

MODELISATION DU RUISSELLEMENT EN ZONE SOUDANO-SAHELIENNE  
SIMULATION DE PLUIE ET CARTOGRAPHIE DES ETATS DE SURFACE

J. ALBERGEL\* ; A. CASENAVE\*\* ; C. VALENTIN\*\*\*

I - INTRODUCTION :

Les travaux menés, à partir de 1972, à l'aide d'un simulateur de pluie de type Swanson, par une équipe pluridisciplinaire de l'ORSTOM en Côte-d'Ivoire, ont permis de mettre en évidence l'intérêt de la technique des pluies simulées pour l'étude des caractéristiques des sols (COLLINET - LAFFORGUE 1979). A la suite de ces travaux, les hydrologues du Centre ORSTOM d'Adiopodoumé, utilisant un nouvel appareil plus léger et maniable (ASSELIN - VALENTIN 1978), entreprennent en 1977, une étude des crues décennales en zone forestière. Ils montrent que l'utilisation conjointe d'une cartographie des bassins, en zones "isopérmeables" et de la simulation de pluie sur des parcelles représentatives de ces unités, permet non seulement, la classification des bassins selon des critères de perméabilité, mais aussi de déterminer le coefficient de ruissellement d'une pluie de 120 mm et par là de la pluie décennale (CASENAVE 1981). L'ORSTOM décide alors d'étendre ce type d'étude à d'autres zones géographiques. Une première tentative sur deux petits bassins versants en zone sahélienne (OURSIS - Burkina Faso) aboutit à un premier modèle de reconstitution des lames ruisselées à partir d'une cartographie des états de surface (VALENTIN 1981a) et d'une expérimentation sous pluies simulées (CHEVALLIER 1982). Poursuivant cette étude en zone soudano-sahélienne, ALBERGEL et CASENAVE (1984) mettent au point de nouveaux protocoles et un modèle de reconstitution des lames ruisselées qui intègre les états de surface et leur caractérisation sous pluies simulées. Ce sont les principes de cette modélisation du ruissellement qui sont exposés dans cet article.

---

\* URB12 Hydrologue, Laboratoire d'Hydrologie de Montpellier  
MINIPARC II - Rue des Apothicaires  
34100 MONTPELLIER

\*\* URB12 Hydrologue, Coordonnateur des programmes de simulation de pluies  
Centre ORSTOM d'Adiopodoumé  
B.P. V51  
ABIDJAN (Côte-d'Ivoire)

\*\*\* URB12 Pédologue, Centre ORSTOM d'Adiopodoumé

## CARTOGRAPHIE DES ETATS DE SURFACE :

Rappelons brièvement les principaux points développés dans l'article de C. VALENTIN (1985).

Les résultats acquis au cours de ces dix dernières années sous pluies simulées, le long d'un transect climatique allant de la forêt tropicale humide au Sahara ont permis de mettre en évidence une hiérarchie des facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle. Il est notamment apparu (COLLINET - VALENTIN 1979) qu'en zone soudano-sahélienne, ce ne sont pas tant les organisations internes de la couverture pédologique qui conditionnent l'infiltration et le ruissellement que les états de surface. Ce terme recouvre deux composantes : le couvert végétal et les organisations pédologiques superficielles. Si, comme les travaux d'ALBERGEL et AL (1985) l'ont confirmé depuis, l'hydrodynamique superficielle est contrôlée essentiellement par ces états de surface, il semble plus simple (et plus économique) d'entreprendre une cartographie de telles organisations que d'avoir recours à une analyse tridimensionnelle de l'ensemble de la couverture pédologique.

La méthode cartographique développée à l'occasion de ces études distingue deux niveaux d'organisations :

- la surface élémentaire, caractéristique d'un état de surface, et considérée comme homogène quant à son comportement hydrodynamique sous pluie ;

- l'unité cartographique qui correspond, soit à une seule surface élémentaire, soit à l'association de plusieurs (généralement interdépendantes au sein de "systèmes de surfaces") et dont les limites peuvent être tracées à partir des relevés de terrain et des photographies aériennes.

Lors des mesures sous pluies simulées, chaque parcelle permet de tester le comportement d'une surface élémentaire. Un site expérimental regroupe généralement plusieurs parcelles ; il correspond alors à une unité cartographique.

## III - PROTOCOLE DES MESURES SOUS PLUIES SIMULEES :

Les études antérieures ont montré que sur une surface élémentaire, les facteurs principaux du ruissellement sont la hauteur et l'intensité de la pluie ainsi que l'état d'humectation initial du sol (CASENAVE 1982). Le protocole doit permettre de déterminer pour chacune des parcelles, les liaisons existant entre ces différents paramètres. L'influence de l'état d'humectation du sol sur le ruissellement est quantifiée à partir d'une série de pluie simulées séparées de temps de ressuyage plus ou moins longs. Chacune des pluies simulées est constituée d'une séquence de 5 à 7 intensités différentes, déterminées à partir des caractéristiques des pluies naturelles de la région. Cela permet d'étudier le rôle de l'intensité de la pluie sur le ruissellement pour une gamme d'états d'humectation du sol donnée. L'analyse du ruissellement mesuré à chacune des pluies simulées permet de définir une relation lame ruisselée-pluie utile valable pour un état d'humectation du sol.

Pour que cette relation soit bien définie, il est nécessaire que la durée de l'averse soit suffisamment longue, tout en restant dans des limites compatibles avec les caractéristiques régionales de la pluviométrie. Les averses simulées ont une taille et une forme les plus voisines possibles de celles des pluies annuelles et décennales, déterminées à partir des relevés du poste pluviométrique le plus proche du bassin étudié.

Exemple de protocole : Etude du bassin de BOULSA (Burkina Faso).

En utilisant les relations Intensité-durée-fréquence (BRUNET - MORET 1963) et l'étude statistique de la série pluviométrique du poste de FADA N'GOURMA (SIRCOULON - KLEIN 1964), on a déterminé pour les pluies simulées les formes suivantes :

Pluie annuelle	Pluie décennale
10 minutes à 40 mm/h	30 minutes à 30 mm/h
10 minutes à 120 mm/h	10 minutes à 135 mm/h
10 minutes à 90 mm/h	10 minutes à 120 mm/h
10 minutes à 70 mm/h	10 minutes à 90 mm/h
10 minutes à 50 mm/h	10 minutes à 70 mm/h
	15 minutes à 50 mm/h

La succession des pluies, telle qu'elle a été faite sur chacune des parcelles, est indiquée dans le tableau ci-après :

Forme de la pluie simulée	Pu mm	ta h	IK
Décennale	96,7		0
Annuelle	61,7	72	21,6
Annuelle	61,7	12	64,9
Annuelle	61,7	48	46,6
Décennale	96,7	12	84,3

Pu = hauteur totale de la pluie

ta = temps de ressuyage entre deux pluies

IK = Indice d'humectation des sols (CASENAVE 1982)

IV - DETERMINATION DE LA FONCTION DE PRODUCTION DU RUISSELLEMENT  
SUR UNE SURFACE ELEMENTAIRE :

Pour une parcelle donnée, chaque averse permet de déterminer la relation entre la lame ruisselée et la hauteur de la pluie. La courbe qui exprime cette relation peut être assimilée à une droite sans erreur notable, la partie incurvée, caractéristique du déficit de saturation du sol en début de pluie, étant toujours très brève (fig. 1). Cette relation correspond à un état d'humectation du sol donné, caractérisé par la valeur de l'indice IK au début de la pluie. Le report de l'ensemble des droites  $L_r$  (Pu), correspondant à la série des pluies sur une même parcelle, permet de constater que la pente de ces droites varie concomitamment aux valeurs de IK (fig. 2). Pour chaque parcelle, il existe une relation linéaire entre la lame ruisselée et l'indice IK.

$$L_r = a IK + b \quad (1)$$

Les coefficients a et b de cette équation varient de façon linéaire en fonction de la hauteur de la pluie. Très fréquemment, les points représentatifs de ces liaisons s'alignent sur deux tronçons de droites (fig. 3). Ces changements de pente des relations a(Pu) ou b(Pu) correspondent à des seuils pluviométriques à partir desquels l'influence du facteur IK décroît. Ces résultats corroborent l'étude de C. VALENTIN (1981b) montrant qu'au delà d'une certaine quantité de pluie, l'intensité d'infiltration devient constante et égale à la valeur du coefficient d'infiltration à saturation  $K_s$ . L'intensité de ruissellement est alors quasi proportionnelle à l'intensité de la pluie.

Si on introduit dans l'équation (1) les valeurs a(Pu) et b(Pu), l'équation exprimant les liaisons entre  $L_r$ , Pu et IK devient :

$$L_r = aPu + bIK + cIKPu + d$$

C'est cette relation, exprimant la fonction de production, qui caractérise l'aptitude au ruissellement d'une surface élémentaire.

Exemple : Bassin de BINNDE (Burkina Faso). Site II.  
Parcelles 3, 4 et 5 (ALBERGEL - TOUIRI 1982).

Parcelle 3 : végétation naturelle

$$\begin{array}{ll} \text{Pu } 60 \text{ mm} & L_r = 0,068 \text{ Pu} - 0,07 \text{ IK} + 0,006 \text{ PuIK} - 2,78 \\ \text{Pu} > 60 \text{ mm} & L_r = 0,128 \text{ Pu} + 0,07 \text{ IK} + 0,006 \text{ PuIK} - 6,41 \end{array}$$

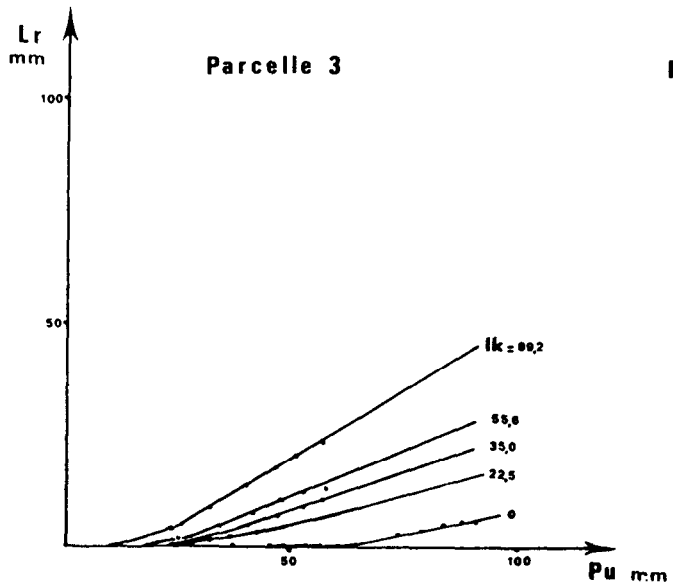
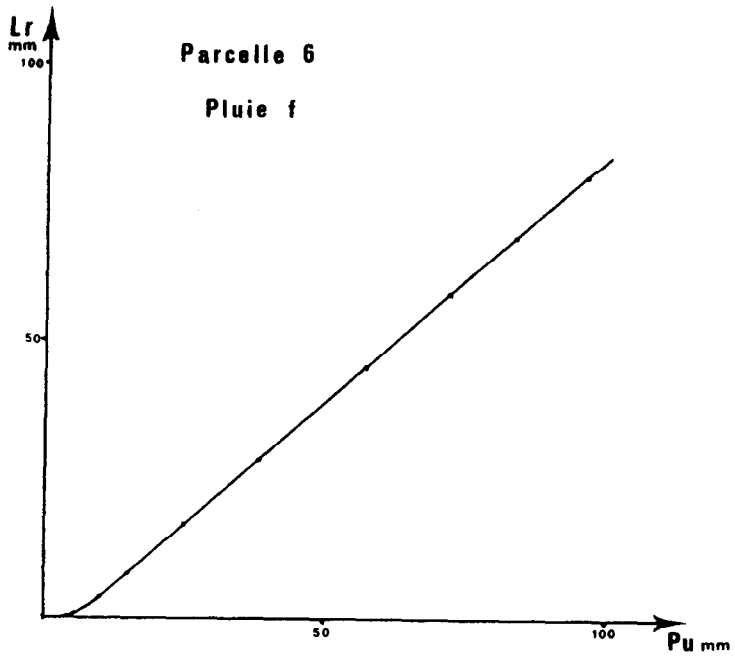
Parcelle 4 : sol nu

$$\begin{array}{ll} \text{Pu } 40 \text{ mm} & L_r = 0,847 \text{ Pu} + 0,037 \text{ IK} + 0,002 \text{ PuIK} - 11,2 \\ \text{Pu} > 40 \text{ mm} & L_r = 0,847 \text{ Pu} + 0,092 \text{ IK} + 0,0007 \text{ PuIK} - 11,2 \end{array}$$

Parcelle 5 : culture en billons

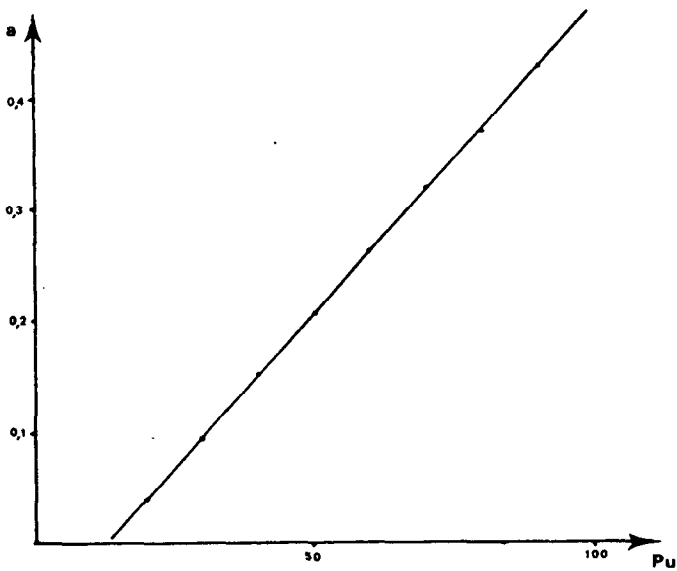
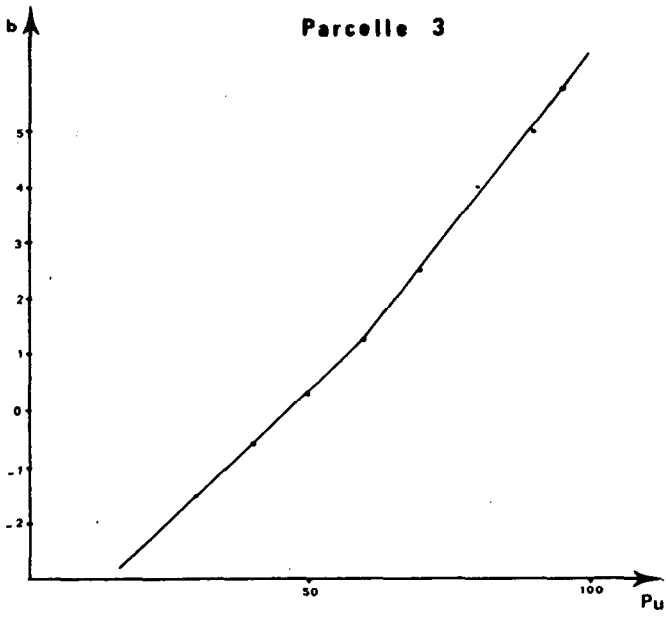
$$\begin{array}{ll} \text{Pu } 40 \text{ mm} & L_r = 0,157 \text{ Pu} - 0,06 \text{ IK} + 0,004 \text{ PuIK} - 2,89 \\ \text{Pu} > 40 \text{ mm} & L_r = 0,632 \text{ Pu} + 0,07 \text{ IK} + 0,0006 \text{ PuIK} - 21,9 \end{array}$$

Bassin de Biande



Bassin de Binnde

Fig 3



V - FONCTION DE PRODUCTION DU RUISSELLEMENT POUR UNE UNITE CARTOGRAPHIQUE :

Chaque unité cartographique regroupe un nombre variable de surfaces élémentaires. On détermine à partir des photos aériennes et/ou par sondage sur le terrain, le pourcentage occupé par chacune des ces surfaces élémentaires, dans l'ensemble de l'unité. En combinant, au prorata de ce pourcentage, les fonctions de production des surfaces élémentaires, on obtient la fonction de production de l'unité cartographique. Ce pourcentage, et donc cette fonction de production, n'est valable que pour une période donnée. Il varie à l'échelle annuelle (développement de la végétation herbacée en saison des pluies) et interannuelle (extension ou diminution des zones cultivées, modification des modes culturaux). Nous allons développer, sur un exemple, l'utilisation pratique de cette méthode.

Exemple : Bassin de BINNDE. Unité cartographique n° 2 :  
Surface à épandages gravillonnaires.

Dans cette unité, C. VALENTIN (1982) distingue trois types de surfaces élémentaires : végétation naturelle ou jachère, sol nu, sol cultivé en billons. La séparation entre végétation naturelle ou jachère et sol nu ou cultivé a été faite à partir des photos aériennes les plus récentes (1981). La distinction entre zones cultivées et sol nu résulte de sondages sur le terrain. On aboutit à la répartition suivante :

Surfaces élémentaires	Surface avant la repousse de la végétation km2	%	Surface après la repousse de la végétation km2	%
Végétation naturelle ou jachère	2,5	52	3,0	62
Sol nu	0,5	10	0	0
Culture	1,8	38	1,8	38

L'évolution annuelle de la végétation herbacée oblige à trouver un critère permettant de fixer une date de validité de chacune des fonctions de production. Les observations effectuées sur le bassin de BINNDE en 1982 et 1983 ont permis de constater que la mise en place de la végétation pouvait être reliée aux hauteurs pluviométriques et à la longueur des périodes sans pluies du début de la mousson (ALBERGEL - BERNARD 1984). Le couvert végétal est suffisamment développé pour qu'on puisse considérer qu'il n'y a plus de zones nues à partir d'un total pluviométrique de l'ordre de 80 mm répartis sur une trentaine de jours.

Pour l'unité cartographique n° 2 du Bassin de BINNDE, les fonctions de production sont exprimées par les équations suivantes :

- Avant la repousse de la végétation

$$Lr 2 = 0,52 Lr P3 + 0,10 Lr P4 + 0,38 Lr P5$$

Lri : fonction de production de l'unité cartographique.

LrPi : fonction de production de la parcelle i.

Pour  $Pu \leq 40$  mm

$$Lr 2 = 0,180 Pu - 0,024 IK + 0,005 PuIK - 3,67$$

Pour  $40 < Pu \leq 60$  mm

$$Lr 2 = 0,360 Pu + 0,003 PuIK - 10,9$$

Pour  $Pu > 60$  mm

$$Lr 2 = 0,392 Pu + 0,072 IK + 0,003 PuIK - 12,8$$

- Après la repousse de la végétation

$$Lr 2 = 0,62 LrP3 + 0,38 LrP5$$

Pour  $Pu \leq 40$  mm

$$Lr 2 = 0,102 Pu - 0,066 IK + 0,006 PuIK - 2,82$$

Pour  $40 < Pu \leq 60$  mm

$$Lr 2 = 0,282 Pu - 0,016 IK + 0,004 PuIK - 10,0$$

Pour  $Pu > 60$  mm

$$Lr 2 = 0,319 Pu + 0,070 IK + 0,004 PuIK - 12,3$$

Il est bien évident que si l'examen des photos aériennes montre une évolution importante des zones cultivées ou dénudées, dans le temps, il doit en être tenu compte lors de la reconstitution des crues du bassin.



## VI - FONCTION DE PRODUCTION DU RUISSELLEMENT POUR LE BASSIN :

De même que pour une unité cartographique, la fonction de production résulte de la somme pondérée des fonctions des surfaces élémentaires, pour le bassin, elle résulte de la somme pondérée des fonctions des unités cartographiques.

Exemple : Bassin de KAZANGA (Burkina Faso)

Sur ce bassin, on distingue les 6 unités cartographiques suivantes, (C. VALENTIN 1983) fig. 4 :

- 1 - Surface à épandages gravillonnaires
- 2 - Surface pelliculaire
- 3 - Surface à taches nues pelliculaires et à micro-buttes sableuses
- 4 - Surface verticale à voile sableux
- 5 - Surface hydromorphe de terrasse alluviale
- 6 - Surface hydromorphe de bas-fond.

Ces unités représentent respectivement 34, 28, 1, 5, 5 et 27 % de la surface totale du bassin. Etant donné leur similitude de comportement, les deux dernières unités ont été regroupées (ALBERGEL - BERNARD 1984b).

La fonction de production du bassin est donnée par l'équation :

$$\text{Lr B} = 0,34 \text{ Lr 1} + 0,28 \text{ Lr 2} + 0,01 \text{ Lr 3} + 0,05 \text{ Lr 4} + 0,32 \text{ Lr (5 + 6)}$$

## VII - RECONSTITUTION DES LAMES RUISSELEES DU BASSIN :

Si le bassin avait un comportement identique à celui des parcelles, la reconstitution des lames ruisselées du bassin dériverait directement de la fonction de production déterminée au paragraphe précédent. La différence d'échelle entre des parcelles de un mètre carré et un bassin de plusieurs km<sup>2</sup>, oblige à passer par une phase de calage de lames reconstituées à partir des résultats de la simulation de pluie sur celles réellement observées.

Pour toutes les pluies naturelles ayant donné lieu à ruissellement, on reconstitue à partir des valeurs Pu (pluie moyenne sur le bassin), IK (Indice calculé à partir de la série des pluies moyennes) et Lr B (fonction de production du bassin) les lames ruisselées calculées Lrc. On corréle ces valeurs avec les lames réellement observées sur le bassin Lr O. La fonction de calage du bassin est une droite moyenne entre les droites de régression  $\text{Lrc} = f(\text{Lr O})$  et  $\text{Lr O} = f(\text{Lrc})$  (fig. 5).

Exemples de fonctions de calage :

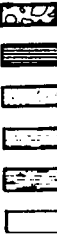
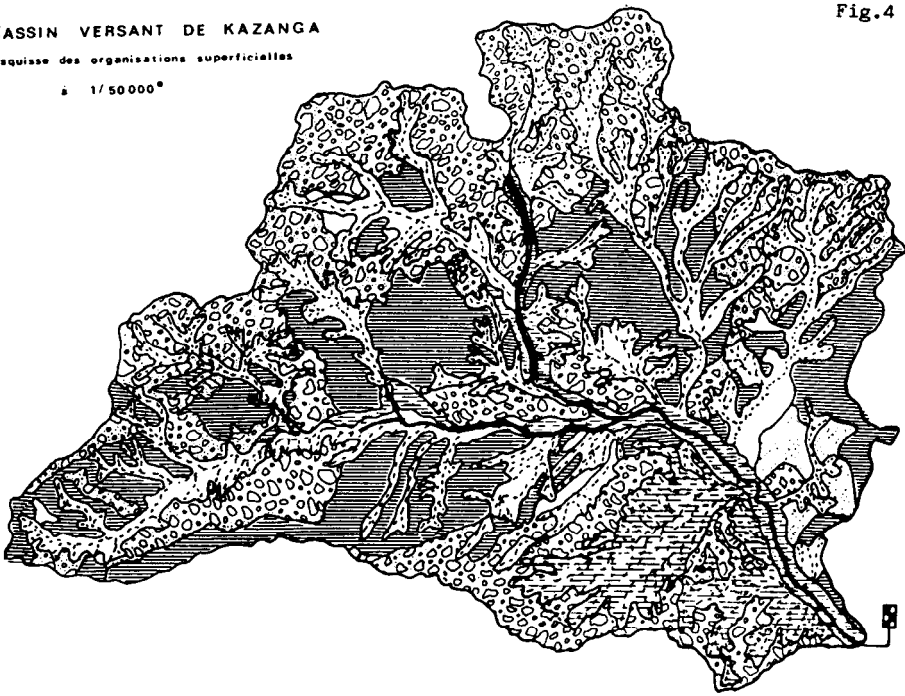
Bassin de BINNDE	(Burkina Faso)	Lro = 1,39 Lrc
Bassin de KAZANGA	(Burkina Faso)	Lro = Lrc
Bassin de KUO	(Burkina Faso)	Lro = 0,44 Lrc - 5,51
Bassin de JALAFANKA	(Burkina Faso)	Lro = 0, 5 Lrc
Bassin de POLAKA	(Burkina Faso)	Lro = 0,35 Lrc
Bassin de KORHOGO	(Côte-d'Ivoire)	Lro = 0,85 Lrc - 5,08
Bassin de COMBA	(Congo)	Lro = 1,18 Lrc - 3,4

BASSIN VERSANT DE KAZANGA

Esquisse des organisations superficielles

à 1/50 000<sup>e</sup>

Fig.4

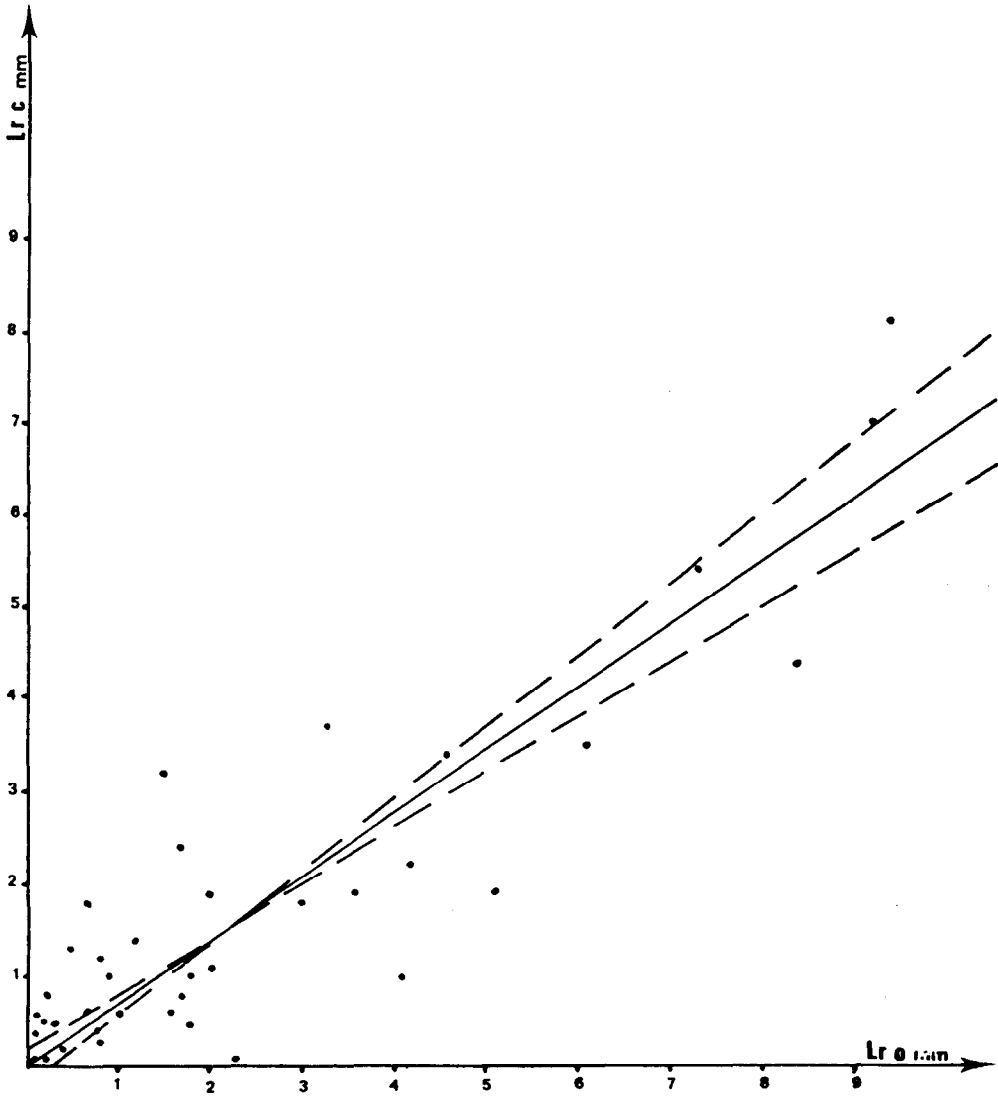


0 1km 2km

Fig 5

BASSIN DE BINNDE

Fonction de calage



VIII - RECONSTITUTION DE LA LAME RUISSELEE DE RECURRENCE DECENNALE:

Les résultats des pluies simulées permettent de reconstituer les lames ruisselées correspondant aux crues décennales soit :

- Directement en appliquant le modèle développé ci-dessus à une pluie décennale tombant dans des conditions d'humectation des sols moyennes ;
- Indirectement en générant à partir d'une série pluviométrique de longue durée une série de crues à laquelle on ajuste une loi statistique.

Dans le tableau ci-après sont reportées les valeurs des lames ruisselées de récurrence décennale calculées à partir des observations classiques sur les bassins en regard de celles déterminées à partir du modèle simulateur.

Bassin	Lame ruisselée décennale résultant de l'étude classique du bassin mm	Lame ruisselée décennale calculée à l'aide des mesures sous pluies simulées
JALAFANKA (1)	42,1	45,4
POLAKA (1)	22,2	20,8
BINNDE (2)	32,1	33,1
KAZANGA (3)	33,2	28,4
KUO (4)	28,0	26,6
KORHOGO (5)	29,0	30,1
COMBA (6)	98,8	95,7

- (1) CHEVALLIER - CLAUDE - POUYAUD - BERNARD, 1985
- (2) ALBERGEL - BERNARD, 1984a
- (3) ALBERGEL - BERNARD, 1984b
- (4) ALBERGEL - BERNARD, 1985
- (5) GIODA, 1983
- (6) CASENAVE - KONG - THIEBAUX. 1985.

## IX - CONCLUSION :

Les exemples développés dans cet article montrent que la technique des pluies simulées jointe à une cartographie des états de surface permet, en zone sahélienne, de calculer de façon satisfaisante le volume des crues, particulièrement celui des crues décennales. Cette technique beaucoup plus rapide et nettement moins onéreuse que celle, classique, des études de bassins versants représentatifs, a de plus le mérite de permettre d'analyser les réactions des différentes zones d'un bassin à un épisode pluvieux. On doit par là arriver à mieux cerner les processus de composition des écoulements sur un bassin. Elle se heurte, toutefois, au problème du calage des mesures sous pluies simulées sur celles réellement observées, ce qui nous oblige, à l'heure actuelle, à effectuer des mesures classiques sur le bassin pendant au moins une saison des pluies. Nous espérons cependant arriver, dans un avenir assez proche, à éviter cette phase de calage en déterminant quels sont les facteurs caractéristiques du bassin qui conditionnent les différentes fonctions de calage. C'est vers cet objectif que seront orientées les études dans les années qui viennent.

## BIBLIOGRAPHIE

- ALBERGEL (J) - BERNARD (A), 1984a. Calage du modèle simulateur. Préviation de la crue décennale sur le bassin versant de BINNDE. ORSTOM, Ouagadougou, 63 p., 15 fig..
- ALBERGEL (J) - BERNARD (A), 1984b. Etude des paramètres hydrodynamiques des sols sous pluies simulées. Estimation du ruissellement sur le bassin versant de KAZANGA. ORSTOM, Ouagadougou, 101 p., 25 fig. + annexes.
- ALBERGEL (J) - CASENAVE (A), 1984. Une nouvelle technique d'estimation des crues décennales des petits bassins versants : les études sous pluies simulées. CIEH Yaoundé. Compte-rendu des journées techniques. Rome 2, pp. 517-526.
- ALBERGEL (J) - TOURI (H), 1982. Un nouvel outil pour estimer le ruissellement sur un petit bassin versant : le simulateur de pluie. ORSTOM, Ouagadougou, 140 p., 28 fig. + annexes.
- ALBERGEL (J) - RIBSTEIN (P) - VALENTIN (C), 1985. L'infiltration : quels facteurs explicatifs ? Journées hydrologiques de Montpellier, à paraître.
- ASSELINE (J) - VALENTIN (C), 1978. Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., XV, 4, pp. 321-349.
- BRUNET-MORET (Y), 1963. Etude générale des averses exceptionnelles en Afrique occidentale. République de Haute-Volta. CIEH-ORSTOM, 23 p., 16 fig..
- CASENAVE (A), 1981. Etude des crues décennales des petits bassins forestiers en Afrique tropicale. Rapport final. CIEH-ORSTOM Adiopodoumé, 51 p., 6 fig. + annexes.
- CASENAVE (A), 1982. Le mini simulateur de pluie. Conditions d'utilisation et principes de l'interprétation des mesures. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., XIX, 4, pp. 207-227.
- CHEVALLIER (P), 1982. Simulation de pluies sur deux bassins versants sahéliens (Mare d'Oursi - Haute-Volta). Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., XIX, 4, pp. 253-297.
- CHEVALLIER (P) - CLAUDE (J) - POUYAUD (B) - BERNARD (A), 1985. Pluies et crues au Sahel. Hydrologie de la Mare d'Oursi (Burkina Faso). 1976 - 1981. Travaux et Documents ORSTOM, à paraître.
- COLLINET (J) - LAFFORGUE (A), 1979. Mesures de ruissellement et d'érosion sous pluies simulées pour quelques types de sols de Haute-Volta. ORSTOM Adiopodoumé, 129 p..

COLLINET (J) - VALENTIN (C), 1979. Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle. Nouvelles perspectives. Applications agronomiques. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., XVII, 4, pp. 283-328.

GIODA (A), 1983. Etude du rapport pluie-débit sur un petit bassin versant de savane à l'aide d'un infiltromètre à aspersion (Korhogo - Côte-d'Ivoire). ORSTOM Adiopodoumé, 29 p., 16 fig. + Annexes.

SIRCOULON (J) - KLEIN (JC), 1964. Etude hydrologique des bassins expérimentaux dans l'Est Volta. Bassins de BOULSA. Campagne 1962. ORSTOM Ouagadougou, 77 p., 19 fig. + annexes.

VALENTIN (C), 1981a. Esquisse au 1/25 000ème des différenciations morpho-structurales de la surface des sols d'un petit bassin versant sahélien (POLAKA-OURSI, Nord Haute-Volta). ORSTOM Adiopodoumé, 11 p..

VALENTIN (C), 1981b. Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de région subdésertique (Agades-Niger). Dynamique et conséquences sur l'économie en eau. Thèse 3ème cycle, Univ. Paris VII, 229 p..

VALENTIN (C), 1982. Esquisse au 1/25 000ème des organisations superficielles d'un petit bassin versant soudanien (BINNDE - Centre Sud de la Haute-Volta). ORSTOM Ouagadougou, 18 p..

VALENTIN (C), 1983. Organisations superficielles de KAZANGA, Centre Sud de la Haute-Volta. Esquisse au 1/50 000ème d'un bassin versant de 56 km<sup>2</sup>. ORSTOM Adiopodoumé, 13 p..

VALENTIN (C), 1983. Cartographie des états de surface. Journées hydrologiques de Montpellier, à paraître.