec les unités 7 et 8.

Décodage secondaire des images satellites Cette étape vise à caractériser la composition des classes radiométriques, résultant du traitement numérique des images, en surfaces-types élémentaires caractérisant le fonctionnement hydrologique superficiel des sols.

Pour chaque pixel de l'image satellite, ou pour chaque unité cartographique définie par le traitement de l'image, le passage des trois variables primaires (sol, végétation, occupation du sol) à la composition en surfaces types élémentaires se fait par utilisation d'une liaison statistique établie à partir des observations de terrain. Ce faisant, nous partons de l'hypothèse que les critères secondaires (composition en surfaces-types

Tableau 1 Matrice de confusion entre classes radiométriques et types de sols sur le bassin versant de Manga (Burkina Faso, zone tropicale sèche).

Classes de sols	Classes radiométriques et pourcentages de pixels bien classés											Effectif
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Brûlis	97,9	0,1	0,4	0,0	0,1	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	703
Eau	0,5	98,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	382
Cult. irri.	0,0	0,0	86,3	0,4	0,4	8,4	0,0	0,0	0,0	1,3	0,0	227
Forêt	0,0	0,0	0,0	92,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	6,0	2,0	50
Grossiers	0,0	0,0	0,7	0,7	16,1	10,9	36,5	22,6	2,9	6,6	2,0	137
L	0,0	0,0	6,1	0,0	2,4	77,4	3,0	2,4	1,2	6,7	0,6	164
SL	0,0	0,0	0,9	0,9	2,4	1,3	67,7	7,5	5,1	5,4	8,6	467
SLG	0,0	0,0	0,0	0,0	1,6	3,3	4,8	87,1	0,0	1,6	1,6	62
BLG	0,0	0,0	0,0	0,0	5,7	1,5	16,8	1,4	53,9	16,5	4,2	73
GL	0,0	0,0	6,7	0,0	4,4	4,4	8,9	1,5	6,7	62,2	5,2	135
Sableux	0,0	0,0	0,3	0,5	1,2	2,3	26,4	3,5	1,5	8,9	55,4	202

Cult. irri.: cultures irriguées; Grossiers: sols graveleux ou gravillonnaires; L: sols limono-argileux; SL: sols sablo-limono-argileux; SLG: sols sablo-limoneux graveleux; BLG: blocs de cuirasse, sols limono-argileux graveleux; GL: sols limono-argileux graveleux.

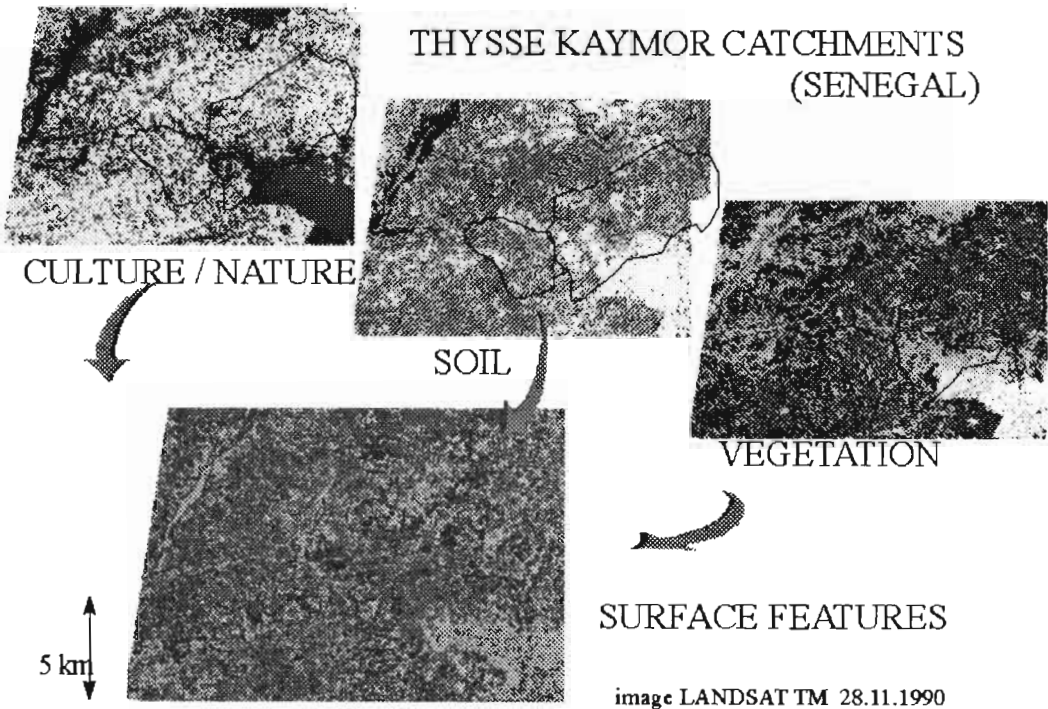


Fig. 1 Association des trois plans végétation, sols et cultures pour la cartographie des états de surface de la région de Thyssé Kaymor (Sénégal).

élémentaires) sont corrélés de manière stable aux critères primaires dans le contexte du bassin versant étudié. Cette hypothèse forte doit être validée. Au cas où elle ne le serait pas, un autre critère suffisamment discriminant, par exemple le relief, devra être ajouté.

La Fig. 1 schématise l'association par un SIG des trois plans « végétation », « sols » et « cultures » pour la cartographie des états de surface de la région de Thyssé Kaymor au Sénégal.

LA MODELISATION HYDROLOGIQUE SPATIALISEE

Les méthodes proposées ci-dessous ne concernent que l'estimation des volumes ruisselés (crues). En Afrique intertropicale, ceux-ci constituent pour les petits bassins versants:

- (a) plus de 90% de l'écoulement sous une pluviométrie annuelle inférieure à 600 mm;
- (b) 70-80% de l'écoulement sous une pluviométrie annuelle de 900 mm; et
- (c) 50-60% de l'écoulement sous une pluviométrie annuelle de 1200 mm.

Le calcul des apports repose donc, en zone sahélienne, presque exclusivement sur la simulation des crues générées par le ruissellement. Par contre, en zone plus humide, le calcul des apports repose aussi sur une connaissance, même sommaire, des fluctuations du débit de base.

La cartographie des états de surface d'un bassin versant est la première étape d'une modélisation spatialisée des ruissellements. La seconde étape consiste à tenir compte de

la variabilité spatiale et temporelle des pluies. La troisième étape comprend l'intégration de l'évolution saisonnière des états de surface, tels que le développement de la végétation, les travaux culturaux ou l'engorgement des sols. En l'absence d'informations spatialisées sur l'évolution de ces phénomènes, la modélisation hydrologique ne peut être qu'imparfaite. La méconnaissance des pertes par transfert le long des versants et dans le réseau hydrographique constitue par ailleurs d'autres sources importantes d'incertitude.

Détermination des fonctions de production à l'échelle élémentaire

Les types de surfaces élémentaires ayant été soigneusement répertoriés et décrits au cours des observations au sol, ils peuvent être identifiés dans le catalogue des états de surface de la zone sahélienne. Ce catalogue permet d'associer à chaque type de surface élémentaire i et à chaque pluviomètre n une relation hydrodynamique du type:

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

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 , b , c et d sont les paramètres hydrodynamiques caractéristiques de la surface élémentaire i , de son sol, de sa couverture végétale et de son organisation superficielle; et IK_n est l'indice des précipitations antérieures correspondant à un indice d'humectation défini par la relation:

$$IK_{n,j} = (IK_{n,j-1} + P_{n,j-1}) e^{-\alpha T} \quad (2)$$

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.

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 II , autre valeur caractéristique de la surface élémentaire, qui varie avec le degré d'humectation du sol (Fig. 2).

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

Agrégation à l'échelle des unités cartographiques

La formulation mathématique du potentiel de ruissellement de l'unité cartographique u est la suivante:

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

où: PR_u est le potentiel de ruissellement de l'unité hydrologique u ; $Lr_{n,i,u}$ est la lame ruisselée de la surface élémentaire i attachée au pluviomètre n sur l'unité cartographique u ; et $\alpha_{n,i,u}$ est le coefficient de pondération de la surface élémentaire i attachée au pluviomètre n sur l'unité cartographique u .

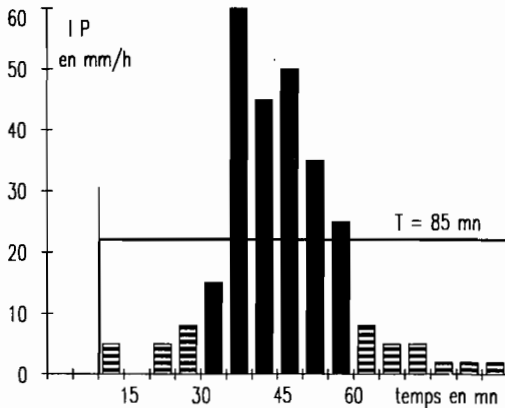


Fig. 2 Détermination de la pluie utile sur un hyétoграмme.

Pendant une durée variable au cours de la saison des pluies (une semaine à quelques mois) on peut associer à chaque unité cartographique (classe d'états de surface), une liste de surfaces élémentaires avec leurs coefficients de pondération correspondant à la composition de chaque classe en surfaces-types élémentaires. La composition d'une même classe d'états de surface est en effet susceptible d'évoluer au cours de la saison des pluies; cela revient à modifier la liste des surfaces-types élémentaires et leurs coefficients de pondération en fonction du développement de la végétation et du calendrier cultural (Lamachère, à paraître).

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. On opère ici un changement d'échelle du comportement hydrologique puisqu'on passe d'une référence implicite de 1 m^2 (taille de la mesure en simulation de pluies) au comportement hydrologique d'une surface beaucoup plus grande, celle d'un versant ou d'une partie de versant. La lame ruisselée à la nouvelle échelle n'est pas la somme des lames ruisselées élémentaires. La plupart du temps elle lui sera inférieure.

Agrégation à l'échelle des bassins versants

A l'échelle des bassins versants, l'agrégation des ruissellements peut être réalisée soit par simple sommation pondérée des potentiels de ruissellement des unités cartographiques composant le bassin versant, soit par utilisation d'une fonction de transfert permettant de décaler dans le temps l'arrivée des ruissellements à l'exutoire du bassin. Nous ne traiterons ici que de la simple sommation et de l'utilisation d'une fonction de calage.

La cartographie des états de surface d'un bassin versant permet de connaître, au terme de la procédure de traitement des images, les superficies occupées, sur ce bassin,

par les différentes unités cartographiques. A chaque unité cartographique on peut associer un coefficient de pondération (β_u) correspondant à la surface qu'il occupe sur le bassin versant. La somme pondérée des potentiels de ruissellement (PR_u) de toutes les unités fournit une estimation du potentiel de ruissellement global à l'échelle du bassin versant (PR_g), soit:

$$PR_g = \sum_u (\beta_u * PR_u) \quad (5)$$

La lame ruisselée réelle (LR) est ensuite obtenue par l'utilisation d'une fonction de calage de laquelle on extrait le coefficient de calage (CC) et l'ordonnée à l'origine (B), qui varient au cours de la saison des pluies puisqu'ils représentent les pertes par transfert le long des versants et dans le réseau hydrographique.

$$LR = CC * PR_g + B \quad (6)$$

Les valeurs du coefficient de calage et de l'ordonnée à l'origine sont obtenues par analyse des relations entre les valeurs du potentiel de ruissellement et les lames ruisselées observées à l'exutoire du bassin versant, ces relations étant supposées linéaires.

Application à la détermination des crues

Prédétermination des crues de fréquence décennale La principale difficulté et la principale source d'erreurs dans l'utilisation des méthodes Orstom et CIEH, pour la prédétermination des crues de fréquence décennale (FAO, à paraître), consiste à déterminer le coefficient de ruissellement de même fréquence. Il paraît donc judicieux de se servir à cet effet des nouvelles technologies. Dans ce but, Jean Rodier a proposé (1992) de définir les classes d'infiltrabilité des petits bassins versants d'Afrique tropicale par le calcul des lames ruisselées pour une pluie utile égale à 50 mm ($P_u = 50$ mm) et un indice d'humectation égal à 5 mm ($IK = 5$ mm). Mais on peut aussi calculer directement les lames ruisselées correspondant aux pluies de fréquence décennale.

Détermination de la classe d'infiltrabilité A partir d'un échantillon de petits bassins versants expérimentaux, une correspondance (Tableau 2) a été établie entre

Tableau 2 Définition des classes d'infiltrabilité de la méthode Orstom (Rodier, 1992).

Lame ruisselée en mm pour $P_u = 50$ mm et $IK = 5$ mm	Classe d'infiltrabilité
> 40	Très imperméable (TI)
30-37	Particulièrement imperméable (PI)
24-26	Imperméable (I)
12-18	Relativement imperméable (RI)
6-9	Perméable (P)
1-5	Très perméable (TP)

d'une part les lames ruisselées provenant d'une agrégation des lames ruisselées élémentaires à l'échelle des bassins versants et d'autre part les classes globales d'infiltrabilité définies à partir des lames ruisselées observées aux exutoires des bassins.

Les classes d'infiltrabilité définies par Jean Rodier correspondent à des bassins versants types caractérisés par des conditions régionales moyennes de ruissellement sur les versants et des conditions normales de transfert dans le réseau hydrographique.

Pour tenir compte des conditions particulières propres au bassin versant étudié, il conviendra d'utiliser la check-list associée à la méthode Orstom. Ces conditions particulières concernent l'existence de zones à forte perméabilité à l'aval des versants, de zones endoréiques locales, d'un pourcentage élevé de mise en culture ou d'une dégradation plus ou moins prononcée du réseau hydrographique.

Détermination de la lame ruisselée Si l'on souhaite calculer directement les lames ruisselées de fréquence décennale à partir des cartes d'états de surface, Jean Rodier (1992) propose d'utiliser des coefficients de calage qui varient en fonction de la classe de perméabilité, de la superficie du bassin versant et du taux de remplissage des réservoirs superficiels. Ces coefficients ont été calculés pour des conditions favorables au ruissellement, à partir des fonctions de calage (équation (6)), en considérant l'ordonnée à l'origine B égale à 0, c'est à dire un remplissage maximum des réservoirs superficiels. Les potentiels de ruissellement (PR) ont été calculés en utilisant les cartes d'états de surface de petits bassins versants aux superficies égales ou inférieures à 20 km² et les relations hydro-pluviométriques à l'échelle élémentaire figurant dans le catalogue de Casenave & Valentin (1989). Ces coefficients ont été fournis à titre indicatif et provisoire par Jean Rodier.

Sur la seconde ligne de chaque classe de perméabilité du Tableau 3, nous avons placé les valeurs des coefficients de calage calculés à partir des abaques Orstom (FAO, à paraître) présentant la décroissance des coefficients de ruissellement décennaux avec la croissance de la superficie des bassins. A l'exception de la classe RI (Relativement Imperméable), nous avons pris la même valeur de référence pour les bassins versants

Tableau 3 Coefficients moyens de calage entre lames ruisselées simulées et observées.

Classes de perméabilité	Modes de calcul	Coefficients de calage par classe de superficie en km ²						
		1	5	10	20	50	100	200
Particulièrement imperméables PI	Rodier 1992	1,15	1,05	-	0,90	-	-	-
	Orstom 1995	1,15	1,08	0,99	0,87	0,74	0,54	0,44
Imperméable I	Rodier 1992	1,10	1,02	-	0,85	-	-	-
	Orstom 1995	1,10	0,97	0,89	0,85	0,62	0,53	0,44
Relativement imperméable RI	Rodier 1992	0,60	0,55	-	0,45	-	-	-
	Orstom 1995	0,85	0,75	0,70	0,63	0,55	0,48	0,44
Perméable P	Rodier 1992	0,60	0,50	-	0,40	-	-	-
	Orstom 1995	0,60	0,53	0,48	0,36	0,28	0,24	0,20
Très perméable TP	Rodier 1992	0,60-0	0,45-0	-	0,30-0	-	-	-
	Orstom 1995	0,60-0	0,45-0	0,38-0	0,30-0	0,23-0	0,19-0	0,15-0

de superficie égale à 1 km². Pour la classe RI, la valeur initiale de 0,85 nous a paru plus cohérente que la valeur de 0,60 proposée par Jean Rodier.

La décroissance des coefficients moyens de calage avec la taille du bassin versant présente une analogie évidente avec la décroissance des coefficients de ruissellement décennaux des abaques Orstom. Cette analogie n'a rien de fortuit. Elle est en effet produite par les mêmes causes, c'est à dire les pertes par écoulement le long des versants et dans le réseau hydrographique. *A priori*, ces coefficients de calage devraient conserver une certaine signification pour des averses plus modestes que l'averse décennale et subir des variations sensibles au cours de la saison des pluies. En particulier, l'ordonnée à l'origine de la fonction de calage devrait prendre des valeurs négatives en début de saison des pluies.

Validation L'application de cette méthodologie a donné les résultats consignés sur le Tableau 4. Deux régions climatiques sont représentées sur ce tableau:

- (a) la zone tropicale sèche (850-1200 mm) avec les bassins du Kuo et du Dougo (peu cultivés) et le bassin versant de Bindé (très cultivé); et
- (b) la zone sahélienne sensu lato (150-800 mm) avec les bassins versants de Taïma, Polaka, Tchalol (zone sèche peu cultivée) et le bassin versant de Thyssé Kaymor (zone plus humide très cultivée).

A partir de ces exemples, il est clair qu'au-dessus d'une superficie de 10 km² les lames ruisselées calculées par simple agrégation (colonne 7, valeurs brutes) sont nettement surestimées. L'utilisation des coefficients de calage (colonne 8) permet de mieux approcher les valeurs observées. Au-dessous d'une superficie de 10 km², on peut remarquer que la méthode Orstom, utilisant les classes d'infiltrabilité, ne fournit pas de meilleurs résultats que l'agrégation brute.

A partir des quelques exemples traités, on peut donc présumer que l'utilisation des nouvelles technologies pour la prédétermination des lames ruisselées de fréquence

Tableau 4 Lames ruisselées décennales déterminées à l'aide des nouvelles technologies.

Bassins versants	Superficie en km ²	Pluie annuelle en mm	Classe d'infiltration*	Lames ruisselées de fréquence décennale en mm			
				Estimées à partir des observations	Abaques Orstom FAO 1995	Valeurs brutes	Corrigées par coefficient
Kuo (BF)	58,9	1 100	RI	15,8	23	31	16,6
Dougo (BF)	158,0	1 100	RI	6,4	21	29	13,3
Bindé (BF)	9,7	950	RI à I	32,0	30	34	24 à 31
Taïma (BF)	104,0	450	I	19,0	14	29	17,0
Polaka (BF)	9,6	450	I	22,0	35	32	30,0
Tchalol (BF)	10,5	450	I	42,0	36	32	30,0
Thyssé (Sen)	16,0	800	RI	20,0	22	28	18,6

* Infiltrabilités déterminées par agrégation des lames ruisselées élémentaires pour $P_u = 50$ et $IK = 5$ mm; BF = Burkina Faso, Sen = Sénégal.

décennale (ou des coefficients de ruissellement) conduit à des résultats comparables à ceux obtenus par d'autres méthodes. Ils sont même souvent meilleurs. De plus, contrairement aux autres méthodes, le traitement numérique des images satellites fournit des informations spatialisées qui peuvent être utilisées hors du bassin où elles ont été recueillies.

CONCLUSION

Comme l'a écrit Jean Rodier (1992): « Il est clair que l'utilisation de la cartographie des états de surface en zone sahélienne permet de sortir enfin du domaine subjectif en ce qui concerne l'appréciation globale de la perméabilité à l'échelle des bassins versants et que l'on peut raccorder les résultats de la simulation de pluie à l'échelle du m^2 à l'ensemble de ce qui a été fait au Sahel sur les coefficients de ruissellement des petits bassins versants ».

Au vu des résultats déjà obtenus, on peut soutenir avec raison qu'une meilleure compréhension et une meilleure modélisation des processus hydrologiques à l'échelle des bassins versants viendra d'une part d'observations hydrologiques à l'échelle des versants pour les bassins aux sols relativement imperméables (classe RI), perméables (classe P) et très perméables (classe TP), d'autre part de l'analyse des conditions de rétention et d'écoulement dans les réseaux hydrographiques. En attendant les résultats de ces observations, l'usage des procédures d'agrégation des relations hydro-pluviométriques, établies à l'échelle du m^2 , permet l'introduction, dans les modèles hydrologiques, de l'évolution de l'état de surface des sols au cours d'une même saison des pluies. Il permet également d'envisager, à l'échelle des bassins versants, la modélisation des effets sur le ruissellement d'une transformation de la couverture végétale herbacée.

L'utilisation des coefficients moyens de calage pour le calcul des lames ruisselées n'est qu'un pis-aller. Elle permet cependant une amélioration significative de l'estimation des lames ruisselées et il ne paraît pas déraisonnable d'envisager l'emploi de ces coefficients pour des averses nettement plus faibles que l'averse décennale. De plus, la généralisation du traitement des images de télédétection et l'emploi de modèles d'agrégation spatiale, utilisant des données intégrées à un Système d'Information Géographique, devraient faciliter l'évaluation des fluctuations des coefficients de calage au cours de la saison des pluies et par là améliorer l'estimation des ruissellements à l'échelle des petits bassins versants non jaugés.

REFERENCES

- Arnold, J. G., Williams, J. R., Nicks, A. D. & Sammons, N. B. (1989) *SWRRB, a Basin Scale Simulation Model for Soil and Water Resources Management*. Texas A&M University Press.
- Casenave, A. & Valentin, C. (1989) Les états de surface de la zone sahélienne. Orstom, Coll. didactiques.
- Engman, E. T. & Gurney, R. J. (1991) *Remote Sensing in Hydrology*. Chapman & Hall.
- FAO (à paraître) Manuel de prédétermination des apports annuels et des crues décennales des petits bassins versants de l'Afrique sahélienne et tropicale sèche. CIEH/Orstom/Cemagref). FAO, Rome.
- Girard, G. (1982) Modélisation des écoulements de surface sur des bassins hydrologiques équipés de réservoirs. *Modèle Modlac. Cah. Orstom, sér. Hydrol.* 19(2).
- Kovar, K. & Nachtnebel, H. P. (eds) (1996) *Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management* (Proc. HydroGIS'96 Conf., Vienna, Austria, April 1996). IAHS Publ. no. 235.

- Lamachère, J. M. (à paraître) Variabilité spatio-temporelle des états de surface en zones sahélienne et soudanienne (Burkina Faso): effets sur le ruissellement et sa modélisation. Comm. IX^{es} Journées Hydrologiques de l'Orstom, Montpellier, septembre 1994.
- Lamachère, J. M. & Puech, C. (1995) Télédétection et régionalisation de l'aptitude au ruissellement et à l'infiltration des sols en Afrique sahélienne et nord-soudanienne. In: *Régionalisation en hydrologie, application au développement* (ed. par Le Barbé & E. Servat), 205-228. Actes des VIII^{es} Journées hydrologiques Orstom, septembre 1992.
- Puech, C. (à paraître) Du m² au bassin versant: la difficulté du passage d'échelle. Comm. aux IX^{es} Journées Hydrologiques de l'Orstom, Montpellier, septembre 1994.
- Rodier, J. & Auvray, C. (1965) *Estimation des débits de crue décennale pour les petits bassins versants de superficie inférieure à 200 km² en Afrique occidentale*. CIEH, Orstom, Paris.
- 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, Ouagadougou no. 58*, 2-9.
- Rodier, J. (1992) *Du simulateur de pluie aux bassins versants représentatifs sahéliens*. Orstom, Coll. Etudes et Thèses.
- Schultz, G. A. & Barrett, E. C. (1989) *Advances in Remote Sensing for Hydrology and Water Resources Management*. Technical Documents in Hydrology, Unesco, Paris.
- USDA (1985) *National Engineering Handbook*, section 4 – Hydrology. Soil Conservation Service, US Department of Agriculture, Washington, DC, USA.
- Vieux, B. E. & Gauer, N. (1994) Finite-element modeling of storm water runoff using Grass GIS. *Microcomputers in Civil Engineering* no. 9, 263-270. Blackwell, Oxford, UK.