

Etude du ruissellement au Nord Cameroun Transfert de la parcelle au bassin versant

Bernard THEBE (1), Roger PONTANIER (2)

RÉSUMÉ

Les fonctions de production du ruissellement établies sur parcelles élémentaires, suivies en mode synchrone sous pluie simulée, et en mode diachrone sous pluies naturelles, ont été transposées à l'échelle du champ (3 000 m²) et du bassin versant (18,1 km²). L'étude sur le « Champ » a permis la décomposition de l'hydrogramme global de crue en hydrogrammes partiels, représentatifs des deux aires participantes du bassin. Les volumes ruisselés sur chaque aire participante ont pu être calculés par les fonctions de production établies sous pluie simulée.

MOTS-CLÉS : Cameroun — Bassin versant représentatif et expérimental — Ruissellement — Végétation — Transfert d'échelle — Crue.

ABSTRACT

RUNOFF STUDY IN NORTH CAMEROON: EXTENSION FROM PLOT TO CATCHMENT SCALE

The runoff generation functions are established on one square metre plots. The results obtained based on simulated and natural rainfall on the plots are extended to the field (3 000 m²) and the catchment (18,1 km²) scale. The field study allows a separation of the global flood hydrograph into two partial hydrographs related to the two participating areas of the field. The runoff volume from each participating area is computed using the generation function derived from the rainfall-simulation experiment.

KEY WORDS : Cameroon — Representative and experimental basin — Runoff — Vegetation — Scale transfer — Flood.

1. PROBLÉMATIQUE

L'extension, à l'ensemble du bassin versant, de résultats de ruissellement obtenus par des mesures ponctuelles et instantanées est un problème délicat auquel sont confrontés les scientifiques et les aménagistes comme le soulignent SHARMA *et al.*, (1980), WALLING (1983). La principale contrainte à cette extension est due à l'hétérogénéité spatiale et à l'échelle de perception des résultats. Par ailleurs, SIVAPALAN et WOOD (1986), montrent que si le ruissellement est fortement corrélé à la pluie en début d'averse, ce sont les propriétés des sols qui, par la suite, conditionnent en grande partie celui-ci.

Le problème posé est donc de savoir : comment appréhender l'étude des comportements hydrauliques de l'ensemble des différentes unités élémentaires de milieu naturel composant un bassin versant ? comment reconstituer à partir de cette démarche analytique le ruissellement à l'exutoire du bassin ? et éventuellement construire des modèles prédictifs de ruissellement.

Aussi, depuis quelques années, de nombreux auteurs s'intéressant à ce problème, ont adopté des techniques d'étude sous pluie simulée, faisant intervenir simultanément le ruissellement et l'infiltration. Celles-ci permettent, en un temps très court, de caractériser sur de nombreux sites les principaux paramètres conditionnant l'infiltration, le ruissellement,

(1) Hydrologue ORSTOM, Centre ORSTOM, av. du Val Montferrand B.P. 5045, 34032 Montpellier Cedex.

(2) Pédologue ORSTOM, Mission ORSTOM, 18 av. Charles-Nicolle - 1002 Tunis Belvédère, Tunisie.

voire l'érodibilité des terres. Parmi ces auteurs, on peut citer : MUSGRAVE et HOLTAN (1964), LAFFORGUE et NAAH (1976), CASENAVE (1981-1982), CHEVALLIER (1982), PONTANIER *et al.*, (1985), ALBERGEL (1987), THEBE (1987), CASENAVE et VALENTIN (1988).

Concernant l'extension des observations ponctuelles aux bassins versants, deux méthodes sont couramment usitées : (i) la plus simple, consiste, sur la base de fonctions de production établies sur parcelles, à transposer linéairement, après calage, à l'ensemble du bassin, le ruissellement de chaque aire contributive délimitée par une cartographie thématique (THEBE, 1987 ; ALBERGEL, 1987) ; (ii) une autre, plus sophistiquée, met en œuvre un modèle à discrétisation spatiale (GIRARD *et al.*, 1981) qui utilise les fonctions de production de chaque élément d'un maillage, ainsi que des fonctions de transfert (CHEVALLIER *et al.*, 1985 ; ALBERGEL, 1987).

Ainsi nous nous proposons ici, en utilisant une étude de cas réalisée dans le Nord-Cameroun, de montrer comment l'utilisation des techniques d'étude sous pluie simulée basée sur la connaissance des sols, et sur l'organisation des couvertures pédologiques et des paysages, permet grâce à des modèles simples, après calage sur des données obtenues en conditions naturelles sur une courte période, de transférer les résultats de ruissellement du m², au champ de 3 000 m² puis au bassin versant de 18,1 km².

2. MATÉRIEL ET MÉTHODE

2.1. CHOIX D'UN BASSIN VERSANT REPRÉSENTATIF

L'ensemble des résultats présentés ici provient d'une série d'études pluridisciplinaires effectuées sur le bassin versant de Mouda (18,1 km²), situé à 30 km au Sud de Maroua dans la province de l'extrême Nord du Cameroun. La région est caractérisée par un climat de type soudano-sahélien présentant une saison sèche de 7 mois (octobre à avril) ; les mois de juillet et août concentrent près de 60 % des pluies annuelles qui totalisent 850 mm en moyenne.

C'est la diversité des paysages (formes édaphiques et utilisation des terres) qui a orienté le choix de ce bassin. Celui-ci comporte 15 systèmes écologiques (CCE, 1988), qui peuvent être regroupés en trois grands secteurs écologiques : (i) collines et versants de raccordement des formations vulcano-sédimentaires basiques à sols fersialitiques caillouteux, (ii) glacis couvert à pente douce façonné dans des argiles montmorillonitiques présentant des vertisols plus ou moins dégradés dont certains prennent un faciès « hardé » voire planosolique (BRABANT et GAVAUD, 1985) ; ce secteur est drainé dans sa partie centrale par le lit majeur du mayo Mouda, (iii) pénéplaine sur gneiss et quartzite sur laquelle se développent des sols ferrugineux fragiles et indurés en profondeur. Le paysage est composé de savanes très claires à épineux (*Acacias seyal*, *Balanites aegyptiaca*) ou arborées (*Anogeissus leiocarpus*, *Boswellia dalzielli*). La strate herbacée à base de graminées (*Andropogon gayanus* et *Loudetia togoensis*) n'est représentée que pendant la saison des pluies. Dès décembre, celle-ci brûle, laissant un sol nu, en général très battant jusqu'au début juillet. Les cultures (10 à 15 % de la surface) sont en général pratiquées sur les sols ferrugineux, les sols fersialitiques et les vertisols modaux. Le reste de la surface est soumis à un pâturage intense, et à une cueillette de bois excessive. Actuellement, avec l'intensification de la pression anthropique, on assiste à une raréfaction très importante des espèces ligneuses, à la diminution de la strate herbacée, à des phénomènes d'érosion intense, à une diminution de l'efficacité de l'eau vis-à-vis des végétaux, suite à la dégradation des sols (destruction, tassement, planosolisation) et à la généralisation des pellicules et croûtes de battance, conduisant à une augmentation du ruissellement.

2.2. MÉTHODE

A l'intérieur du bassin de 18,1 km², intégrant lui-même une parcelle de ruissellement de 3 000 m², contrôlée par une station hydrométrique, on a sélectionné sur la base d'une cartographie thématique des sols et des systèmes écologiques, un certain nombre de sites représentatifs des unités physiologiques en insistant surtout sur les aspects de la surface du sol (épipedon et strate herbacée). C'est ainsi que 7 sites ont été retenus :

- Site I Surfaces « hardées » ou planosoliques très battantes ; pratiquement jamais de végétation.
- Site II Vertisols très dégradés : très peu de fentes de retrait ; végétation à base d'annuelles.
- Site III Vertisols modaux non cultivés ; nombreuses fentes de retrait ; végétation à base d'annuelles tardives.
- Site IV Vertisols modaux cultivés, et fersialitiques vertisoliques de haut de glacis ; culture/jachère ; quelques fentes.

- Site V Sols ferrugineux indurés peu épais (30 cm sur cuirasse), sablo-argileux peu structurés. Jachère récente et/ou ancienne. Quelques graminées pérennes et annuelles précoces.
- Site VI Régosol sur matériau argilo-limoneux à nodules calcaires ; surface graveleuse ; annuelles tardives.
- Site VII Colluvions, à évolution fersialitique, de bas de pente. Forte charge caillouteuse ; graminées pérennes.

Sur chacun de ces sites, on a appliqué une série d'averses contrôlées en faisant les deux hypothèses suivantes :

— la dynamique de l'eau dans le sol sous pluie simulée et sous pluie naturelle est la même puisque le mini-simulateur reproduit fidèlement les principaux paramètres des averses naturelles, intensité, hauteur, énergie cinétique des gouttes de pluie ;

— pour s'affranchir des perturbations dues aux pluies naturelles, les expérimentations ont toujours été menées en saison sèche, en considérant que l'influence de la végétation herbacée sur l'infiltration et le ruissellement est liée à sa densité et non à son état physiologique (J. ALBERGEL et B. THEBE, 1987).

Ce type d'expérimentation pose donc un double problème d'échelle de temps :

— au niveau saisonnier : la végétation, quand elle existe, est en phase non active, l'activité mésofaunique est réduite ;

— au niveau de la durée d'expérimentation : la méthode ne permet pas de prendre en compte le développement des herbacées.

Afin de tester la validité des résultats obtenus en saison sèche, dans des conditions assez éloignées de celles de la saison des pluies, il a été mis au point pour trois sites un dispositif de suivi du ruissellement des parcelles de 1 m² ayant servi aux tests de simulation, durant toute une saison des pluies. Ceci a permis de prendre en compte le développement de la végétation herbacée et des facteurs qui lui sont liés (THEBE, 1987).

Sur chacun des sites représentatifs d'un ou plusieurs systèmes écologiques, une fonction de production a été élaborée à partir d'un modèle de type « régression multilinéaire ».

La mise au point de ce modèle comporte trois étapes :

— homogénéisation et critique des données observées sur les trois parcelles de chaque site ;

— expression sous forme de fonction linéaire de la lame ruisselée en fonction des variables les plus significatives ;

— test de signification des coefficients de régression (test de STUDENT).

Dans ce cas d'étude, les variables explicatives du ruissellement sont :

— la hauteur de pluie (Pu en mm) ;

— l'état d'humectation du sol représenté par un indice des pluies antérieures (IK), type KOHLER (CHEVALLIER, 1983).

$$IK_n = (IK_{n-1} + P_{n-1}) e^{-\alpha t}$$

IK_n = indice d'humectation immédiatement avant l'averse (n) ;

P_{n-1} = hauteur de l'averse précédant l'averse considérée ;

t = temps séparant la fin de l'averse de rang (n-1) du début de l'averse considérée ;

(t) = est exprimé en jours et fractions de jours ;

α = coefficient de calage (pris égal à 0,5) ;

— un indice de couvert végétal CV en % (FLORET et PONTANIER, 1982 ; BOURGES *et al.*, 1984).

Le transfert des résultats obtenus sur parcelles de 1 m² au champ et au bassin versant est basé sur la cartographie thématique du bassin sur lequel on veut étendre les résultats.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

3.1. MODÉLISATION DU RUISSÈLEMENT A L'ÉCHELLE DE LA PARCELLE ÉLÉMENTAIRE (1 m²)

3.1.1. Sous pluie simulée

On a réalisé trois campagnes de simulation (12 averses) sur tout ou partie des 21 parcelles. L'homogénéité des données recueillies sur les parcelles d'un même site ayant été vérifiée, nous obtenons les fonctions de production suivantes (THEBE, 1987) :

Site I	$Lrs_1 = 0,91 Pu - 4,21$	$R^2 = 0,941$ (28 observations)
Site II	$Lrs_2 = 0,758 Pu + 0,146 IK - 0,207 CV - 4,57$	$R^2 = 0,816$ (31 observations)
Site III	$Lrs_3 = 0,575 Pu + 0,264 IK - 17,0$	$R^2 = 0,814$ (32 observations)
Site IV	$Lrs_4 = 0,403 Pu + 0,139 IK - 0,230 CV - 6,18$	$R^2 = 0,618$ (32 observations)
Site V	$Lrs_5 = 0,583 Pu + 0,205 IK - 0,135 CV - 8,17$	$R^2 = 0,872$ (32 observations)
Site VI	$Lrs_6 = 0,661 Pu + 0,197 IK - 0,292 CV - 5,47$	$R^2 = 0,900$ (18 observations)

Lrs : lame ruisselée calculée par le modèle simulateur

R^2 : coefficient de détermination multiple.

Les lames ruisselées mesurées après labour manuel de la parcelle n'ont pas été introduites dans le modèle.

L'absence quasi totale de ruissellement sur les surfaces représentées par le site VII ne permet pas l'établissement d'une fonction de production.

Sur le site S I, seule la variable pluie est significative, alors que sur tous les autres sites, le même test (STUDENT, avec un seuil de signification fixé à 1 %) accepte également les variables IK (indice des pluies antérieures) et, à l'exception du site S III, l'indice de couvert végétal CV. Pour le site S I représentatif des « terres hardées », la non-incidence de la variable IK, qui caractérise le « réservoir-sol » dans l'horizon de surface, confirme la faiblesse de l'infiltration dans ces terres et vérifie la description qui en a été faite par BRABANT et GAVAUD (1985).

3.1.2. Reconstitution des lames ruisselées observées sous pluies naturelles

Le « modèle pluie naturelle » a été établi à partir des données recueillies sur trois sites représentatifs suivis durant la saison des pluies 1985, il prend en compte les mêmes variables que le « modèle simulateur » :

- la hauteur de pluie Pu ;
- l'indice des pluies antérieures (IK) ;
- l'indice de couvert végétal (CV). Une estimation de la densité du couvert à différentes dates de la saison des pluies permet de donner à cet indice des valeurs représentatives de l'évolution du couvert herbacé (THEBE, 1987 *op. cit.*).

Après critique des données sur chaque site, les fonctions de production suivantes ont été établies :

Site I	$Lrn_1 = 0,838 Pu - 2,34$	$R^2 = 0,962$ (60 observations)
Site II	$Lrn_2 = 0,541 Pu - 0,103 CV + 0,075$	$R^2 = 0,815$ (82 observations)
Site VI	$Lrn_6 = 0,696 Pu - 3,43$	$R^2 = 0,937$ (96 observations)

Lrn : Lame ruisselée calculée par le modèle pluie naturelle.

L'application du modèle simulateur aux lames ruisselées observées sur chaque site donne le système d'équations :

Site I	$Lro_1 = 0,93 Lrs_1 + 1,34$	$R^2 = 0,960$ (60 observations)
Site II	$Lro_2 = 0,85 Lrs_2 + 0,55$	$R^2 = 0,846$ (82 observations)
Site VI	$Lro_6 = 1,06 Lrs_6 + 1,59$	$R^2 = 0,884$ (96 observations)

où Lr_o = lame ruisselée observée ;

Lr_s = lame ruisselée calculée par le modèle simulateur.

La comparaison des régressions, site par site, dans les deux situations expérimentales, montre :

- sur les sites S I et S VI, les coefficients de régression de la variable Pu sont du même ordre de grandeur ;
- sur le site S II, où se développe une végétation relativement importante au cours de la saison, les coefficients de régression varient sensiblement, la lame ruisselée n'est qu'imparfaitement expliquée dans les deux cas.

On se rend compte que la reconstitution des lames ruisselées par le modèle simulateur est satisfaisante sur les sites S I et S VI dépourvus de végétation ou présentant un couvert très faible. Sur le site S II, les résultats obtenus par les deux modèles sont sensiblement différents.

En conclusion, les écarts de même ordre de grandeur dans la reconstitution des lames ruisselées par les deux modèles sur S I et S VI vérifient la fidélité de la reproduction des averses par le simulateur, ainsi que la non-influence du couvert végétal lorsque celui-ci est faible ; cela avait déjà été signalé par BOURGES *et al.*, (1984) dans les zones

arides tunisiennes. Par contre, il semble dans le cas d'un couvert végétal important ($CV > 30$ à 40%), avec évolution physionomique de la végétation au cours de la saison des pluies, que cette fidélité de reproduction du ruissellement par le modèle simulateur ne puisse être totalement vérifiée.

3.2. LE TRANSFERT DES RÉSULTATS DE LA PARCELLE DE 1 m^2 AU BASSIN VERSANT

Le modèle permettant le transfert des résultats de la simulation de pluie sur 1 m^2 , au bassin versant, consiste en la détermination de la fonction de production du bassin ; celle-ci résulte de la somme pondérée des fonctions de production de chaque unité cartographique :

$$Lr_c = a_1 Lrs_1 + a_2 Lrs_2 \dots + a_m Lrs_m$$

a_1, a_2, \dots, a_m représentent les fractions de superficies occupées par les unités 1, 2, ... m.

À l'échelle de la parcelle (1 m^2), un certain nombre de paramètres ne sont pas pris en considération ; ceci oblige le passage par une fonction de calage des lames ruisselées calculées sur les lames ruisselées observées.

Cette fonction de calage intègre en particulier :

- l'effet de pente qui est quasi inexistant à l'échelle de la parcelle ;
- l'état physionomique de la végétation : sèche pendant les expérimentations sous pluie simulée, active en saison des pluies pendant le suivi du bassin versant ;
- la répartition spatiale des sols représentés par les parcelles, par rapport au réseau de drainage ;
- l'hétérogénéité spatiale de l'averse sur le bassin ;
- les écarts dus à la méthode de mesure de la pluie, qui dans cette région ne sont pas négligeables (P. CHEVALLIER, 1986 ; B. THEBE, 1987, *op. cit.*).

La fonction de calage du bassin est la droite moyenne entre les droites de régression :

$$Lr_c = f(Lr_o) \text{ et } Lr_o = f(Lr_c)$$

Pour toutes les pluies naturelles observées sur le bassin, ayant provoqué un ruissellement, les lames ruisselées ont été reconstituées à partir des valeurs de P_u (pluie moyenne), IK (indice des pluies antérieures), CV (indice de couvert végétal).

Pour l'ensemble des résultats des deux campagnes 1984-1985, nous avons obtenu la fonction de calage suivante :

$$Lr_o = 1,01 Lr_c - 0,185 \quad r^2 = 0,96 \quad 83 \text{ observations}$$

3.2.1. Application de la méthode au bassin versant n° 2

3.2.1.1. Reconstitution des lames ruisselées observées

Ce bassin de la dimension d'un champ ($3\ 000\text{ m}^2$) est caractérisé par une faible dénivelée, une relative homogénéité des sols (vertisoliques), et par trois unités correspondant aux sites I, II et VI de la simulation ; elles représentent respectivement 51% , 28% et 21% de la surface, distribuées suivant la carte de la figure n° 1.

La fonction de production du bassin s'écrit :

$$Lr_c = 0,51 Lrs_1 + 0,28 Lrs_2 + 0,21 Lrs_6$$

3.2.1.2. Apport à l'analyse de l'hydrogramme de crue

L'application des fonctions de production du ruissellement établies sur parcelles élémentaires n'autorise que le calcul des lames ruisselées. La détermination de l'hydrogramme de crue-type pour un bassin donné, nécessite par ailleurs l'analyse des hydrogrammes de crues observés au cours d'épisodes pluvieux suffisamment nombreux.

Un des apports importants du simulateur est la possibilité de quantifier le ruissellement potentiel des différentes aires contributives d'un bassin versant (DA COSTA DOS REIS SILVA, 1986).

Aussi nous a-t-il paru intéressant d'utiliser les fonctions de production du ruissellement établies sur parcelles pour décomposer l'hydrogramme global de crue observé à l'exutoire. Cette analyse de l'hydrogramme est d'autant plus aisée

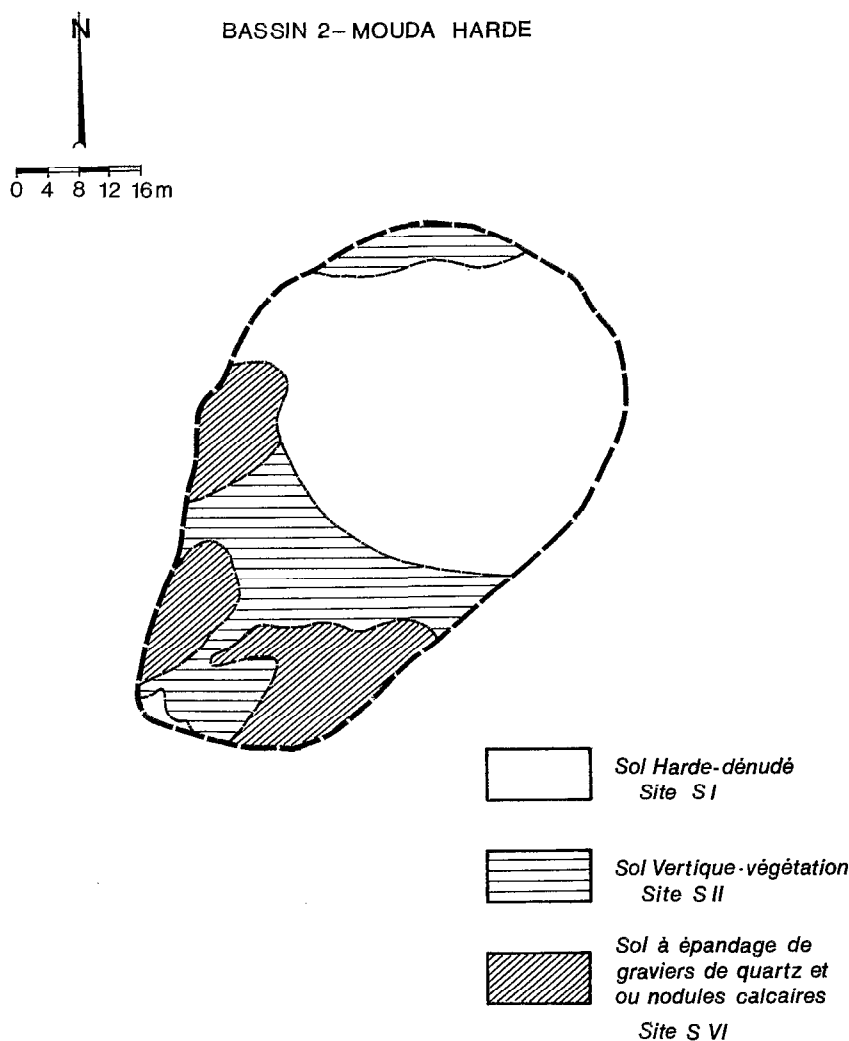


FIG. 1. Carte des états de surface représentativité des sites de simulation de pluies

que la taille du bassin est réduite, (donc présentant des temps de transfert très courts) et que la différenciation des aires contributives est nette.

L'examen des hydrogrammes et hyétogrammes, enregistrés au cours de la saison des pluies 1985, nous révèle qu'une averse à une pointe unique d'intensité engendre un hydrogramme à deux maxima (cf. fig. 2).

Par ailleurs, la carte des états de surface (cf. fig. 1) et les tests au simulateur de pluie, permettent de définir deux aires contributives homogènes du point de vue du ruissellement : l'unité (1) représentée par les sites S I et S VI de simulation de pluie, et l'unité (2) représentée par le site S II.

De ces observations découle l'hypothèse suivante :

— la première pointe de crue est provoquée par les eaux de ruissellement de l'unité (1) située principalement en amont du bassin, dont les tests au simulateur ont montré la rapidité de réaction à une averse (durée de la pluie d'imbibition brève) ;

— la deuxième pointe de crue résulte de l'adjonction du ruissellement sur le reste du bassin, dont la capacité d'infiltration est supérieure, en partie à cause de la végétation, analogue au site II de simulation de pluie.

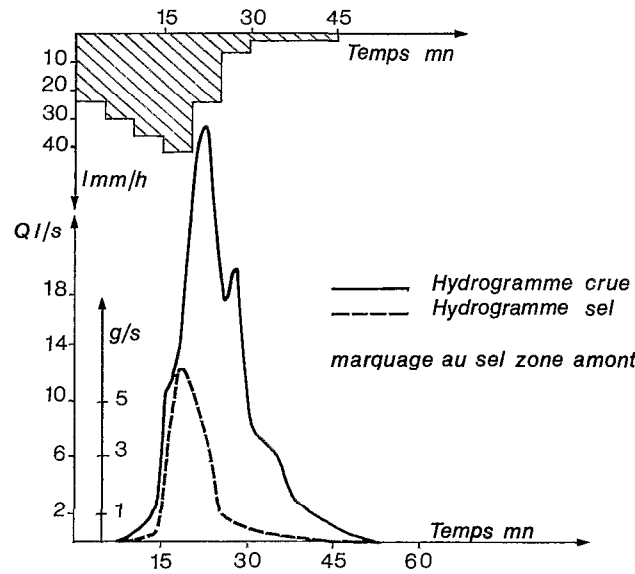


FIG. 2. — Crue du 08 août 1986

Cette hypothèse a été vérifiée sur le terrain par une série de traçages au sel et à la fluorescéine, qui ont permis de hiérarchiser l'ordre des écoulements (fig. 2) et de dresser la carte des rigoles de ruissellement, selon leur ordre d'apparition (fig. 3).

L'hydrogramme global de crue a été décomposé graphiquement en deux hydrogrammes élémentaires correspondant chacun à une des deux parties du bassin selon le schéma de la figure 4.

On admet :

1. que le ruissellement de la partie amont, arrivant en premier, dure jusqu'à la fin de l'écoulement : du temps T_0 au temps T_f ;
2. que le ruissellement de la partie centrale débute au temps T_1 , qui correspond à l'amorce de la deuxième pointe de crue sur l'hydrogramme global, en étant cependant conscients que cela induit une sous-estimation du temps de base et du temps de montée de la deuxième pointe de crue.

Pour calculer les volumes de chaque hydrogramme élémentaire, on a appliqué à chaque aire contributive du bassin la fonction de production du ruissellement correspondante, établie sous pluie simulée.

La comparaison des volumes ruisselés observés et calculés pour quelques crues est présentée dans le tableau I.

La figure 5 compare pour l'ensemble des crues les volumes observés et calculés.

3.2.2. Application de la méthode au bassin versant n° 1

3.2.2.1. Reconstitution des lames ruisselées observées

A l'échelle du 1/20 000, nous avons zoné les unités cartographiques, homogènes au niveau du comportement hydrodynamique, représentées par les sites de simulation de pluie (PONTANIER *et al.*, 1984 ; THEBE, 1987, *op. cit.*).

Les surfaces représentées par le site I, peu étendues, ont été associées à l'unité VI. Les unités II, III, IV, V, VI, VII représentent respectivement 30, 31, 11, 16, 5 et 7 % de la superficie totale du bassin.

Sur ce bassin, la fonction de production s'écrit donc :

$$Lrc = 0,30 Lrs_2 + 0,31 Lrs_3 + 0,11 Lrs_4 + 0,16 Lrs_5 + 0,05 Lrs_6 + 0,07 Lrs_7$$

Il a été signalé plus haut l'absence quasi totale de ruissellement sur le site S VII. On considère donc que cette partie du bassin ne participe pas au ruissellement global, ce qui a été vérifié en conditions naturelles sur ce sous-bassin.

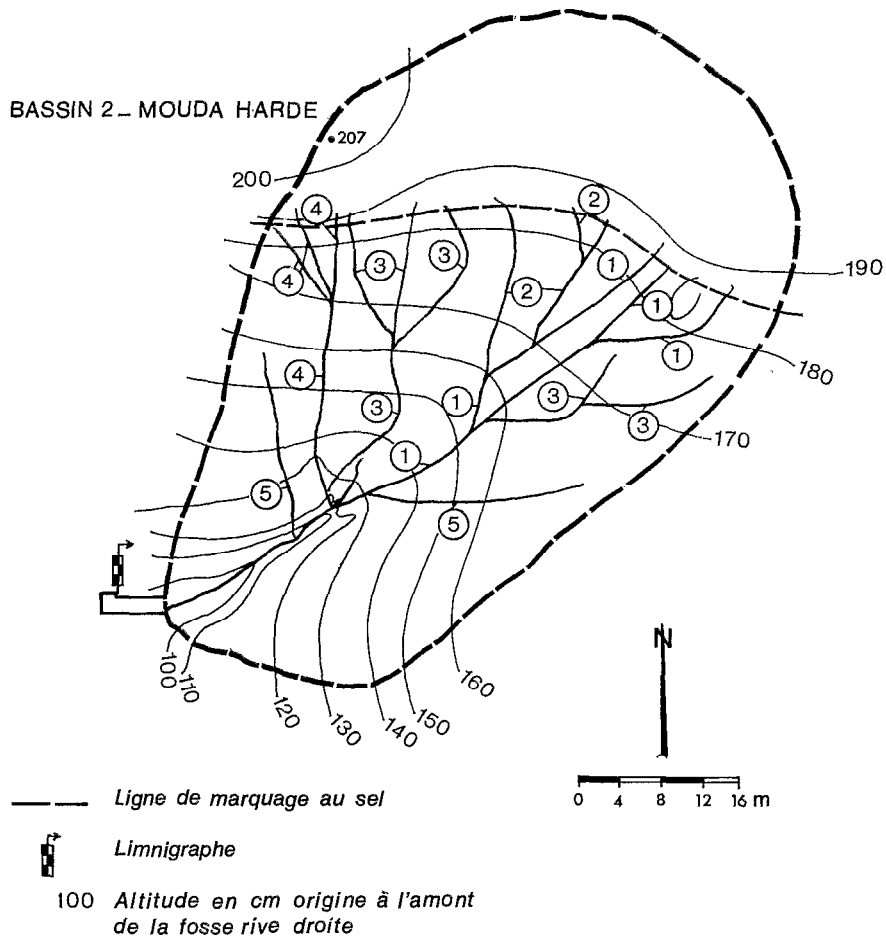


FIG. 3. — Trace des rigoles de ruissellement

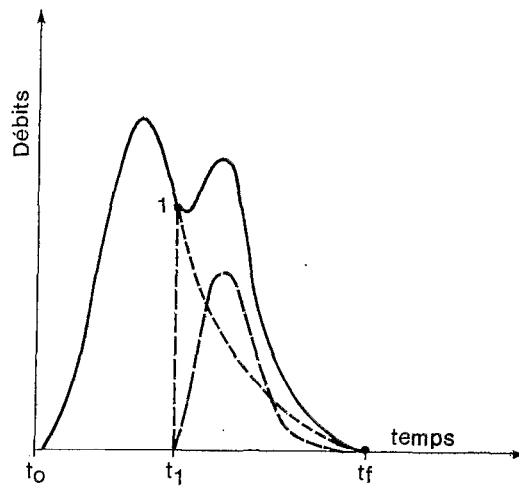


FIG. 4. — Schéma de séparation des hydrogrammes

BASSIN 2 - MOUDA HARDE

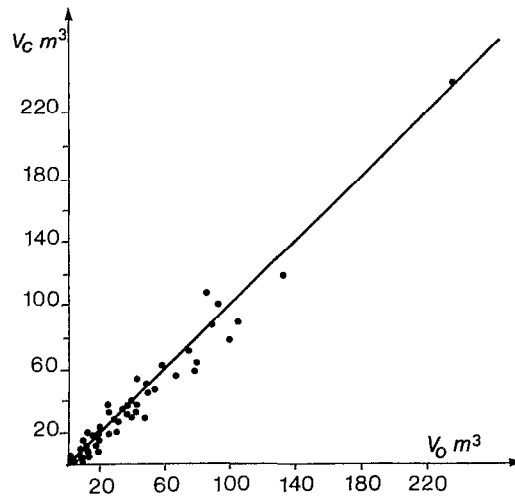


FIG. 5. — Comparaison volumes écoulés-volumes calculés

TABLEAU I
Comparaison volumes ruisselés observés - volumes ruisselés calculés

Date	Volumes observés (m³/s)		Volumes calculés (m³/s)	
	Hydrogr. n° 1 (SI - SVI)	Hydrogr. n° 2 (SII)	Hydrogr. n° 1 (SI - SVI)	Hydrogr. n° 2 (SII)
04/05/85	38,1	9,6	39,3	13,3
14/06/85	15,5	4,2	12,7	4,3
10/07/85	24,3	4,7	20,2	7,5
14/07/85	31,2	6,9	29,0	9,9
17/07/85	39,6	9,8	32,8	11,9
21/07/85	29,5	12,1	22,7	6,7
25/07/85	27,3	3,3	15,9	3,1
14/08/85	38,4	8,3	21,1	4,3

Les résultats de la reconstitution des lames ruisselées observées pendant les campagnes 1984-1985 nous ont permis d'obtenir la fonction de calage suivante ;

$$L_{r_0} = 1,16 L_{r_c} - 0,691 \quad r^2 = 0,96$$

La figure 6 montre la corrélation entre les lames ruisselées observées et calculées.

3.2.2.2. Validité du modèle simulateur sur le bassin versant n° 1 (18,1 km²)

Afin de tester l'adéquation du modèle simulateur mis au point sur le bassin n° 1, à partir des observations de 1984 et 1985, et vérifier en particulier que la fonction de calage est bien représentative du bassin et non de l'échantillon, nous avons généré une chronique de lames ruisselées.

Le modèle simulateur comporte deux étapes :

1. détermination des valeurs des variables d'entrée de la fonction de production : Pu, IK, CV ;
2. application de la fonction de calage aux lames ruisselées calculées à l'étape précédente.

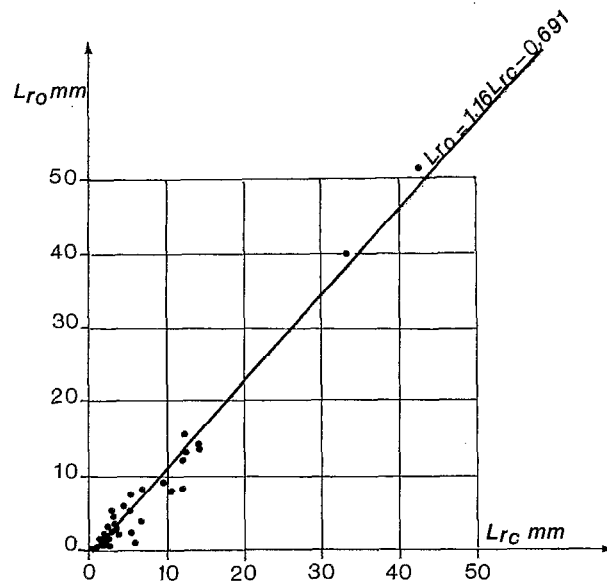


FIG. 6. — BV I. Mouda Fonction de calage

La première étape a consisté à chercher le coefficient d'abattement à appliquer à la pluie journalière du poste de Maroua-Salak (situé à 10 km environ), relevée sur les bulletins de la Météorologie nationale, pour passer à la pluie moyenne sur le bassin. Une corrélation entre les valeurs pluviométriques journalières de l'année 1984 donne un coefficient d'abattement de un, qui a été appliqué à la chronique des relevés pluviométriques de la période 1953-1973, soit 21 années.

Les valeurs de l'indice des pluies antérieures IK ont été calculées en considérant que les pluies surviennent à 12 h, donc 24 h séparent l'averse n de l'averse n + 1, tombée le lendemain.

L'indice CV de couvert végétal a été défini par une valeur moyenne mensuelle, valable pour toute la chronique, à partir des observations de 1984-1985.

Les variables d'entrée ainsi définies, le modèle a pu être appliqué ; les résultats sont représentés sur la figure 7 où les couples pluie-lame ruisselée reconstituée ont été reportés, ainsi que les couples pluies-lames ruisselées observées.

Le tableau II présente les caractéristiques statistiques des deux échantillons : lames ruisselées observées et lames ruisselées reconstituées. N'ont été prises en considération que les lames ruisselées supérieures à 0,7 mm.

TABLEAU II
Caractéristiques statistiques des lames ruisselées

Variables	N. obs.	Lr moy. 1/10 mm	Lr max. 1/10 mm	Ecart-type 1/10 mm	CV %
Lames ruisselées observées	61	50,6	512	84,1	166
Lames ruisselées reconstituées	403	84,6	610	65,3	113

Ce tableau appelle certains commentaires :

— on relèvera l'écart assez fort entre les valeurs des lames ruisselées moyennes observées et reconstituées. Ceci s'explique par la faible hydraulicité de l'année 1984, qui n'a été qu'en partie compensée par le léger excédent de 1985 ;

— le coefficient de variation CV ($CV = Ec/m$) plus faible sur les lames reconstituées est normal, car avec le modèle, on lisse les écarts de comportements pour une situation donnée. Les coefficients sont du même ordre de grandeur dans les deux cas, ce qui montre que les deux échantillons appartiennent à une même population.

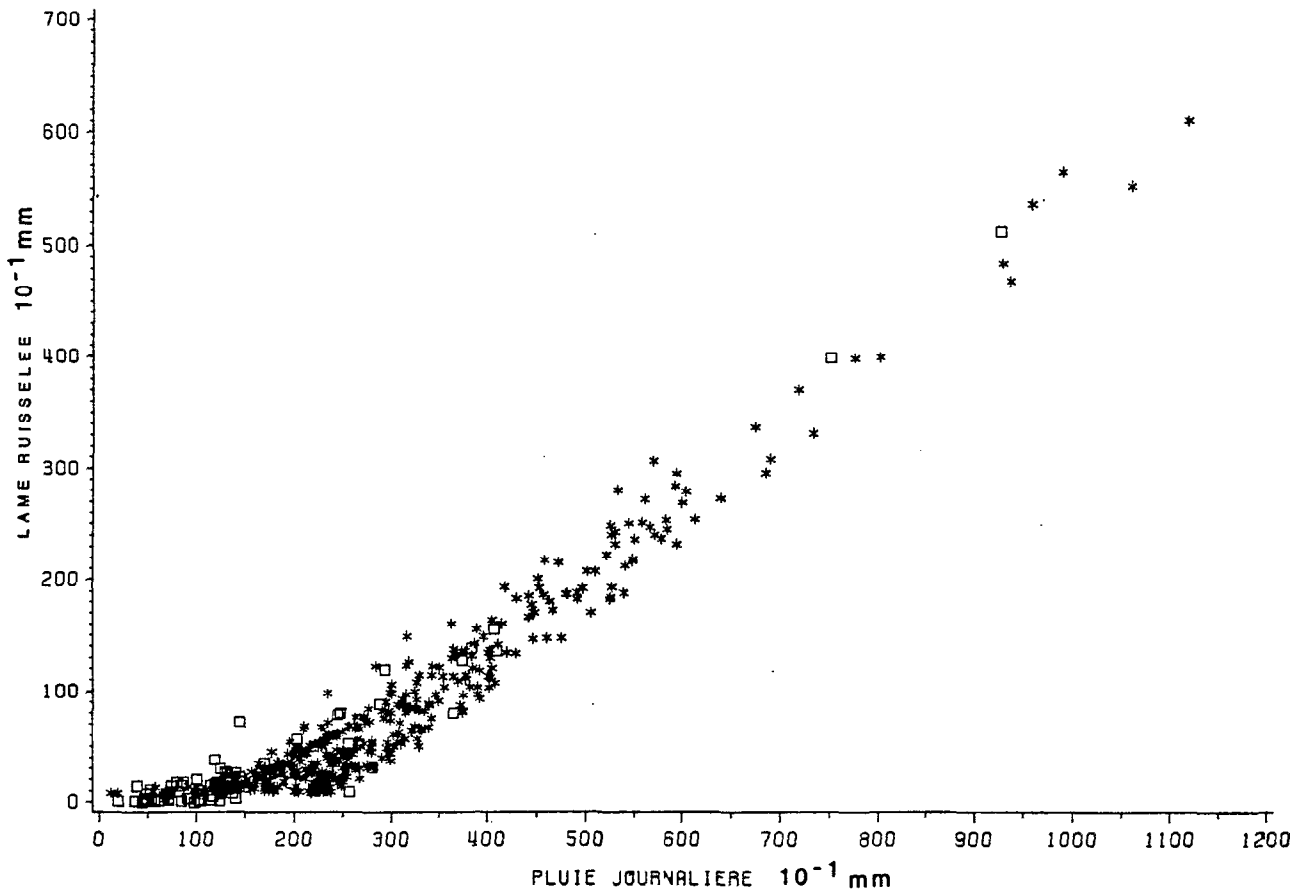


FIG. 7. — BV 1 Mouda. Lames ruisselées reconstituées

CONCLUSION

Les résultats des expérimentations sur parcelles élémentaires menées en saison sèche, sous pluie simulée en mode synchrone, dans des temps très courts, demandaient à être confirmés par un suivi en mode diachrone sur les mêmes sites en saison des pluies. Celui-ci permettait en particulier l'intégration de l'évolution du couvert végétal et d'autres facteurs saisonniers, (activité méso-faunique par exemple) et leur influence sur le ruissellement. La comparaison des fonctions de production établies dans les deux situations a permis de mettre en évidence les faits suivants :

1. la fidélité du mini-simulateur dans la reproduction des averses : les fonctions de production sont sensiblement les mêmes dans les deux cas, sur les sites dépourvus de végétation ou présentant un couvert végétal très faible ;
2. l'identification d'un seuil de densité de recouvrement au sol de la végétation herbacée au-delà duquel la prise en compte de son état physiologique devient nécessaire.

Dans les régions soudano-sahéliennes et sahéliennes, ce seuil critique de densité du couvert herbacé, estimé à 30 %, n'est généralement atteint qu'en fin de saison pluvieuse. La non-prise en compte de ce phénomène n'a que peu d'influence dans la reconstitution des lames ruisselées à l'échelle du bassin. Il peut en aller différemment dans les régions à climat tropical où la saison sèche est relativement courte : 3 à 4 mois, et où la végétation présente un couvert au sol dense dès le début de la saison pluvieuse qui s'étale sur 8 mois environ.

L'échelle du champ paraît particulièrement intéressante, car elle permet la mise en œuvre et le suivi d'un dispositif important pour l'étude fine du ruissellement et de la genèse des crues. Ainsi on a pu, non seulement élaborer une fonction de production du ruissellement, mais aussi, étant donné la brièveté des temps de transfert des eaux de ruissellement à cette échelle d'étude, décomposer l'hydrogramme de crue en fonction de chaque aire contributive du bassin.

Dans cette démarche, l'apport du mini-simulateur de pluie est essentiel, puisqu'il permet de connaître la fonction de production du ruissellement de chaque aire contributive. La séparation des apports n'est en effet pas possible à l'exutoire d'un bassin versant de quelques hectares ou de quelques km²; c'est le cas du bassin n° 1 de notre étude, sur lequel les résultats nous renseignent sur les caractéristiques des écoulements et sur la forme des crues et servent de référence pour le transfert des résultats obtenus sur les parcelles élémentaires.

Ce transfert se fait actuellement en deux étapes :

— détermination d'une fonction de production du bassin. Celle-ci résulte de la somme, pondérée par les superficies, des fonctions de production de chaque unité cartographique ;

— calcul d'une fonction de calage des lames ruisselées calculées sur les lames ruisselées observées.

La validation du modèle par la reconstitution d'une chronique de lames ruisselées, à partir d'une série pluviométrique à un poste de référence voisin, a montré le bien-fondé de la méthode.

BIBLIOGRAPHIE

- ALBERGEL (J.), 1987. — Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso. Du m² au km². Etude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. Thèse Paris 6, 341 p.
- ALBERGEL (J.), THEBE (B.), 1986. — Pluie naturelle-Pluie simulée. Quelle différence sur le ruissellement ? Gouttes et Splash. Vol. 3, n° 1.
- BOURGES (J.), FLORET (C.), GIRARD (G.), PONTANIER (R.), 1984. — Dynamique de l'eau sur un glacis du Sud tunisien (type Segui). ORSTOM. Tunis. CEPE/CNRS. Montpellier, *multigr.* 86 p.
- BRABANT (P.), GAVAUD (M.), 1985. — Les sols et les ressources en terre du Nord-Cameroun. *Coll. cartes et notice explicative n° 103*. MESRES-IRA. Yaoundé. ORSTOM. Paris. Ed. ORSTOM, 285 p. + 6 cartes couleur hors texte.
- CASENAVE (A.), 1981. — Etude des crues décennales des petits bassins versants forestiers en Afrique tropicale. Rapport final. CIEH. ORSTOM. Adiopodoume, 59 p.
- CASENAVE (A.), 1982. — Le mini-simulateur de pluie. Conditions d'utilisation et principe de l'interprétation des mesures. *Cah. ORSTOM Sér. Hydrol.*, Vol. XIX, 4 : 207-227.
- CASENAVE (A.), VALENTIN (C.), 1988. — Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. ORSTOM. Paris. CCE Bruxelles, 202 p. + Annexes.
- CCE, 1988. — Utilisation et conservation des ressources en sol et en eau (Nord-Cameroun). Rapport final TSD/A216 CAM (5). IRA IRGM (Cameroun) ; ORSTOM, CEPE/CNRS (France) ; CCE, Bruxelles, 232 p.
- CHEVALLIER (P.), 1982. — Simulation de pluie sur deux bassins versants sahéliens (Mare d'Oursi - Haute-Volta). *Cah. ORSTOM Sér. Hydrol.*, XIX, n° 4 : 253-297.
- CHEVALLIER (P.), 1983. — L'indice des précipitations antérieures. Evaluation de l'humectation des sols des bassins versants représentatifs. *Cah. ORSTOM Sér. Hydrol.*, Vol. XX, n° 3 et 4 : 179-189.
- CHEVALLIER (P.), 1986. — Note sur les écarts de mesure observés entre les pluviomètres standards et les pluviomètres au sol en Afrique de l'Ouest. Journées Hydrologiques de Montpellier. Colloques et séminaires ORSTOM : 53-64.
- 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.
- DA COSTA DOS REIS SILVA, 1986. — Essais d'élaboration et d'utilisation d'un modèle spatialisé de simulation des crues (concept d'unités participantes). *Thèse d'université*. Université des Sciences et Techniques du Languedoc. Montpellier, 206 p + annexes.
- DUNNET (T.), 1983. — Relation of field studies and modelling in the prediction of storm runoff. In I. RODRIGUEZ, I. TURBE and V.K. GUPTA (Guest eds), Scale problems in Hydrology. *J. Hydrol.*, 65 : 25-48.
- FLORET (C.), PONTANIER (R.), 1982. — L'aridité en Tunisie présaharienne. *Trav. et Doc. ORSTOM*, n° 150, Paris, 544 p.
- GIRARD (G.), LEDOUX (E.), VILLENEUVE (J.P.), 1981. — Le modèle couplé. Simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains dans un système hydrologique. *Cah. ORSTOM Sér. Hydrol.* Vol. IX n° 4 : 35-52.
- LAFFORGUE (A.), NAAH (E.), 1976. — Exemple d'analyse expérimentale des facteurs de ruissellement sous pluies simulées. *Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol.*, Vol. XII, n° 3 : 299-344.
- MUSGRAVE (C.W.), HOLTAN (H.N.), 1964. — Infiltration in Ven Te Chow ed. *Hand Book of Applied Hydrology*, Mc Graw Hill, New York.
- PONTANIER (R.) MOUKOURI-KUOH (H.), SAYOL (R.), SEYNI-BOUKAR, THEBE (B.), 1984. — Comportement hydrique et sensibilité à l'érosion de quelques sols du Nord Cameroun soumis à des averses contrôlées. MESRES -IRA - IRGM, Yaoundé, Cameroun, 71 p.
- PONTANIER (R.) MOUKOURI-KUOH (H.), SAYOL (R.), SEYNI-BOUKAR, THEBE (B.), 1985. — Apport de l'infiltromètre à aspersion pour l'évaluation des ressources en sols des zones soudano-sahéliennes du Cameroun. Premières journées Hydrologiques de Montpellier. *Colloques et séminaires ORSTOM* : 165-189.

- SHARMA (M.L.), GANDER (G.A.), HUNT (G.C.), 1980 — Spatial variability of infiltration in a watershed. *J. Hydrol.*, 45 : 101-122.
- SIVAPALAN (M.), WOOD (E.F.), 1966. — Spatial heterogeneity and scale in the infiltration response of catchments in *Scale problems in hydrology*. V.K. Gupta, I. Rodriguez, I. Turbe and E.F. Wood, eds D. Reidel Publishing Company, 81-106.
- THEBE (B.), 1987. — Hydrodynamique de quelques sols du Nord Cameroun. Bassins versants de Mouda. Contribution à l'étude des transferts d'échelles. Thèse d'Université. Université des Sciences et Techniques du Languedoc. Montpellier, 238 p. annexes.
- WALLING (D.E.), 1983. — The sediment delivery problems in I. Rodriguez, I. Turbe and V.K. Gupta (Guest eds.) *Scale problems in hydrology. J. Hydrol.* 65 : 209-237.