

DU MÈTRE CARRÉ AU BASSIN VERSANT : LA DIFFICULTÉ DU PASSAGE D'ÉCHELLE

C. PUECH¹

RÉSUMÉ

L'utilisation de la télédétection satellitaire permet de caractériser les états de surface des régions sahéliennes avec une précision très intéressante, autorisée en partie par la faible couverture végétale de saison sèche. La détermination des caractéristiques hydrodynamiques des sols à partir du simulateur de pluie (et de son dérivé le *catalogue des états de surface types du Sahel* de CASENAVE et VALENTIN, 1989) peut laisser espérer l'obtention d'une méthode précise et reproductible pour l'estimation des conditions de ruissellement pour les bassins versants.

Des essais d'application d'une méthode liant télédétection et catalogue des états de surface sur plusieurs bassins du Sahel (Burkina et Sénégal) font apparaître des incompatibilités et limitations sévères.

L'hypothèse d'additivité des contributions élémentaires ne peut être systématiquement retenue. Cette hypothèse semble à la rigueur acceptable sur les zones cultivées, mais elle est totalement mise en défaut sur zones naturelles : dans ces sous-parties de bassins versants, le simulateur ne semble plus l'instrument adéquat pour caractériser les ruissellements. Dans ces zones, l'estimation cohérente d'un ruissellement doit faire appel à des mesures à une échelle spatiale différente (hydrologie de versants).

¹Laboratoire Commun de Télédétection Cemagref Engref - BP 5095 - 34033 Montpellier cedex 01.

Or, actuellement, les références quantifiées des ruissellements de versant (typologie et mesures) sont très insuffisantes pour qu'un outil vraiment opérationnel puisse être proposé.

INTRODUCTION

OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

Pour l'estimation des débits sur les petits bassins versants de la zone sahélienne et soudano-sahélienne, nous avons testé des méthodologies alternatives qui utilisent une caractérisation des bassins par télédétection satellitaire. À l'occasion de ces recherches les problèmes de passage d'échelle de l'objet élémentaire de description jusqu'au bassin versant se sont posés et nous présentons ici les réflexions que nous en avons retirées.

Nos travaux concernent les conditions de formation de crues sur bassins non jaugés. Les caractéristiques intéressantes du bassin sont alors les caractéristiques fixes telles que l'occupation du sol et les perméabilités, le relief et le réseau de drains définissant le réceptacle des eaux pour un climat donné.

Les indications de télédétection haute résolution semblent *a priori* utiles pour cette approche vu l'importance des états de surface pour les crues, et la facilité de détection sur images.

SITES D'APPLICATION

Pour la mise au point et le test de ces méthodes, trois sites d'études sont retenus, deux au Burkina Faso et un au Sénégal, ce qui correspond à 8 bassins dont les superficies vont de 10 à 170 km² (tableau 1). Le choix des sites, volontairement restreint vu la masse de données à traiter (terrain et images), est basé sur des critères de qualité des mesures hydrologiques, de représentativité des bassins, mais aussi de stabilité de l'occupation du sol entre mesures hydrologiques et images, jugée d'après le faible nombre d'années écoulées depuis les dernières mesures hydrologiques.

Tableau 1
Sites d'études Sahel

Zone d'étude	Bassins	s km ²	Latitude Longitude	Pluie annuelle
Burkina Faso (Manga)	Louré	98		900 mm
	Bindé	10	11°40' N	
	Kazanga	55	01°03' W	
Burkina Faso (Ndorola)	Dougou	170	11°40' N	1000 mm
	Kuo	59	04°50' W	
	Dougbé	19		
Sénégal Thyssé Kaymor	Ndiba	16,2	13°46' N	800 mm
	Keur Samba	75,6	15°32' W	

Les données hydrologiques sont extraites des documents de KLEIN (1967) et ALBERGEL (1987) pour Manga, LAMACHÈRE (1988) pour Ndorola, ALBERGEL *et al.* (1991) pour Thyssé Kaymor.

MÉTHODOLOGIE : ÉTATS DE SURFACE TÉLÉDÉTECTION

On pense généralement que l'amélioration de l'estimation des ruissellements de la zone sahéenne viendra de la meilleure connaissance des aptitudes au ruissellement (Rodier *et al.*, 1984). L'une des façons de répondre à cette attente est de favoriser la connaissance des ruissellements élémentaires par simulation de pluies ; les outils de connaissance spatiale qui se développent à travers l'approche *télé-détection* sont une autre réponse possible.

SIMULATION DE PLUIE ET CATALOGUE DES ÉTATS DE SURFACE

En particulier le ruissellement élémentaire est étudié en utilisant des *simulateurs de pluie* qui mesurent la réponse des sols à un protocole de pluies bien défini (ASSELIN et VALENTIN, 1978). Les résultats de ces simulations permettent d'associer à chaque type de surface pédologique de taille 1 mètre carré, une équation hydrodynamique reliant la pluie, l'état d'humidité du sol et la lame ruisselée.

L'analyse d'un grand nombre de mesures de simulation de pluie a permis la création d'un catalogue des états de surface du Sahel (CASENAVE et VALENTIN, 1989) qui permet une détermination rapide des états de surface et une estimation des équations hydrodynamiques à partir des seules caractéristiques de surface.

MÉTHODE DES ÉTATS DE SURFACE COUPLÉS À LA TÉLÉDÉTECTION POUR LE CALCUL DE DÉBITS

La télé-détection satellitaire autorisant une cartographie détaillée des états de surface apparaît comme un moyen intéressant pour valoriser les résultats précédents : simulation de pluie et catalogue des états de surface élémentaires *ESE*.

Partant de l'hypothèse que toutes les conditions d'application de la méthode simulateur sont réunies au niveau bassin versant, on se posera la question suivante : la combinaison télé-détection + catalogue des *ESE* est-elle capable de fournir des indications intéressantes sur les conditions d'écoulements des bassins, y compris sur les bassins non jaugés ?

La méthodologie complète, que nous avons voulu tester, peut alors s'exprimer par les étapes suivantes :

- choix initiaux : modèle hydrologique, images, objets, mesures de terrain ;
- traitement des images proprement dit : obtention des plans primaires, de type paysage ;

- passage aux objets hydrologiques : transformation des plans primaires en états de surface type ; définition d'une cartographie des potentialités du ruissellement ;
- globalisation des résultats, pour passer au bassin versant.

APPLICATION

L'application a déjà été décrite (LAMACHÈRE et PUECH, 1992) et nous n'en rappellerons que les grandes lignes.

La base de connaissance des états de surface est le catalogue des états de surfaces CASENAVE et VALENTIN (1989). Une méthodologie basée sur la classification supervisée d'images satellite haute résolution a été mise au point.

Les images utilisées sont des images haute résolution Spot et Landsat TM de saison sèche, périodes où les contrastes entre la végétation arborée et le reste du terrain sont maximaux.

Le traitement d'image a été opéré en deux temps :

- une série de classifications supervisées, pixel à pixel, définit les plans élémentaires *culture, végétation arborée et type de sol*, grâce à une première série de mesures de terrain de type transects. Les résultats de ces classifications d'images montrent des ensembles de bassins opposés sur tous les plans :
 - les bassins de Manga et du Sénégal sont couverts en majorité de cultures laissant 30 % à 40 % de l'espace aux zones naturelles ; au contraire à Ndorola où les cultures sont nettement minoritaires (moins de 20 %) et correspondent à des zones de bas-fonds ;
 - la proportion des densités arborées suit une répartition inverse. Les zones arborées sont peu représentées à Manga et Thyssé Kaymor, tandis qu'à Ndorola 80 % de la superficie a une couverture arborée de densité supérieure à 15 % ;
 - enfin pour les types de sols, les choses sont encore plus tranchées. Les sables dominent à Thyssé Kaymor, tandis qu'à Manga on observe une plus grande proportion de matériaux plus grossiers. Enfin à Ndorola les gros blocs affleurants sont majoritaires ;
- le passage aux états de surface types se fait par l'utilisation de corrélations entre les trois plans *physiques* (sol S, végétation V, Culture/Nature C) et les *ESE*. Ces corrélations sont tirés de l'observation combinée des observations globales de type transect et d'observations plus fines appelées lignes (LAMACHÈRE et PUECH, 1992).

Ces associations conduisent, à l'issue de cette étape, à affecter à tout pixel un mélange d'états de surface élémentaires, et une relation hydrodynamique moyenne donnant la lame ruisselée. Le résultat est un fichier numérique donnant

pour chaque pixel de l'espace sa composition en *ESE*. Le tableau 2 indique la répartition moyenne équivalente des *ESE* sur chaque bassin, ce qui va servir pour l'évaluation des ruissellements globaux.

Tableau 2
Histogrammes de répartition des *ESE*

Bassins	C1	C2	C3	DEC	DES	ERO	GRO	VER	TER	Culture
Louré	3	27	22	12	14	-	15	7	-	56%
Bindé	4	39	20	5	15	-	9	7	-	63%
Kazanga	3	30	24	6	15	-	14	7	-	58%
Dougbé	-	3	2	2	22	2	62	6	-	7%
Dougou	1	5	4	3	36	2	39	10	-	12%
Kuo	1	5	4	3	29	2	45	8	-	12%
Ndiba	51	11	4	4	27	-	-	-	1	72%
K. Samba	46	10	4	4	32	-	-	-	1	64%

Plusieurs validations ont été effectuées :

- vérification de la stabilité de la clé statistique de transformation des plans primaires en plans états de surface ;
- mise en correspondance, le long des transects, des *ESE* observés (terrain) et calculés (issus de l'image classée).

L'ensemble de ces validations est globalement cohérent pour les classes les plus présentes (C1 à C3, DES, GRO, DEC, VER), et très médiocre pour celles faiblement représentées (ERO, ST2, ST3, TER). Les comparaisons d'effectifs avant et après classification fournissent une bonne conformité avec une légère tendance au lissage des valeurs.

PASSAGE D'ÉCHELLE : DU MÈTRE CARRÉ AU BASSIN VERSANT

ESTIMATION GLOBALE DU RUISSÈLEMENT : RÉSULTATS BRUTS

Le modèle retenu (modèle *simulateur*) veut que l'eau ruisselant sur les parcelles parvienne immédiatement au chevelu hydrographique puis au collecteur général (RODIER, 1992). Dans ces conditions, il n'y a pas de déperdition de volume entre la parcelle et le bassin. La sommation de toutes les lames ruisselées élémentaires de chaque pixel, sur l'ensemble du bassin versant, donne alors la lame théorique globale à l'exutoire sans tenir compte des effets induits par le changement d'échelle.

$$LR = \sum_i (LR_i) = \sum_i (a_i \cdot P + b_i \cdot P \cdot Ik + c_i \cdot Ik + d_i) \quad (1)$$

de forme :

$$LR = A \cdot P + B \cdot P \cdot Ik + C \cdot Ik + D \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{ou } A &= \Sigma_i(a_i n_i) / \Sigma(n_i) ; \\ B &= \Sigma_i(b_i n_i) / \Sigma(n_i) ; \\ C &= \Sigma_i(c_i n_i) / \Sigma(n_i) ; \\ D &= \Sigma_i(d_i n_i) / \Sigma(n_i) ; \end{aligned}$$

n_i représente le nombre de pixels de catégorie i (tableau 3).

L'ensemble des bassins offre des coefficients de ruissellement bruts Kr10 assez forts, avec une très grande homogénéité par site d'étude. Selon la télédétection et le catalogue des états de surface, les écoulements les plus faibles sont obtenus pour les bassins de Thyssé Kaymor (cultures sur sable).

Tableau 3
Résultats bruts des lames ruisselées globales
(par utilisation du seul catalogue)

Bassins	A	B	C	D	P10 mm	Ab	LR10 mm	Kr10 brut
MANGA								
Louré	0.482	0.002	0.036	-5.41	102	0.76	32.6	42.0 %
Bindé	0.451	0.0026	0.035	-5.14	102	0.87	39.1	44.0 %
Kazanga	0.442	0.0023	0.036	-5.50	102	0.79	37.5	46.5 %
NDOROLA								
Kuo	0.419	0.0012	0.011	-3.95	105	0.9	35.3	37%
Dougou	0.504	0.0011	0.009	-4.22	105	0.8	29.1	34.7 %
THYSSE								
Ndiba	0.261	0.003	0.025	-4.29	108	0.9	27.7	28.5 %
K. Samba	0.266	0.003	0.025	-4.51	108	0.8	24.3	28.1 %

P_{10} pluies ponctuelle décennale,

Ab coefficient d'abattement,

LR₁₀ est la lame ruisselée décennale selon l'équation hydrodynamique,

Kr₁₀ coefficient de ruissellement décennal = LR₁₀ / (P₁₀ * Ab).

RÉSULTATS NETS, COEFFICIENTS DE CALAGE

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

La méthode utilisée rectifie l'équation hydrodynamique, définie au prorata des surfaces, par un coefficient de calage provenant de la comparaison *in situ* des observations de débit avec les estimations. Ainsi, sur chaque bassin nous avons recensé tous les épisodes pluvieux pour lesquels la lame ruisselée était supérieure à 1 millimètre. Ont été relevés pour chacun d'eux les paramètres P , Ik (d'où l'on a déduit une valeur Lr calculée) et Lr observée. Enfin une régression simple entre les valeurs calculées et observées a donné le coefficient de calage (tableau 4).

Pour les groupes de Manga et de Thyssé Kaymor les résultats sont *a priori* cohérents : l'ordre de grandeur entre les valeurs brutes et observées est respecté. Par contre, les bassins de la zone de Ndorola ont des coefficients de ruissellement observés excessivement faibles (3 %, 7 % et 15 %) devant les valeurs estimées (30 % à 40 %).

D'une part de tels coefficients de ruissellement ($K_r=3\%$) sont difficiles à obtenir à partir de valeurs élémentaires moyennes des états de surface, d'autre part, les coefficients de calage de ces bassins doivent être très faibles, bien inférieurs à 0,10 pour Dougbé et Dougou. La signification physique de tels coefficients est alors incertaine, car on est très éloigné de l'hypothèse d'additivité des ruissellements. Dès lors, la précision de ces coefficients est médiocre, et leur utilisation compromise.

Toutefois, les valeurs rectifiées par le coefficient de calage sont à l'évidence et à première vue, de *bons* résultats puisque les lames ruisselées décennales sont très proches des valeurs observées.

Tableau 4
Résultats des estimations

Sites	Bassins	S km ²	Observé		Coef calage	Estimé après calage	
			Lrobs (mm)	Krobs %		Lr net (mm)	Krnet %
MANGA	Louré	98	32	41	1,13	36,8	47
	Bindé	10	34,5	39	0,53	20,7	23
	Kazanga	55	28,5	35	0,64	24	30
NDOROLA	Dougbé	19	3,2	3			
	Kuo	68	15,8	17	0,3	10,5	11
	Dougou	158	6,4	7	0,07	2,1	2
THYSSE	Ndiba	16	19,8	20	0,47	19,1	20
KAYMOR	K. Samba	76	22,9	26	0,9	21,9	25

DISCUSSION DES RÉSULTATS

Pour juger de la validité globale de la méthode trois niveaux d'erreurs potentielles sont à envisager concernant la cartographie par télédétection, l'utilisation du catalogue, et le passage au bassin versant.

QUALITÉ DE LA CARTOGRAPHIE DES LAMES RUISSELÉES

Il est difficile de faire ces validations dans la mesure où aucune vérité terrain n'existe. Les validations ont été effectuées en utilisant à une partie des données de terrain, réservées au contrôle, par comparaison entre les lames ruisselées obtenues sur les images et celles venant des données de terrain.

On donne à titre d'exemple cette comparaison sur le transect 16 de Thyssé Kaymor (figure 1), où l'on remarque une variation faible des lames estimées par télédétection et utilisation du catalogue (courbes), une variation à peine plus forte sur les données de terrain et catalogue (triangles), une variation beaucoup plus forte dans le cas où interviennent les données terrain avec les valeurs de ruissellement tirées des simulations de pluie *in situ* (croix).

Deux conclusions peuvent en être tirées :

- l'utilisation des images avec catalogue gomme une partie des fluctuations, et restitue faiblement les variations de lames ruisselées, mais globalement les valeurs obtenues sont proches des données de terrain quand on utilise le catalogue ;
- l'utilisation du catalogue donne des valeurs beaucoup plus faibles et moins variables que celles définies par les simulations de pluies *in situ*.

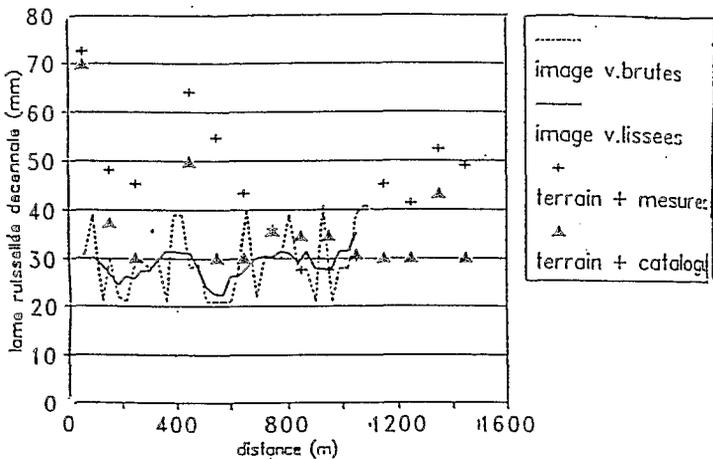


Figure 1 :

Validation des classifications en lames ruisselées.

Profils comparés des lames ruisselées obtenues à partir de :

- observations de terrain et catalogue des états de surface ;
- observations de terrain et simulation de pluie *in situ* ;
- résultats de l'image classée et catalogue des états de surface.

QUALITÉ D'UTILISATION DU CATALOGUE

Nous avons eu accès sur certains bassins (Kuo, Bindé et Ndiba) à d'autres types de cartographie des états de surface : photos aériennes et mesures locales de simulation pluies. Par ailleurs, nos propres relevés de terrain ont été traduits d'une part en *ESE* du catalogue seulement, d'autre part en *ESE* du catalogue et en variantes issues des simulations de pluie locales.

La comparaison des résultats, tant au niveau local que spatial, révèle que les coefficients de calage dépendent de la méthode utilisée et qu'ils en gomment tous les défauts.

Au niveau global, les coefficients de calage obtenus sur les bassins de Bindé et Kazanga sont en effet respectivement de 1,39 et 1,10 par la simulation *in situ* (ALBERGEL, 1987) et de 0,64 et 0,53 par télédétection et catalogue, soit pratiquement du simple au double.

La comparaison des coefficients de l'équation hydrodynamique pour les *ESE* du catalogue seul (tableau 5) ou ceux du catalogue et des variantes associées (tableau 6) précise l'origine des disparités : les chiffres de lames ruisselées décennales élémentaires passent parfois du simple au triple entre modalités du catalogue et variantes associées ! Noter par exemple les écarts entre les modalités DES ou DES1 (30,1 mm), et DES3 (67,7 mm).

Bien entendu, ces différences se retrouvent tant sur les profils de lames ruisselées, que dans les résultats globaux. L'analyse du transect 16 de Thyssé Kaymor illustre ces points : les valeurs avec simulateur sont nettement plus fortes que les valeurs du catalogue, tandis que nos estimations images se rapprochent des valeurs du catalogue (figure 2).

Tableau 5 :
Modalités du catalogue pour le bassin de Ndiba

Modalités	a	b	c	d	Lr10
c1	0,2	0,004	0,003	-3	26,2
c2	0,35	0,004	0,04	-3	42,9
des	0,3	0,003	0,01	-8	30,1
ero	0,95	0,001	0,09	-9	96,3
g	0,99	0,001	0,05	-6	102,8

Tableau 6 :
Modalités variantes pour Ndiba (à partir des simulations locales de pluie)

Modalités	a	b	c	d	Lr10
c1.1	0,1	0,003	-0,05	-1,13	14,4
c2.2	0,39	0,0028	-0,009	-6,35	40,6
des1	0,3	0,003	0,01	-8	30,1
des3	0,654	0,0016	0,032	-5,9	67,7
des4	0,48	0,0023	0,02	-7	49,1
gro1	0,99	0,001	0,05	-6	102,7
gro2	0,87	0,004	0,2	-6,1	98,6
gro3	0,59	0,002	0,22	-7	64,4
erol	0,95	0,001	0,09	-9	96,3

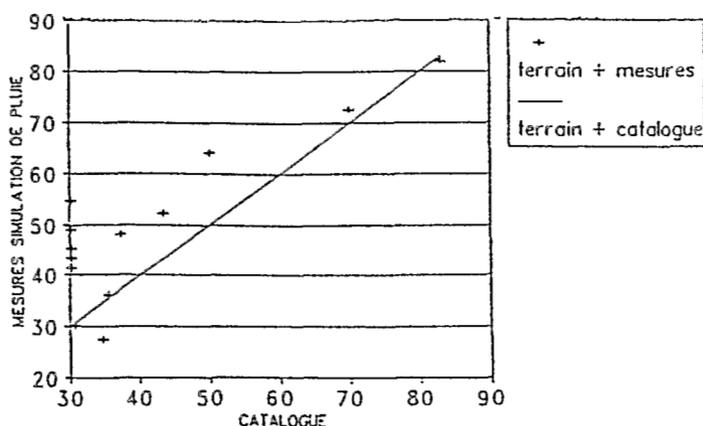


Figure 2 :
 Thyssé Kaymor. Transect 16
 Comparaison catalogue-Simulateur.

Une remarque est d'importance : nous avons comparé sur le bassin de Ndiba (Thyssé Kaymor), pour tous les événements pluvieux observés, les estimations de lames ruisselées brutes fournies par l'agrégation des lames par les *ESE* dans deux cas :

- cartographie manuelle et simulation de pluie *in situ* (VALENTIN, 1990) ;
- résultats de télédétection avec les *ESE* du catalogue.

Les deux estimations, celles de VALENTIN et celle par télédétection s'ajustent pratiquement sur des droites quasiment affinitées l'une de l'autre (figure 3). Il s'en-suit que les régressions entre les données hydrologiques et ces deux résultats sont de même qualité et que le coefficient de calage rattrape sans peine les écarts d'estimations. On peut alors s'interroger sur l'intérêt à chercher une équation brute parfaite ?

Un autre point intéressant à remarquer est qu'à partir des estimations du catalogue, les résultats obtenus pour Lr sont très proches, quel que soit le bassin. On observe en effet, que les bassins, soient très ruisselants ou peu ruisselants, des Kr calculés de l'ordre de 30 à 40 %. Or ceci peut se comprendre à l'examen de la figure 4 qui donne l'ensemble des courbes possibles des états de surface du catalogue. Dès qu'un bassin est assez grand et assez différencié, la lame ruisselée moyenne provient du foisonnement des valeurs possibles avec un résultat proche de la moyenne des possibles. Ainsi par cette méthode on exclut les extrêmes. La

généralisation de cette remarque est inquiétante puisque tout calcul brut indiquerait alors un ruissellement sensiblement identique quel que soit le bassin, ce qui restreindrait bien évidemment l'intérêt de la méthode.

En conclusion, il semble que les données de terrain et les données catalogue soient assez disparates, et qu'il soit délicat d'arriver à une estimation correcte, sur le terrain à l'aide du seul catalogue.

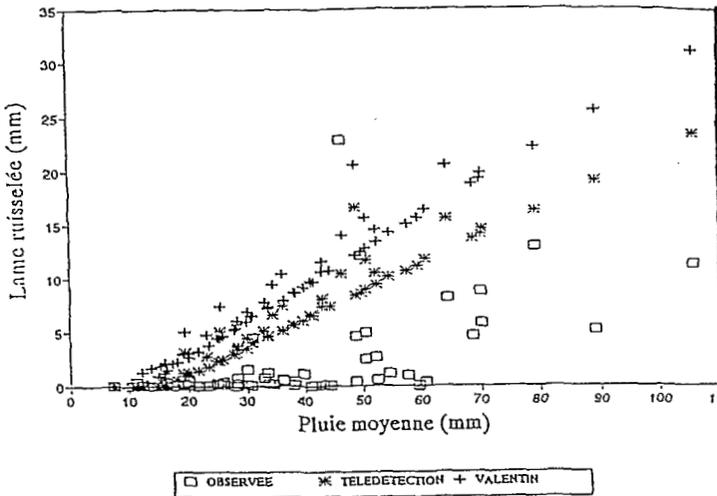


Figure 3 :
 Comparaison entre lames calculées et observées.
 Bassin de Ndiba (zone de Thyssé Kaymor).

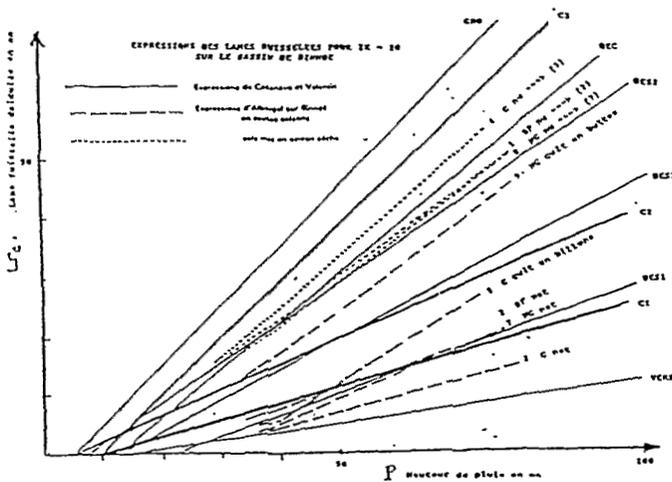


Figure 4 :
 Les réponses élémentaires des états de surface.
 Estimations à Manga, avec un $IK = 20$.

QUALITÉ DU PASSAGE DU MÈTRE CARRÉ AU BASSIN VERSANT

De nombreux essais pour effectuer ce passage ont été tentés, et les premières conclusions semblent encourageantes. RODIER (1992), et ALBERGEL (1987) pensent que de la connaissance des états de surfaces élémentaires, on peut reconstituer l'écoulement du bassin versant. Des études sur quelques bassins versants à partir d'une cartographie manuelle montrent des coefficients de calage (ou des coefficients directeurs de la fonction de calage) modérés, souvent compris entre 0.5 et 1 (ALBERGEL 1987, Albergel, Casenave, Valentin 1985, Hasnaoui 1987, SMAOUI 1987).

Par ailleurs, des essais sur des changements d'échelle, modérés, entre le simulateur de pluie et le champ, ont donné des résultats intéressants. Ainsi pour COLLINET (1985), il n'y aurait pas de différence visible entre les ruissellements sur 1 mètre carré et 100 mètres carrés. GUILLOBEZ et ZOUGMORE (1991), sur cultures au Burkina Faso, trouvent de bons résultats par la simulation de pluie entre le mètre carré et une parcelle de 100 mètres carrés.

Mais MOLINIER *et al.* (1990), travaillant au Brésil, contredisent partiellement ces affirmations : entre le mètre carré et l'hectare, la lame ruisselée diminue avec la superficie. Ils obtiennent, en effet, un ruissellement sur sols nus qui diminue de 5 % chaque fois que la superficie double. Enfin, à l'échelle du versant, il n'est plus possible de considérer la surface élémentaire comme isolée de l'influence extérieure (LAMACHÈRE et ESTÈVE, 1993).

LES RAISONS PHYSIQUES DU COEFFICIENT DE CALAGE

Le passage du mètre carré au versant, puis au bassin, se fait avec dérive par rapport au modèle linéaire LR_i. Un versant ruisselle moins que l'ensemble de ses mètres carrés constitutifs par suite de biais entre mesure au simulateur et sous pluie naturelle, de zones propices à l'infiltration après quelques mètres de cheminement en surface, ou de concentration dans les chenaux (PLANCHON, 1990). Cette dérive est due à une série de processus physiques dont les plus notables sont l'influence de l'amont et l'interaction de cases voisines, la perméabilité en grand (processus de taille très supérieure à 1 mètre carré tels que flaques, dépressions, fissuration, végétations par touffes, arborescence...), l'effet de la pente, le devenir de la lame ruisselée dans les cases voisines ou lors de son parcours vers l'exutoire (pièges ou zones saturées...).

La plupart de ces processus tendent à diminuer le ruissellement et il est alors logique d'obtenir un coefficient CC inférieur à l'unité. Mais ces processus rompent, pour la plupart, le schéma d'additivité des ruissellements.

Si ce coefficient est proche de 1, ceci veut dire que l'additivité des ruissellements est acceptable et que les perturbations précédentes jouent peu. Inversement, un coefficient très faible est le signe de facteurs perturbateurs importants, qui vont à l'inverse des hypothèses d'introduction de ce coefficient.

Un bon coefficient de calage aura alors une valeur légèrement inférieure à l'unité.

DÉTERMINATION A PRIORI DU COEFFICIENT DE CALAGE ?

À l'issue de cette analyse il apparaît raisonnable de chercher à établir un coefficient de calage *a priori*. RODIER (1992) propose une détermination de CC basée sur la surface, la perméabilité du bassin (selon les paramètres globaux, classiques*) et les particularités du réseau. Dans ses estimations CC va de 0,2 à 1,2 selon les cas. Ces valeurs sont conformes à ce qui a été observé ici, bien que, pour Ndorola nous ayons vu la nécessité de coefficients encore plus bas.

Mais cette présentation est gênante à plus d'un titre :

- la cartographie des états de surface était censée résoudre le problème de la connaissance de la perméabilité : si, en sortie du modèle, on doit encore avoir recours aux indices classiques et forfaitaires de perméabilité globale, on n'a guère avancé ; l'un des intérêts de la détermination par les états de surface était justement de trouver une alternative à ces paramètres trop grossiers et subjectifs ;
- l'étude des variabilités des termes de l'estimation montre des plages de variation de 1 à 2 seulement pour Lrc (Lr calculé), et de 1 à 6 pour CC (coefficient de calage CC estimé). Les valeurs de Lr estimées arrivent alors à une variabilité de 1 à 10, mais à travers une lame ruisselée calculée trop stable et un coefficient de calage trop variable. Pour ce qui est des bassins non jaugés, la méthode proposée apparaît aberrante, puisque multipliant un terme peu variable, Lr, très long et cher à définir, par un coefficient forfaitaire, CC, à faible précision et à variabilité beaucoup trop grande ;
- l'observation de ruissellements très faibles, révélateurs de non additivité des ruissellements élémentaires et donc difficiles à inclure dans cette présentation ; étant donné les remarques précédentes, ces ruissellements faibles doivent être expliqués par des perméabilités en grand ou des pièges au ruissellement, donc des observations d'un autre niveau d'échelle.

On voit apparaître deux types de bassins :

- ceux où les coefficients de calage sont raisonnables (CC entre 0,5 et 1), ce qui est observé sur beaucoup de bassins : l'additivité des ruissellements entre le mètre carré et le bassin versant y apparaît acceptable. Le coefficient de calage a alors un sens. On peut même remarquer alors que le choix systématique d'un coefficient de calage moyen, de l'ordre de 0,75 à 0,80 donnerait une incertitude meilleure que celle des *méthodes classiques* ;

* Paramètres P1 à P5, depuis *très perméables*, jusqu'à *très peu perméables* (Rodier Auvray, 1965), paramètres globaux et subjectifs que l'on cherche depuis longtemps à remplacer.

- les cas inverses (coefficient CC trop faible), pour lesquels cette additivité n'est plus assurée. C'est le cas des bassins de Ndorola, bassins atypiques, qui nous ont permis de nous poser beaucoup de questions sur la validité de la méthode.

La méthode n'apparaît éventuellement applicable que si le coefficient de calage est proche de l'unité (ce qu'on ne peut savoir sur bassins non jaugés !). Dans les cas inverses il faut trouver un autre moyen de description que les *ESE* pour arriver au bout du problème, en particulier à partir de considérations sur les perméabilités en grand et les pièges au ruissellement.

PIÈGES ET ZONES SATURÉES IMPLIQUENT UNE NON-LINÉARITÉ PAR CHANGEMENT D'ÉCHELLE

Il est manifeste que, pour certaines zones, les ruissellements observés sont grandement perturbés par des phénomènes d'une autre taille que le mètre carré.

Nombreux sont les exemples de zones qui ruissellent beaucoup moins que ce qui est prévu par l'addition des ruissellements élémentaires (avec de rares zones qui ruissellent plus) par suite d'effet locaux ou du devenir du ruissellement : ainsi la rencontre plus à l'aval de zones beaucoup plus perméables ou imperméables, ou encore zones qui ont un comportement global différent de celui des parties constituantes (cuirasses présentant un amalgame d'états de surface très ruisselants, malgré un ruissellement total négligeable ou brousses tigrées...). La détection des brousses tigrées, succession de cordons arbustifs et de cordons de sol nu, parallèlement à la pente, est révélateur : les états de surface indiquent *grosso modo* 50 % de zones ruisselantes, ce qui peut conduire à de fortes valeurs pour le ruissellement calculé, alors que les ruissellements globaux de ces zones sont nuls, les cordons arbustifs piégeant toute l'eau. Or, ce type de zone se détecte sans problème, par photo-interprétation d'image satellitaire.

SÉPARATION EN ZONES HOMOGÈNES

Il existe donc, *a priori*, des zones qui ne satisfont pas l'hypothèse d'additivité des ruissellements élémentaires, et leur présence dans le bassin interdit l'application de la méthode par états de surface. Étant donnés les résultats obtenus sur les bassins de Ndorola, la recherche et la caractérisation de telles zones est un impératif pour l'obtention de résultats globalement corrects.

Sur les bassins de Ndorola la partie cultivée (bas-fonds, très plats) ne représente que 10 à 15 % de la superficie, le restant étant constitué de versants en pente douce et de collines très boisées, plus ou moins cuirassées. Il apparaît, en gros, que seuls les bas-fonds participent vraiment aux ruissellements, suite à une saturation importante, la production sur plateaux et collines ayant du mal à rejoindre le réseau de drains (Lamachère, Orstom 1992, Perez, Cirad 1993, communications orales).

Le non-ruissellement des plateaux peut être dû à de multiples raisons physiques : position (éloignement des chenaux constitués...) ou structure (influence de la végétation arborée, fortes fissurations...). Pour le calcul des crues ce type de zone doit alors être considéré comme d'influence négligeable.

Un nouveau calcul du ruissellement provenant de la seule zone de bas-fond (tableau 7) donne un rapprochement intéressant entre lames ruisselées observées et calculées.

Tableau 7
Nouvelles estimations dans le cas où l'on ne tient compte que de la partie bas-fond

Bassins	S km ²	Lr calculée	Lr obs (mm)	Lr obs. / Lr calc.	kr brut calc.	kr obs
Dougbé	19	9,4	3,2	0,34	9%	3%
Dougou	170	13,5	6,4	0,47	16%	8%
Kuo	59	13,4	15,8	1,2	14%	17%

Cette façon de séparer, sur le bassin d'étude, les zones qui produisent et celles qui ne produisent pas, s'apparente à une détermination d'*aires contributives* qui est une autre façon d'utiliser l'information spatiale interne aux bassins versants. De telles solutions sont préconisées par TAUER (1992), qui trouve dans la région de Kayes, au Mali, des bassins pour lesquels les ruissellements calculés sont trop forts.

Dans ces conditions, la méthode des états de surface ne pourra être utilisée qu'après avoir vérifié que toutes les zones ont un comportement global identique à celui des états de surface qui la composent. Dans le cas contraire, il devient inutile pour le calcul des ruissellements de caractériser les états de surface élémentaires sur les zones où le ruissellement global ne peut être lié linéairement à celui de ses éléments.

Ainsi apparaît nettement la nécessité de caractériser sur l'image, chaque type de zone avec son niveau d'échelle approprié.

CONCLUSION

Pour la détermination cartographique des potentialités du ruissellement à partir d'images de télédétection satellitaire les interrogations initiales concernaient :

- un aspect géométrique : comment décrire géométriquement le bassin, à l'aide de quels outils pour que ce soit non fastidieux, reproductible et fiable ? À quel niveau d'échelle se référer ?
- un aspect descriptif : recherche des divers paramètres qui définissent le bassin versant. Les paramètres qui représentent le comportement de l'objet en petit sont-ils bien représentatifs et pertinents pour définir le comportement en grand ?

Des essais ont été effectués dans 3 groupes de bassins du Burkina Faso (groupes de Manga et Ndorola) et du Sénégal (groupe de Thyssé Kaymor). Les résultats de la cartographie apparaissent cohérents.

Toutefois l'utilisation de ces informations pour caractériser les crues nous a permis de poser les problèmes de validité globale de la méthodologie d'utilisation des états de surface à l'échelle du bassin versant. En effet le calcul des lames ruisselées globales sur le bassin versant a conduit à des résultats très disparates d'un ordre de grandeur acceptable pour les zones de cultures et trop fort pour les autres. Ceci implique une série de conclusions :

- la première conclusion concerne la possibilité d'accepter l'hypothèse *d'additivité* des contributions. Cette additivité n'apparaît acceptable que pour certaines zones et est totalement irrecevable pour d'autres. Il apparaît qu'à chaque zone il serait utile de définir un coefficient d'additivité, assimilable au coefficient global de calage que RODIER (1992) préconise. Les zones *additives* sont celles où le coefficient de calage est proche de 1 (de l'ordre de 0,8 à 1, avec une valeur fonction décroissante de la surface). Les zones non additives sont celles où le dit coefficient a une valeur bien inférieure à 0,8. Sous toutes réserves, il semble que l'additivité soit acceptable pour les zones de cultures et ne le soit pas pour toutes les zones de nature, en particulier celles couvertes de végétation assez dense ;
- la conséquence de cet état de fait est qu'un coefficient de calage (ou d'additivité) doit être évalué, ce qui peut se faire à un niveau global du bassin ou à un niveau partiel par zones élémentaires. Les valeurs numériques obtenues pour les divers éléments de l'estimation révèlent que l'on aboutit à une *rupture de la chaîne de précision* dans l'estimation. En effet, à un niveau global la lame ruisselée calculée apparaît comme le produit d'un terme Lrc peu variable, cher et délicat à calculer (traitement d'images de télédétection, observations de terrain) par un coefficient de calage, terme forfaitaire à forte variabilité. Au niveau local, le même problème se pose avec, en plus, l'incertitude sur la définition des zones homogènes, de leurs limites et des coefficients particuliers à leur appliquer ;
- rester sur des précisions fortes pour une partie seulement de la chaîne d'estimation apparaît irréaliste, ce qui compromet sérieusement la méthode d'utilisation des états de surface au niveau bassin versant pour de nombreux bassins. On en déduit alors une nécessité de retour sur des notions plus simples et une caractérisation de l'espace avec d'autres types de caractérisation plus globaux.

Au vu des résultats du paragraphe précédent, il semble que l'on puisse affirmer que le problème essentiel pour la connaissance des débits n'est pas l'estimation locale des états de surface élémentaires, mais le passage du local au global.

Le test de la méthodologie a révélé que le point fondamental pour la précision et la pertinence de la démarche concernait le passage d'échelle du mètre carré au bassin versant à travers une interrogation sur l'aspect fonctionnel : les modèles de propagation en grand sont-ils de même nature, avec les mêmes équations et les mêmes paramètres que ceux mis en évidence en petit à l'échelle de la parcelle ou du versant ?

Parallèlement il semble que les grandes zones aient un degré de signification vis-à-vis du ruissellement très important, certainement plus important que celui des états de surface élémentaires.

NÉCESSITÉ DE PLUSIEURS ÉCHELLES

Ces essais montrent la difficulté de ne travailler qu'avec un seul type d'échelle de détection et de processus, l'additivité des ruissellements entre états de surface et bassin versant n'étant pas acceptable systématiquement.

Ainsi la caractérisation de l'écoulement de zones particulières ne peut être définie par les seuls états de surface. On rejoint ici une caractérisation de l'écoulement global sur des zones de taille intermédiaire entre la parcelle élémentaire et le bassin, ce qui est appelé couramment *hydrologie de versant*. Peu de références existent sur les productions de telles unités au Sahel, sauf peut-être sur de grandes parcelles de cultures. D'où l'utilité du développement de campagnes de mesures sur versants. Actuellement un certain nombre d'expérimentations de terrain vont dans ce sens, car l'arrivée des outils de description spatiale demandent ces références intermédiaires pour caractériser complètement l'ensemble des échelles au niveau des processus.

La *raison de l'approche spatiale* est que, cette nouvelle approche se préoccupant de sous-parties des bassins versants (vus désormais dans leurs particularités) doit, pour être utilisée et valorisée, être accompagnée de mesures de terrain à l'échelle de ces sous-bassins : les techniques de télédétection donnent une nouvelle vision du terrain, qui doit, pour être pleinement valorisée, être accompagnée de *nouvelles mesures au sol sur des zones de tailles identiques à celles des objets observés*.

BIBLIOGRAPHIE

- ALBERGEL J., 1987. Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso ; du mètre carré au kilomètre carré. Étude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. Orstom. Études et thèses. 341p.
- ALBERGEL J., BERNARD A., DACOSTA H., DUBÉE G., PÉPIN Y., SAOS J.L., 1991. Projet pilote *Siné Saloum*. Bas-fonds de Thyssé Kaymor. Rapport de synthèse : hydrologie-hydrogéologie / Programme CEE DG XII. 33p.
- ASSELIN J., VALENTIN C., 1978. Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. in *Cahier Orstom, série hydrologie*. vol XV ; N°4 : 321-350.
- CASENAVE A., VALENTIN C., 1989. Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. Éditions de l'Orstom, collection didactiques. Paris. 226 p.
- COLLINET J., 1985. Hydrodynamique superficielle de quelques types de sols du Sahel africain. Comparaison des données fournies par 2 dimensions de parcelles de simulation de pluie. in journées hydrologiques de l'Orstom. Montpellier 1985.
- GUILLOBEZ S., ZOUGMORE R., 1991. Étude du ruissellement et de ses principaux paramètres à la parcelle (Saria). in Séminaire international Gestion agroclimatique des précipitations, Bamako 12.1991.
- KLEIN J.C., 1967. Étude hydrologique des bassins versants représentatifs dans le sud-est de la Haute-Volta. Région de Manga. rapport définitif 1963-65. Orstom.
- LAMACHÈRE J.M., 1988. Étude hydrologique des plaines de Niena Dionkelé et Foullasso Lelasso. Tome 8. Orstom Ouagadougou. 172-387
- LAMACHÈRE J.M., ESTÈVE M., 1993. Caractérisation du milieu et modélisation hydrologique. Projet FAO-CIEH-Orstom-Cemagref.
- LAMACHÈRE J.M., PUECH C., 1992. Télédétection et régionalisation de l'aptitude au ruissellement et à l'infiltration des sols en Afrique sahélienne et nord soudanienne. Journées hydrologiques Orstom.

- MOLINIER M., LEPRUN J.C, AUDRY P., 1990. Effet d'échelle observé sur le ruissellement dans le Nordeste brésilien. in *Seminfor 4*, 4èmes journées séminaire informatique de l'Orstom. Brest. 95-104.
- PLANCHON O., 1990. Transfert d'échelle et étude des écoulements de surface sur une pente. in *Seminfor 4*, 4èmes journées séminaire informatique de l'Orstom. Brest. p 95-104
- PUECH C., 1993. Détermination des états de surface par télédétection pour caractériser les écoulements des petits bassins versants. Application à des bassins versants en zone méditerranéenne et en zone tropicale sèche. Thèse, Université Joseph Fourier, Grenoble I, 217p.
- RODIER J., 1992. Du simulateur de pluie aux bassins représentatifs sahé-liens. Éditions Orstom, 76p.
- SMAOUI, 1987. Étude hydrologique de 2 bassins versants du nord Togo. Estimation de la crue décennale par la méthode de simulation de pluie. Orstom. Lomé.
- TAUER W., 1992. Remote sensing and geographical information systems for determining potential runoff irrigation sites in the Sahel zone. Institut für Wasserbau und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe, Karlsruhe. 120 p.
- VALENTIN C., 1990. Les états de surface des bassins de Thyssé Kaymor (Sénégal). Programme CEE-Cirad TS2A 0017 F CD, 10p.