

D'Oursi à Gagara : Transposition d'un modèle de ruissellement dans le Sahel (Burkina Faso)

Jean ALBERGEL (1), Pierre CHEVALLIER (2)
Bernard LORTIC (3)

RÉSUMÉ

Une modélisation des crues avait été réalisée sur le bassin versant de Polaka (mare d'Oursi, Burkina Faso, CHEVALLIER et al., 1985) en utilisant le modèle à discrétisation spatiale (GIRARD et al., 1981) dans lequel les nouvelles techniques de la télédétection et de la simulation de pluies avaient été introduites. La même méthode de modélisation a été appliquée aux bassins de Gagara situés à une quarantaine de kilomètres à l'est. La cartographie des états de surface par télédétection satellitaire est faite en utilisant les mêmes critères qu'à Polaka. Les fonctions de production établies à Polaka pour différents états de surface à partir des résultats de simulation de pluies sur parcelles ont été appliquées sans aucune adaptation. La reconstitution des hydrogrammes de crues obtenue sur un petit pas de temps est tout à fait acceptable. Une simulation permet d'établir les hydrogrammes d'une crue d'étude pour différents états d'humectation du sol.

MOTS-CLÉS : Modélisation à discrétisation spatiale – Télédétection – Simulation de pluie – Crue d'étude – États de surface – Sahel – Ruissellement.

ABSTRACT

FROM OURSI TO GAGARA : TRANSPOSITION OF RUNOFF MODEL IN THE SAHEL (BURKINA FASO)

Rainfall runoff modelling using a spatially discrete model (GIRARD et al., 1981) was carried out on the Polaka basin (Mare d'Oursi, Burkina Faso) in 1985 (CHEVALLIER et al.), based on remote sensing data of the land cover and simulated rainfall measurements. The same techniques were applied to the modelling of the Gagara basin, located a few tens of kilometres east of Polaka. The landcover mapping was performed using the same criteria as those used over Polaka. The production functions based on the simulated measurements over various types of plots were used without any upgrading. The computed flood hydrographs at small time intervals proved satisfactory. A single simulation permits one to compute the flood hydrographs for various initial soil moisture values.

KEY WORDS : Distributed model – Remote sensing – Rainfall simulation – Design flood – Types of plots – Sahel – Surface runoff.

INTRODUCTION

L'étude hydrologique des bassins versants de la Mare d'Oursi au Burkina Faso (CHEVALLIER *et al.*, 1985) marque une étape dans la connaissance du régime sahélien. Pour la première fois en effet un dispositif expérimental a permis, avec six années d'observations, de définir les facteurs conditionnels du ruissellement. Le rôle prépondérant des états de surface dans les transferts hydriques à l'interface sol-atmosphère (COLLINET et VALENTIN, 1979) a été confirmé et une modélisation de l'écoulement à petit pas de temps a été réalisée.

(1) ORSTOM, Centre ORSTOM de Dakar Hann, BP 1386 Dakar.

(2) ORSTOM, Laboratoire d'Hydrologie, Centre ORSTOM de Montpellier, BP 5045, 34032 Montpellier.

(3) Laboratoire d'Informatique Appliquée, Centre ORSTOM, 70-74 route d'Aulnay, 93140 Bondy.

Cette modélisation utilise, d'une part, une cartographie des états de surface réalisée à partir d'une classification multispectrale d'une image LANDSAT et, d'autre part, les relations entre pluie et lame ruisselée obtenues par simulation de pluie.

Une transposition de ce modèle à un autre bassin de la région en utilisant les mêmes paramètres pour le calage de l'image satellitaire et pour la fonction de production est une suite logique à ce travail.

Enfin, et c'est l'objectif fondamental de ce type d'opération, une simulation au travers du modèle à partir d'une averse type permet d'établir les hydrogrammes de crues d'étude pour différents états d'humectation du bassin versant. Par convention, on définit dans la suite la *crue d'étude* comme étant la crue consécutive à une averse décennale intervenant sur le bassin versant, toutes les autres conditions étant moyennes.

« On voit donc poindre pour l'avenir la possibilité d'utiliser sur un bassin non observé un modèle dont la fonction de production n'utiliserait que les données du minisimulateur pour chaque type de couches superficielles du sol ; lesquelles seraient délimitées uniquement par photos satellitaires. » (RODIER, préface de *Pluies et crues au Sahel*, in CHEVALLIER et al., 1985.)

1. MÉTHODES ET DONNÉES

1.1. PRÉSENTATION DU TRAVAIL RÉALISÉ SUR LA MARE D'OURSI

Le modèle à discrétisation spatiale

Ce modèle développé par GIRARD et al. (1981) représente le bassin versant sous forme d'une partition en carrés dont la taille est adaptée à la configuration morphologique et physiographique du bassin. On définit sur ces carrés une fonction de production dont l'objet est de répartir les hauteurs de précipitation entre évapotranspiration, ruissellement et infiltration. Cette fonction de production est définie pour chaque *état de surface* et a été directement déduite de résultats obtenus sur parcelles expérimentales avec un simulateur de pluie (CASENAVE, 1982, CHEVALLIER et al., 1986).

Elle se présente sous la forme :

$$Lr = aPu + bIPA + cPuIPA + d$$

où : Lr , lame ruisselée ; Pu , pluie utile ; IPA , indice des précipitations antérieures ; a, b, c, d , constantes définies pour un état de surface par la simulation de pluie.

Cartographie des surfaces et télédétection satellitaire

La région sahélienne est particulièrement propice à la constitution d'une base de données d'occupation du sol : la visibilité est très bonne, les paysages sont nettement diversifiables et la densité de végétation couvrante est faible.

Le traitement d'image a consisté essentiellement en une dégradation de l'information par un regroupement en 10 *lots* (procédure LOTERIE), correspondant à des plages de même signification radiométrique. La comparaison avec une *vérité-sol* permet d'identifier sous un terme qualitatif (*thème*) chacun de ces lots :

1. Sables vifs	6. arènes, sables grossiers
2. Buttes	7. Pellicule indurée
3. Altération avec cuirasse	8. Sables fixés, cordons dunes
4. Blocaille de roches diverses	9. Végétation
5. Epandage gravillonnaire	10. Mare

Résultats

Les coefficients a, b, c et d de la fonction de production ont été établis pour chacune des dix classes et introduits dans le modèle. Une application aux crues du bassin versant de Polaka (9,14 km²) a été réalisée pour un pas de temps de 36 minutes (1/40 jour) avec un certain succès sur les trois années 1978, 1979 et 1980. Des hydrogrammes de crues d'étude ont pu être reconstitués pour différents états d'humectation.

1.2. LES BASSINS VERSANTS DE GAGARA

Le marigot de Gagara Ouest est un affluent de rive gauche du Gorouol, lequel après avoir reçu à droite le Goudébo et à gauche le Béli, draine depuis Yatakala jusqu'au Niger l'ensemble des eaux de la région du Nord Dori.

Le choix de ces deux bassins versants adjacents pour opérer la transposition du modèle mis au point à Polaka se justifie non seulement par leur proximité de la Mare d'Oursi (40 km, même scène LANDSAT), mais aussi par l'existence de nombreux bassins analogues dans l'ensemble du Sahel (fig. 1).

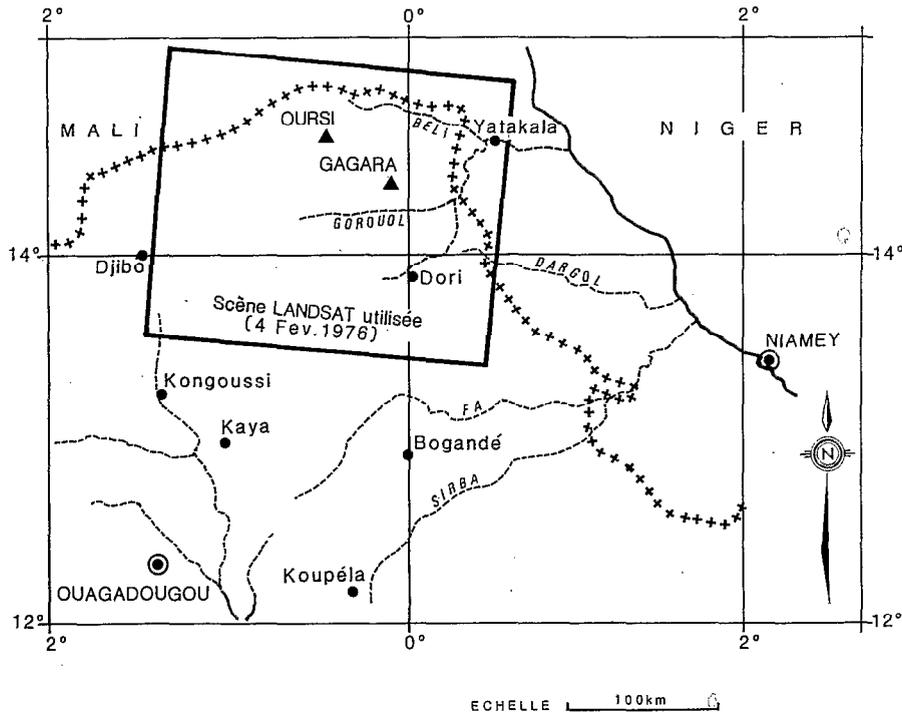


FIG. 1. - Nord-Est Burkina Faso. Situation des bassins versants de la Mare d'Oursi et de Gagara

La morphologie externe de ces bassins est relativement homogène. Une plaine argilo-limoneuse couverte de gravillons et cailloutis est limitée en amont et en aval par deux systèmes dunaires. Le remaniement est à l'origine des petits ergs de sables vifs et d'épandages sableux sur de larges surfaces. Sur la ligne de partage des eaux au nord et à l'ouest se dressent quelques pointements rocheux d'une vingtaine de mètres d'altitude. Il s'agit, comme à Polaka, de formations en boules (granito-gneiss avec filons de quartzites). Au pied de ces éminences, la pente assez forte favorise le ruissellement. Les ravines d'érosion qui prennent naissance au pied de ces pointements rocheux se réunissent en thalwegs au lit bien marqué. Les marigots ont un cours sinueux ; de faux bras s'en détachent pour former de petites mares marquées par une couronne d'épineux. Sur la plaine de petites zones dépressionnaires donnent des marécages en saison des pluies où l'argile s'accumule. La végétation décrite comme abondante (tant la strate ligneuse qu'herbacée) dans les années 50 est aujourd'hui très réduite. Quelques acacias soulignent les marigots et le tour des mares ; quelques épineux poussent sur les placages sableux.

On retrouve sur ces bassins les grandes unités morphologiques du bassin de Polaka et une végétation de bas-fond tout à fait semblable. La seule différence notable est la disposition des sols en fonction de la topographie : l'installation du système dunaire donne en haut de pente des zones plus perméables qu'en aval.

Le tableau I donne les principales caractéristiques des bassins de Gagara, comparées à celles de Polaka :

TABLEAU I

	Gagara Est	Gagara Ouest	Polaka
coordonnées géographiques	14° 28 N 0° 13 W	14° 28 N 0° 13 W	14° 35 N 0° 26 N
superficie (km ²)	35.0	24.3	9.14
ind. de compacité	1.18	1.24	1.19
altitude (m) max	295	350	402
min	270	285	339
ind. pente glob. (m/km)	2.9	3.5	8.1

1.3. TRANSPOSITION DU MODÈLE

Un découpage automatique des bassins versants de Gagara en carreaux de 100 pixels (100 × 0,056 × 0,079 km = 0,44 km²) a été réalisé. Pour les contours des bassins comme pour le tracé du réseau hydrographique, les grandes mailles ont été subdivisées en 4 sous-mailles de 25 pixels (0,11 km²). Nous obtenons ainsi la discrétisation en mailles représentées à la figure 2.

Pour chacune des 314 mailles qui définissent les deux bassins versants il a été possible d'établir l'histogramme des pixels de chaque lot (cf § 1.1). L'ensemble de ces histogrammes forme le fichier des données de surface des bassins. A ce fichier on associe celui des altitudes par maille et celui du sens d'écoulement d'une maille à l'autre (en fonction de la topographie et du réseau hydrographique principal) pour obtenir le fichier des données physiographiques des bassins. Le tableau II récapitule par thème les surfaces occupées pour chaque bassin. Les superficies obtenues par report du contour des bassins sur l'image LANDSAT sont très proches de celles planimétrées sur les cartes.

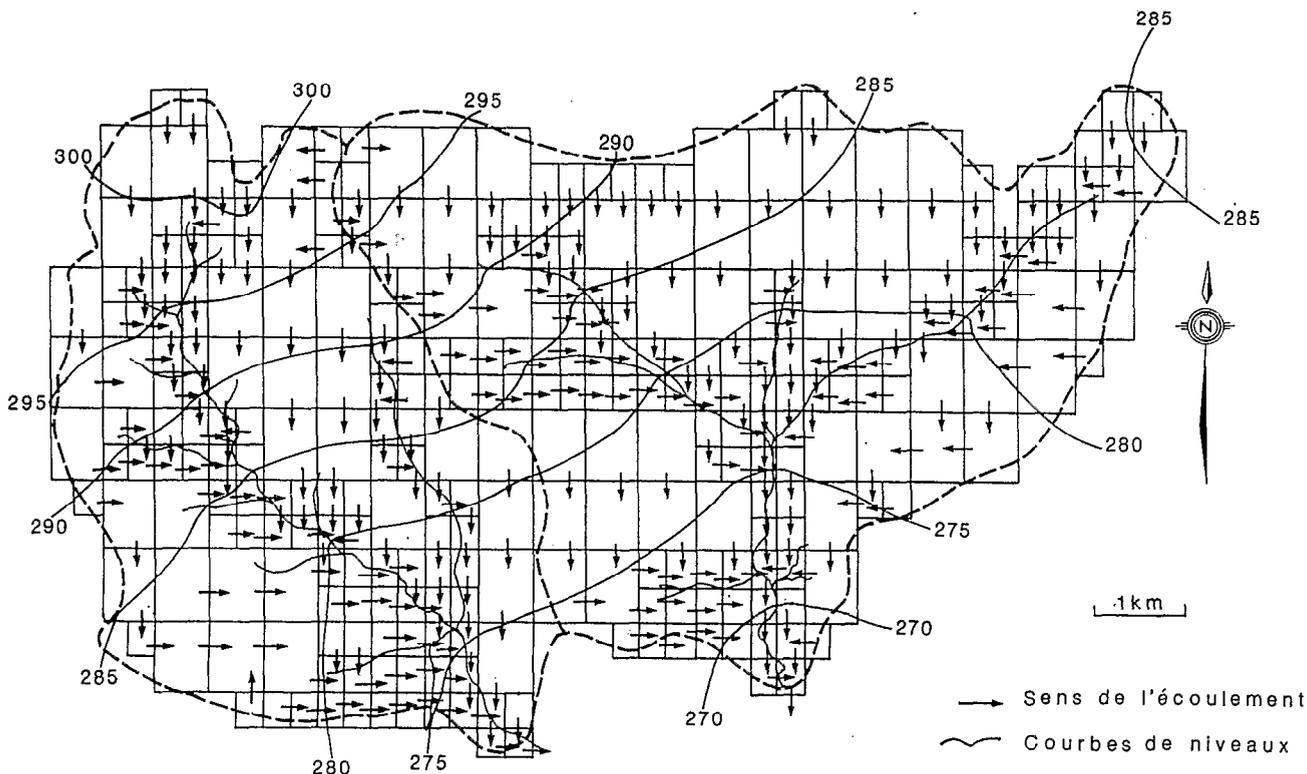


FIG. 2. - Discrétisation des bassins versants de Gagara

TABLEAU II

Thème de surface	Surface représentée sur le bassin-est km ²	Surface représentée sur le bassin-ouest km ²
1. sables vifs	0,94	0,58
2. buttes	0	0
3. altération de cuirasse	0	0
4. blocaille de roches diverses	0	0,01
5. épandage gravillonnaire	4,18	2,61
6. arènes, sables grossiers	13,29	12,77
7. pellicules indurées	9,03	5,16
8. sables fixés, cordons dunes	4,60	2,88
9. végétation	2,56	1,64
10. mare	0	0
TOTAL	34,60	25,65

2. RÉSULTATS

2.1. CARTOGRAPHIE DES ÉTATS DE SURFACE

La carte obtenue à partir de l'analyse de l'image satellite (fig. 3) est à rapprocher de celle établie au sol (VALENTIN, 1986). Les 13 thèmes de surfaces mis en évidence par une cartographie au sol sont regroupés en 7 thèmes sur la cartographie *satellite*. Les limites des grandes unités cartographiques sont à peu près respectées et les correspondances entre *thèmes* de l'image satellitaire calée sur les bassins de la Mare d'Oursi et ceux de la carte au sol sont celles du tableau III.

TABLEAU III

Unités définies sur la carte au sol (VALENTIN, 1986)	Unités définies sur l'image <i>satellite</i> calée sur une vérité sol réalisée à OURSI
Argile à fentes fines et grandes termitières Argile à fentes fines sans termitières Argile à fentes larges	Végétation de bas fond
Surface nue (qqcs microbuttes sabl.) Surface sableuse à taches nues	Pellicule indurée
Surface caillouteuse Surface gravillonnaire à taches nues	Arène, sable grossier
Dunes à taches nues	Sable vif
Association de surface gravillonnaire et de dune Surface gravillonnaire à cailloux Surface nue avec quelques cailloux	Épandage gravillonnaire
Dune cultivée	Sable fixé, cordons dunes
Inselberg	Blocaille de roches diverses

On remarquera que les thèmes buttes (*gabbros, roches vertes*), altération de cuirasse et eau libre (*mare*) non présents sur les bassins de Gagara ne sont pas apparus (aucun pixel avec ces numéros de lot).

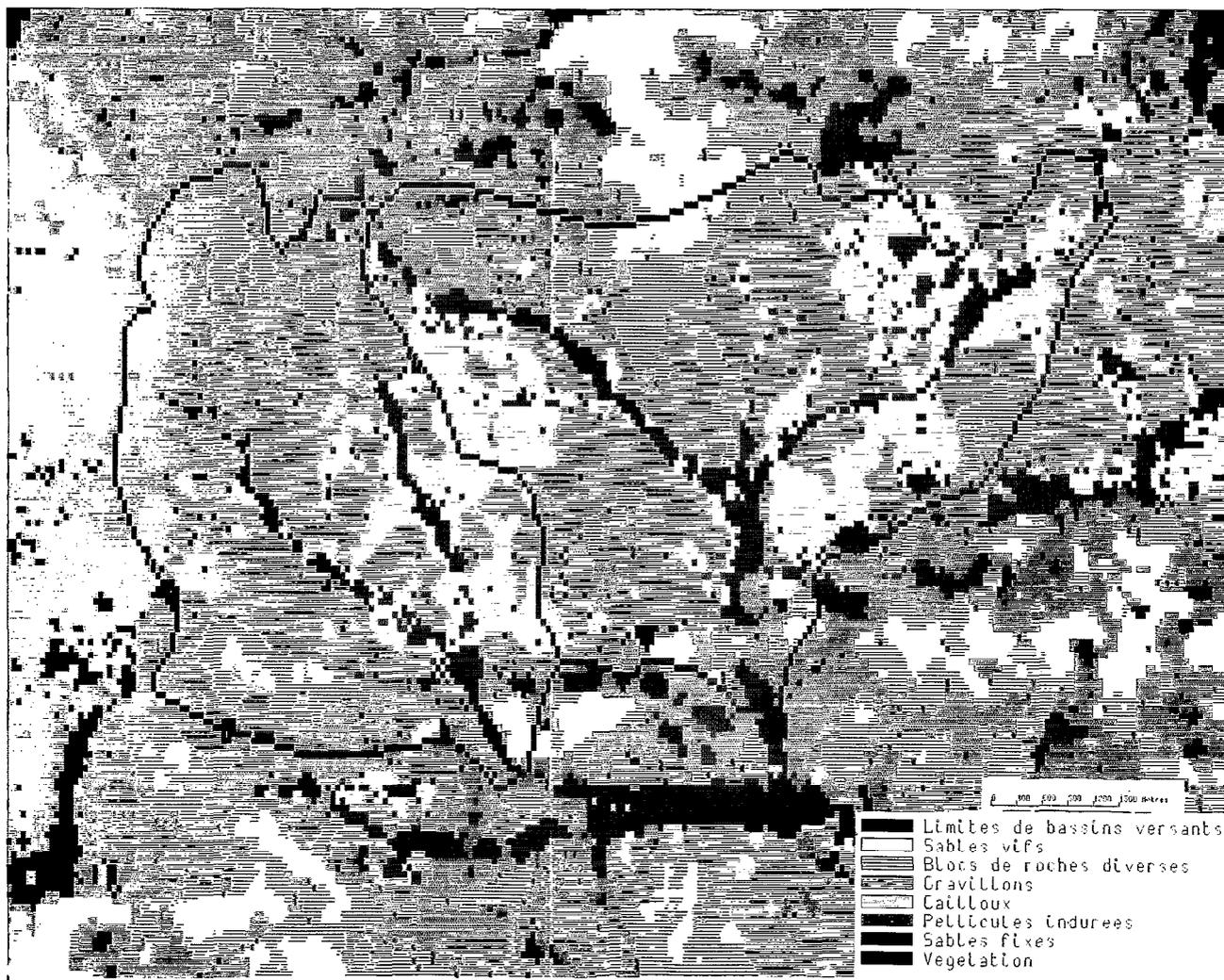


FIG. 3. - Différenciation des états de surface

Les légendes établies pour la réalisation de la cartographie à partir de l'image LANDSAT sur Oursi correspondent assez bien aux légendes établies par VALENTIN (1986) sur la carte au sol excepté pour les surfaces caillouteuses qui ressortent sous la légende impropre : *arène et sable grossier*. La différenciation entre les unités par les réflectances radiométriques semble se faire sur un critère de rugosité apparente et de présence ou absence de végétation plutôt que sur un critère de nature du sol.

Les surfaces caillouteuses cartographiées par VALENTIN correspondent à des versants sans végétation avec *pavage* de cailloux libres ou enchassés dans la pellicule de surface. La rugosité de ces surfaces se rapproche sensiblement des arènes qui bordent les granites en boules des bassins versants de la Mare d'Oursi.

2.2. MODÉLISATION DES HYDROGRAMMES DE CRUES

La fonction de production correspondant à chaque thème de surface a été reprise dans le référentiel des relations donnant la *lame ruisselée en fonction de la pluie* obtenu sur les parcelles de simulation de pluie de la Mare d'Oursi. Les paramètres de la fonction de transfert ont été adaptés aux dimensions des bassins de Gagara.

Le modèle à petit pas de temps a été alors appliqué, avec comme données d'entrée les averses enregistrées à six postes pluviographiques installés sur les bassins de Gagara pendant la saison des pluies 1985. A chacun de ces six postes a été attribuée une zone d'influence sur le principe d'un découpage de Thiessen.

Le tableau IV compare les volumes écoulés observés et calculés sur les deux bassins pour l'année 1985.

TABLEAU IV

Bassin	Volume écoulé observé 10 ³ m ³	Volume écoulé calculé 10 ³ m ³
GAGARA Est	1535	1470
GAGARA Ouest	1185	1176

La figure 4 présente les hydrogrammes observés et calculés de la plus forte crue observée (5 septembre 1985).

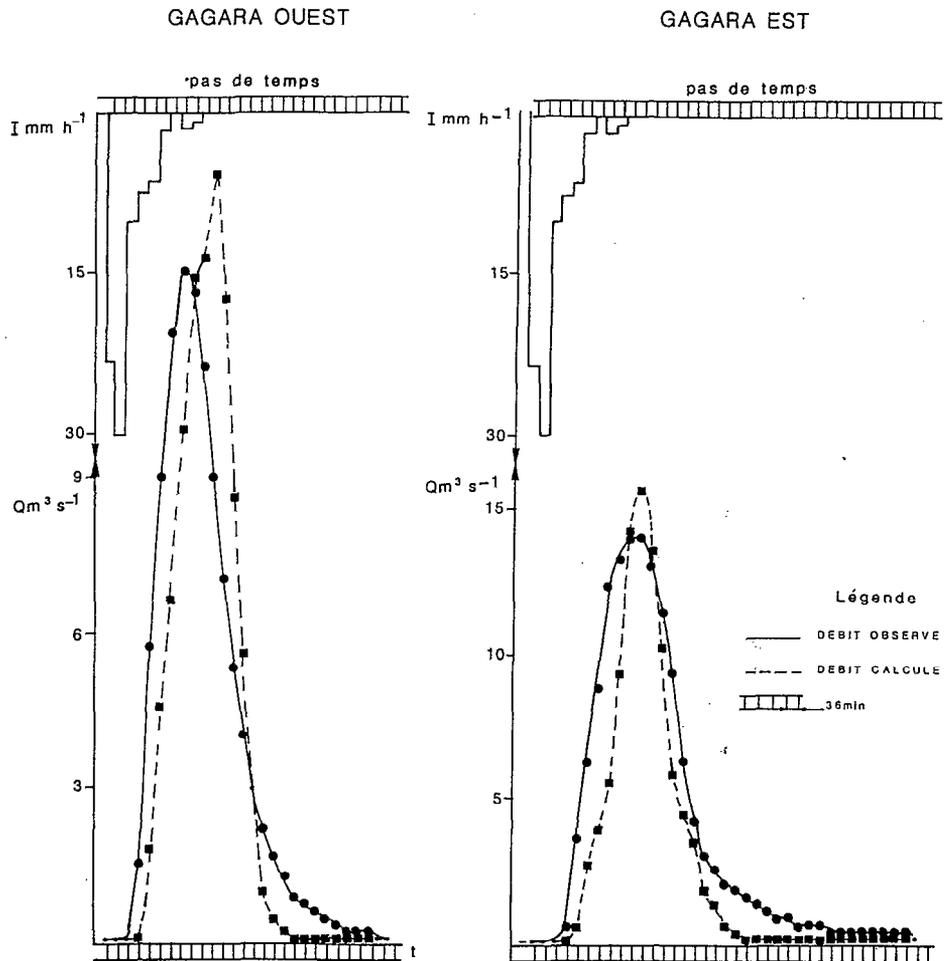


FIG. 4. - Modélisation des écoulements à partir de l'image LANDSAT. Crue du 5/09/1985

TABLEAU V

Crue du	Lr obs mm	Lr calc mm	Qx obs m ³ s ⁻¹	Qx cal m ³ s ⁻¹	Qx/Vr obs 10 ⁻⁹ s ⁻¹	Qx/Vr cal 10 ⁻⁹ s ⁻¹
GAGARA EST						
18 06 85	1,5	1,4	4,72	4,52	8,97	8,60
01 07 85	3,2	5,1	9,80	13,5	8,82	7,55
06 07 85	0,3	0,2	0,74	0,19	7,34	9,05
11 07 85	5,1	2,6	13,4	8,79	7,49	6,21
20 07 85	1,0	0,6	2,38	1,78	6,94	6,85
26 07 85	0,1	0,0	0,04	0,00	-	-
03 08 85	4,4	1,2	7,04	3,45	5,54	8,38
10 08 85	1,2	2,7	4,48	9,24	11,04	9,60
12 08 85	4,0	8,5	12,2	30,7	8,71	10,26
13 08 85	3,4	2,8	6,27	3,82	5,24	6,20
15 08 85	0,4	0,4	0,91	1,45	6,81	7,56
17 08 85	1,8	1,0	3,35	4,01	5,35	6,22
26 08 85	7,3	12,1	13,01	30,1	5,11	7,09
05 09 85	9,3	6,3	15,18	16,8	4,65	7,65
14 09 85	1,2	1,0	2,15	2,59	5,25	8,95
GAGARA OUEST						
01 07 85	3,6	6,6	10,5	12,4	12,18	7,66
03 07 85	2,7	4,2	9,56	9,05	14,79	8,70
11 07 85	2,2	2,1	5,66	4,71	10,40	9,17
20 07 85	1,0	0,8	2,95	3,04	11,56	16,04
26 07 85	1,7	1,1	4,71	4,41	14,46	18,83
04 08 85	2,5	2,6	5,03	6,49	8,52	10,38
11 08 85	0,8	0	1,61	0,0	-	-
12 08 85	6,2	3,9	14,6	7,02	9,62	9,93
13 08 85	4,3	3,0	7,03	5,47	6,71	7,56
15 08 85	0,7	0,9	1,38	1,87	7,92	8,52
17 08 85	3,0	2,7	6,27	4,89	8,68	7,62
26 08 85	6,6	11,9	11,8	17,3	7,43	5,98
05 09 85	9,4	8,8	14,2	16,1	6,24	7,60
14 09 85	0,2	0,2	0,11	0,82	22,63	17,85

Lr obs. = lame ruisselée observée ;
 Lr calc. = lame ruisselée calculée ;
 Qx = Débit maximum moyen sur le pas de temps ;
 Vr = Volume ruisselé.

La comparaison entre crues observées et calculées (Tabl. V) montre que la forme des hydrogrammes et les volumes de crues sont respectés. La droite de régression entre les volumes ruisselés observés et ceux calculés par le modèle est très proche de la première bissectrice :

$$Lrc \approx 1,0276 Lro - 0,032 \quad (R = 0,775 \text{ pour } 29 \text{ couples de valeurs}).$$

où : Lrc = lame ruisselée calculée
 Lro = lame ruisselée observée
 R = coefficient de corrélation

Les comparaisons crue par crue des coefficients de forme (rapport du débit de pointe sur le volume ruisselé) font apparaître une légère dérive du modèle vers une surestimation du débit de pointe pour les plus fortes crues, même si les ordres de grandeurs sont respectés.

La reconstitution des débits de pointe est donc plus critiquable.

Les différences peuvent s'expliquer essentiellement par les deux raisons suivantes :

- Le pas de temps choisi (36 minutes) est important en regard du temps de montée des crues et représente mal les corps d'averses.
- La qualité des données de calcul n'est pas parfaite : précision de la courbe d'étalonnage, calage en temps des pluviogrammes.

2.3. PRÉDÉTERMINATION DE CRUES D'ÉTUDE

Comme pour Polaka nous avons cherché à simuler à partir de cette modélisation les hydrogrammes de crues d'étude.

Il a été montré qu'après la hauteur de pluie le second facteur explicatif du ruissellement est l'état d'humectation des sols représenté par l'indice des précipitations antérieures IPA (CHEVALLIER *et al.*, 1985). Il nous a paru intéressant de simuler le comportement de ces bassins pour une averse décennale intervenant pour toute une gamme possible d'humectations du sol. Une averse-type de 68 mm respectant les conditions intensité-durée-fréquence décennales a été soumise au modèle pour les indices de précipitations antérieures suivants 0, 10, 30 et 60 mm.

Les paramètres de crues résultantes sont consignés dans le tableau VI.

TABLEAU VI

Bassin	Paramètre de la crue	IPA = 0	IPA = 10	IPA = 30	IPA = 60
GAGARA EST	Lr mm	46,6	48,3	52,7	55,4
	Qmx (m ³ s ⁻¹)	99,1	101,9	112,5	125,4
	tm (min)	288	288	288	288
	tb (min)	648	648	648	648
GAGARA OUEST	Lr mm	48,5	50,3	54,4	56,7
	Qmx (m ³ s ⁻¹)	81,1	84,2	91,3	101,6
	tm (min)	252	252	252	252
	tb (min)	540	540	540	540

Lr, lame ruisselée ; Qmx, débit de pointe ; tm, temps de montée ; tb, temps de base.

Les variations de la lame ruisselée et du débit de pointe, de l'état le plus sec à l'état le plus humide (d'ailleurs tout à fait exceptionnel), doivent mettre en garde le projecteur qui utilise la notion de crue d'étude, sur les dangers que représentent les conditions moyennes que l'on attache à sa définition.

Ces estimations appellent plusieurs commentaires :

- Le volume de la crue d'étude estimé par cette modélisation pour un IPA = 0 mm est très voisin de la prédétermination réalisée à partir de l'extrapolation d'une courbe moyenne ajustée sur les observations (tabl. VII).

TABLEAU VII

Lame ruisselée estimée	ajustement d'une courbe moyenne	Modélisation IPA = 0 mm
GAGARA EST	45,7 mm	46,6 mm
GAGARA OUEST	49,6 mm	48,5 mm

- Les rapports *débit maximum/lame écoulée* des crues prédéterminées ont des valeurs moyennes comparables à celles des crues observées. Mais on remarque pour les deux crues les plus importantes (26 août 85 et 5 septembre 85), qui ont débordé du lit mineur, que ce rapport est bien plus faible que sur l'ensemble des autres crues. Il est probable que l'affaiblissement du débit de pointe pour des crues débordant du lit mineur et plutôt en fin de saison des pluies soit en rapport avec le remplissage en amont de zones de stockage et avec un laminage de la crue dû à la poussée de la végétation.

- D'autre part, si l'on reportait les débits de pointe estimés sur la courbe *hauteur-débit* en l'extrapolant, on obtiendrait une cote à l'échelle bien supérieure à celle de débordement du lit des marigots ; et on assisterait dans ce cas à des détournements d'une partie du débit dans des dépressions du système dunaire qui barre l'aval des deux bassins.

- Les débits maxima d'une telle crue seraient laminés et une estimation plus raisonnable serait peut-être obtenue en multipliant le volume prédéterminé par les rapports *débit maximum/lame écoulée* obtenus sur les crues du 5 septembre 85 :

Marigot est : 80 m³ S⁻¹
 Marigot ouest : 70 m³ S⁻¹

Enfin les coefficients de ruissellement sont particulièrement élevés (supérieurs à 50 %). Cela facilite évidemment l'application d'une telle méthode.

CONCLUSION

La transposition des résultats obtenus sur un bassin versant à un autre bassin versant voisin apparaît comme possible avec une assez bonne précision par cette méthode de modélisation. Il faut cependant formuler quelques mises en garde :

– Le Sahel est particulièrement bien adapté à ce type de transfert avec ses paysages bien typés et un nombre relativement réduit d'états de surface parfaitement différenciables par analyse multispectrale d'images satellitaires.

– La transposition a été réalisée dans une zone géographique réduite en utilisant une seule scène satellitaire. Il est vraisemblable que pour des images différentes et/ou pour des dates différentes, des difficultés pour le regroupement des pixels par thèmes identiques apparaîtraient.

Si un tel transfert surprend par la relative bonne qualité du résultat obtenu, il ne dispense cependant pas d'une connaissance, la meilleure possible, *de visu* du terrain. L'association d'une visite *critique* avec cette technique de modélisation à partir d'images satellitaires déjà traitées dans la région permet une prédétermination correcte de la crue d'étude sur un bassin peu connu.

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction, le 4 mai 1987

BIBLIOGRAPHIE

- CASENAVE (A.), 1982. – Le minisimulateur de pluie. Condition d'utilisation et principe de l'interprétation des mesures. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. XIX, n° 4-1982 : 207-227.
- CHEVALLIER (P.), CLAUDE (J.), POUYAUD (B.), BERNARD (A.), 1985. – Pluies et crues au Sahel. Hydrologie de la Mare d'Oursi (Burkina Faso) (1976-1981). *Trav. et Doc. ORSTOM* n° 190. Paris 251 p.
- CHEVALLIER (P.), LOINTIER (M.), LORTIC (B.), 1986. – Water levels of a Sahelian Lake (Mare d'Oursi, Burkina Faso). *Hydrologic Applications of Space Technology* (Proceedings of the Cocoa Beach Workshop, Florida, August 1985). *IAHS Publications* n° 160 : 99-107.
- COLLINET (J.), VALENTIN (C.), 1979. – Analyse des différents facteurs survenant sur l'hydrodynamique superficielle. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XVII, n° 4 : 283-328.
- GIRARD (G.), LEDOUX (E.), VILLENEUVE (J.P.). – Le modèle couplé. Simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains dans un système hydrologique. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, n° 4-1981.
- VALENTIN (C.), 1986. – Carte des états de surface des bassins versants de Gagara. ORSTOM Adiopodoumé, 1 carte au 1/50 000.