

Jean ALBERGEL, Alain CASENAVE,
Pierre RIBSTEIN, Christian VALENTIN

Aridité climatique, aridité édaphique :

étude des conditions
de l'infiltrabilité
en Afrique tropicale sèche

INTRODUCTION

Lorsque l'on parle de l'aridité croissante des régions soudano-sahéliennes depuis les premières années sèches de la décennie soixante-dix, on pense à la baisse généralisée des totaux pluviométriques. De nombreuses études ont mis en évidence le caractère singulier du déficit pluviométrique de ces vingt-cinq dernières années au Burkina Faso (ALBERGEL *et al.*, 1984 ; CARBONNEL et HUBERT, 1985 ; SNIDIERS, 1986 ; MUSY et MEYLAN 1987).

Les conséquences de cet aléa climatique sur les productions végétales, sur les paysages et sur l'écologie des grands ensembles du pays ont été abordés dans plusieurs ouvrages (COUREL, 1984 ; GROUZIS, 1987).

Cet article, issu d'un travail mené sur 8 bassins versants expérimentaux et sur 50 parcelles de simulation de pluie (1 m²) représentatifs de la diversité des conditions écologiques du pays (ALBERGEL, 1987), cherche à attirer l'attention sur la diminution de l'infiltrabilité des sols en période de sécheresse et donc sur l'accentuation des caractères d'aridité des paysages.

MÉTHODES ET DONNÉES

La simulation de pluie

Sur chaque parcelle expérimentale de 1 m² le protocole de pluies simulées permet de déterminer les valeurs des principaux paramètres de l'hydrodynamique du sol.

Le simulateur de pluie utilisé (modèle ORSTOM, ASSELINE et VALENTIN, 1978) reproduit fidèlement une séquence d'averses dont les hauteurs et les intensités sont établies en fonction de la connaissance des courbes intensité-durée-fréquence des pluies de la région.

Ces averses sont séparées de temps de ressuyage variables qui donnent au sol différents états d'humectation avant la pluie. La mesure en continu du ruissellement et la caractérisation de l'humidité pondérale du sol avant la pluie par des mesures neutroniques, ou par un indice pluviométrique, ont permis de déterminer la hauteur totale infiltrée, les intensités de ruissellement et d'infiltration en fonction du temps, et les réserves en eau du sol.

On a utilisé le modèle d'infiltration de MOREL SEYTOUX (1981) pour calculer le temps de submersion, la conductivité à saturation en milieu naturel et la succion capillaire sur le front d'humectation.

La surface et les horizons pédologiques superficiels de chaque parcelle testée ont été décrit finement en utilisant une méthode normalisée (VALENTIN, 1986). On a obtenu ainsi un fichier des variables caractéristiques de la dynamique de l'infiltration et de variables descriptives du milieu naturel sur 50 parcelles.

Le bassin versant expérimental

Dans la période 1980-1985, des observations de pluies et de débits ont été réalisées pendant une saison des pluies au moins sur des bassins versants expérimentaux choisis pour leur représentativité d'un grand domaine climatique. Ces bassins avaient déjà fait l'objet d'un suivi dans des années plus humides, de 1956 à 1963. Pour ces 2 périodes, il a été établi un fichier des événements averses-crues.

À partir des chroniques de pluies et de lames ruisselées, il a été défini, sur chaque bassin, un comportement moyen au ruissellement et, par conséquent, à l'infiltration, pour la période humide et pour la période sèche.

Ce comportement moyen est représenté par l'ajustement d'une branche d'hyperbole dont l'expression est la suivante :

$$Lr = (P^2 + a^2)^{1/2} - a \quad \text{avec } a > 0$$

Lr = lame ruisselée (mm)

P = pluie moyenne (mm)

a = constante (mm)

pour $P = 0$ $Lr = 0$

pour $P = +\infty$ $Lr = P - a$

a est la quantité de pluie maximale perdue pour le ruissellement dans l'hypothèse d'une pluie « infinie » à forte intensité : c'est une caractéristique du bassin.

L'étude théorique de cette fonction montre que le calcul de a par optimisation sur les observations est d'autant plus fiable que l'on possède davantage de couples (P, Lr) de valeur importante (ALBERGEL, 1987).

La figure 1 montre l'ajustement de cette branche d'hyperbole aux observations réalisées en période sèche 1982-83 sur le bassin versant de Binnde.

LES RÉSULTATS

Les facteurs explicatifs de l'infiltrabilité

L'analyse de la matrice des valeurs des paramètres hydrodynamiques et physiographiques des parcelles aboutit aux résultats illustrés par l'analyse factorielle des correspondances (fig. 2) (ALBERGEL *et al.*, 1985) :

- sur les parcelles avec végétation naturelle, le pourcentage de couverture végétale à laquelle est liée l'activité de la mésofaune est la donnée prédominante pour expliquer l'infiltration ;

- sur les sols nus, les variations de l'infiltration peuvent s'expliquer par la nature des organisations pelliculaires de surface et par la couverture gravillonnaire. Dans tous les cas, les valeurs de l'infiltration restent faibles pour ce type d'occupation du sol ;

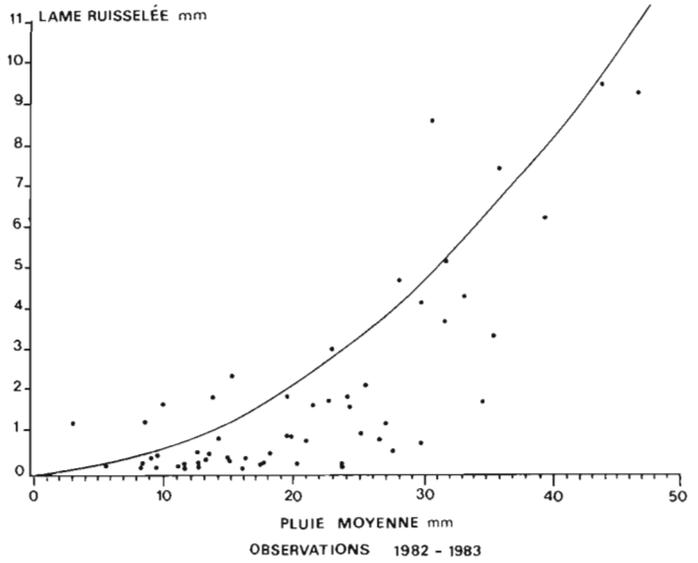


FIGURE 1 - Ajustement d'une hyperbole aux données du bassin de Binnde.

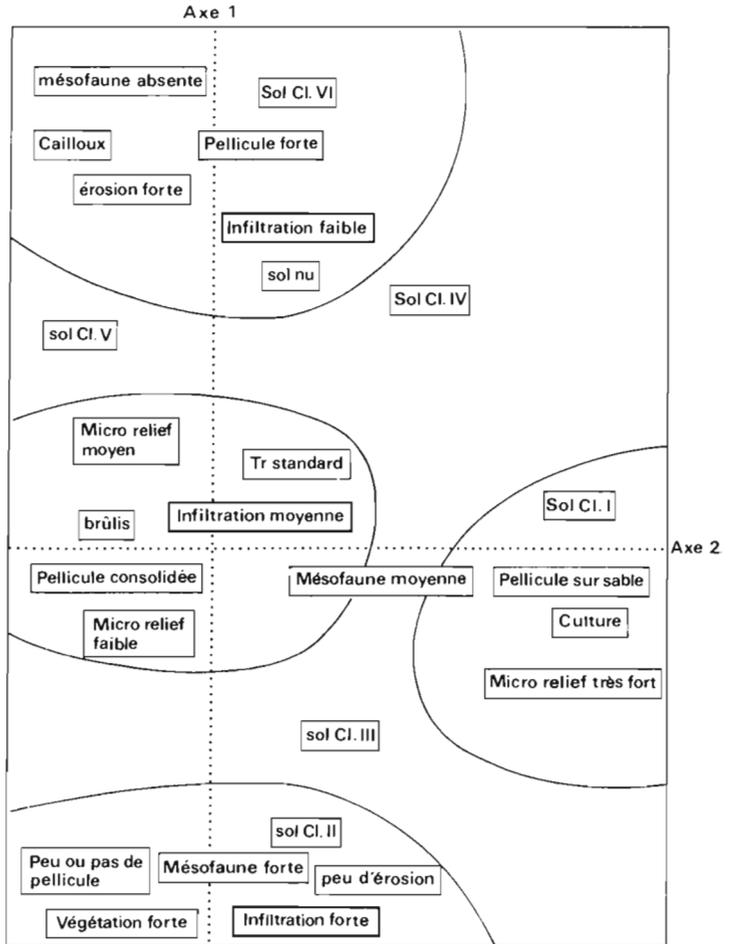


FIGURE 2 - Variables de l'hydrodynamique du sol, variables physiographiques des parcelles.

sol Cl : classe de drainage du profil pédologique selon BOULET

- sur les sols cultivés, la lame infiltrée est la résultante de 2 variables dont les poids sont équivalents ; d'une part le temps de submersion, dont les variations sont liées au microrelief et aux organisations pelliculaires de surface ; d'autre part la conductivité hydraulique, dont les valeurs s'expliquent surtout par l'abondance de la litière favorable au développement de la mésofaune et à la macroporosité de surface.

La figure 3, où sont représentés les profils hydriques mesurés avant et après une pluie de 96,7 mm, sur 2 parcelles, donne une autre illustration de l'influence de la végétation sur l'infiltrabilité du sol. Implantées à 20 m l'une de l'autre sur un même type de sol, ces 2 parcelles ne diffèrent que par l'état de leur surface. Pour la première, il s'agit d'un sol nu couvert de croûtes superficielles alors que la seconde présente un couvert graminéen de 90 %.

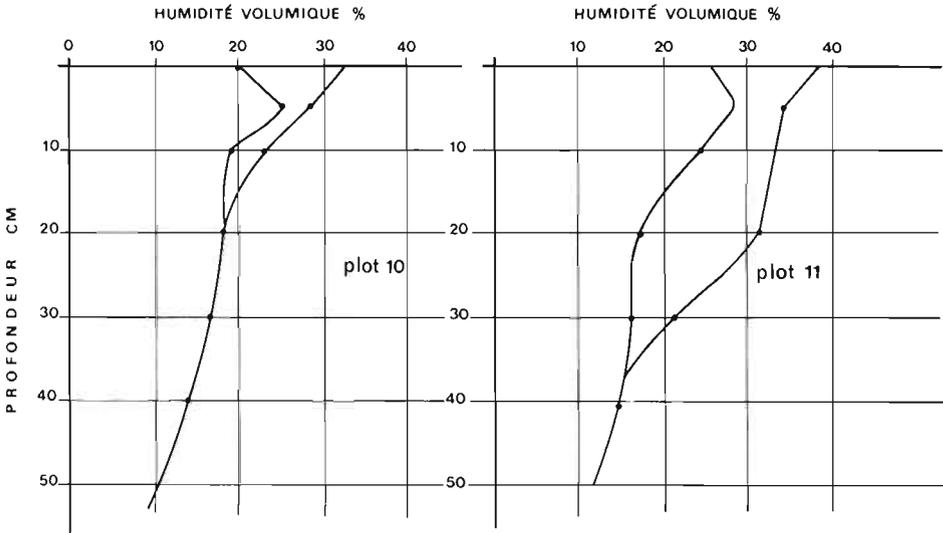


FIGURE 3 - Profils hydriques avant et après une pluie de 96,7 mm sur les parcelles 10 et 11 du bassin de Kognere.

Tableau I - Profils hydriques avant et après une pluie de 96,7 mm (bassin versant de Kognere ; parcelles 10 et 11)

PARCELLES	HAUTEUR DE PLUIE - HAUTEUR RUISSELÉE	LAME INFILTRÉE	DIFFÉRENCE
Kognere 10 Sol nu	14,9 mm	9 mm	5,9 mm
Kognere 11 Graminée	59,3 mm	56 mm	3,3 mm

Cet exemple montre que :

- à la précision de la mesure neutronique près, la lame infiltrée mesurée est égale à celle calculée par différence entre «pluie et lame ruisselée» (tabl. I). La quantité d'eau interceptée par la végétation est donc trop faible pour être mesurable ;
- la lame infiltrée peut varier du simple au quintuple sur un même type de sol du fait de la macroporosité induite en surface par la végétation et par l'activité mésofaunique qui lui est associée. Ces 2 facteurs interdisent le développement d'organisations pelliculaires de surface.

Cette mise en évidence, à l'échelle de la parcelle, de l'importance de la couverture végétale sur l'infiltrabilité, nous a incités à chercher si l'effet en était également sensible à l'échelle des petits bassins versants. Cela était rendu possible par l'existence, sur 5 des 8 bassins étudiés, de mesures effectuées pendant la période humide, 1956-1963, et pendant la période de sécheresse, 1980-1985.

Variabilité du comportement des bassins versants

Pour 5 bassins, Gagara-Est et Gagara-Ouest en zone sahélienne, Kognere en zone sahélo-soudanienne, Binnde et Kazanga en zone soudanienne, nous avons établi la courbe de comportement moyen en période sèche et en période humide :

$$Lr = (P^2 + a^2)^{1/2} - a$$

Puisque le paramètre a est une caractéristique du bassin, il nous a paru raisonnable d'émettre l'hypothèse suivante :

- le comportement d'un bassin s'est modifié si l'estimation de a sur les 2 périodes diffère d'au moins 2 fois la valeur de l'écart-type.

Le tableau II donne les valeurs du paramètre a pour les 2 périodes, récente et ancienne. Ces valeurs sont obtenues par optimisation, sur les couples pluies-lames ruisselées pour lesquels le coefficient de ruissellement est supérieur à 10 %.

Les bassins versants les plus septentrionaux, Gagara-Est et Gagara-Ouest, semblent avoir évolué vers une augmentation du ruissellement entre les 2 périodes d'observation 1956-1957 et 1980-1985. Le bassin de Kognere, situé dans la zone sahélo-soudanienne, présente une réduction moins nette de sa perméabilité. En revanche, les bassins plus arrosés de Binnde et de Kazanga présentent des comportements très voisins pour les 2 périodes d'observations.

Tableau II - Estimation du paramètre «a» sur les deux périodes d'observation

Bassin	PÉRIODE HUMIDE			PÉRIODE SÈCHE		
	Nb. obs.	a mm	Écart-type	Nb. obs.	a mm	Écart-type
Kognere	16	147	10,8	1	115	-
Kagara E	10	93	9,6	11	26	3,8
Gagara O	11	60	7,9	13	23	2,8
Binnde	32	84	6,0	16	94	9,7
Kazanga	33	109	8,9	7	105	11,2

DISCUSSION

Les résultats obtenus sous pluies simulées ont montré que la capacité d'infiltration, dans la zone sahélienne, paraît davantage liée à des critères d'état de surface (couvert végétal, activité faunique, croûtes superficielles) qu'à la nature des organisations internes de la couverture pédologique.

L'étude comparative des photographies aériennes, prises en 1956 et en 1981, de 5 bassins versants (VALENTIN, 1986 ; ALBERGEL, 1987) montre que l'une des conséquences de la période de sécheresse, qui affecte le Sahel depuis 1969, est une transformation profonde des états de surface, pour certains de ces bassins.

Sur les bassins de Gagara, du fait de la disparition de la strate arbustive et surtout herbacée, on assiste à une extension des zones fortement encroûtées. À l'heure actuelle, celles-ci occupent la majeure partie des surfaces sableuses cultivées situées sur les dunes de l'amont et de l'aval du bassin, la totalité des versants argilo-limoneux et une fraction importante des bas-fonds.

Cette modification des états de surface se traduit dans le comportement hydrologique des bassins par une très nette augmentation des coefficients de ruissellement.

Sur le bassin de Kognere, un effet induit, l'extension des zones cultivées se surimpose à celui, direct, de la sécheresse. En effet, l'extension des cultures est une des réponses adoptées par les agriculteurs locaux face à la faiblesse des rendements. En 1956, les surfaces cultivées représentaient 16 % de la superficie du bassin, alors qu'elles en occupent 36 % à l'heure actuelle. Cette mise en culture favorise les tassements de la surface du sol et le développement des organisations pelliculaires superficielles. Cela se traduit par une augmentation des zones érodées dont la superficie a été multipliée par 20 entre 1956 et 1981 (fig. 4). Là aussi, la conséquence directe de ces modifications des états de surface est un accroissement du ruissellement.

Sur les bassins de Binnde et de Kazanga, au contraire des 2 exemples précédents, on ne peut mettre en évidence de modifications sensibles des états de surface dont les limites cartographiques ne varient pas entre périodes sèche et humide. Seule, la séparation entre zones cultivées et jachères évolue quelque peu. Cette stabilité des états de surface se traduit par une constance du comportement hydrologique des bassins.

CONCLUSION

Par des mesures sous pluies simulées, on a montré que l'infiltrabilité, en zone sahélienne et soudano-sahélienne, était sous la dépendance quasi exclusive des états de surface. Ceux-ci peuvent évoluer considérablement sous l'effet de la sécheresse : diminution de la strate herbacée et arbustive, d'où une disparition de l'activité faunique et une augmentation des surfaces encroûtées et des zones érodées. Cette modification qu'on ne retrouve, en général, qu'au nord de l'isohyète interannuelle 800 mm, entraîne une augmentation du ruissellement et de l'érosion ; cette augmentation accentue les effets de la sécheresse et aboutit à une dégradation très marquée et parfois irréversible du milieu. Cette évolution dans le sens d'une aridité croissante du milieu a pu être qualifiée, de « sahélistation » des bassins (ALBERGEL et VALENTIN, 1986).

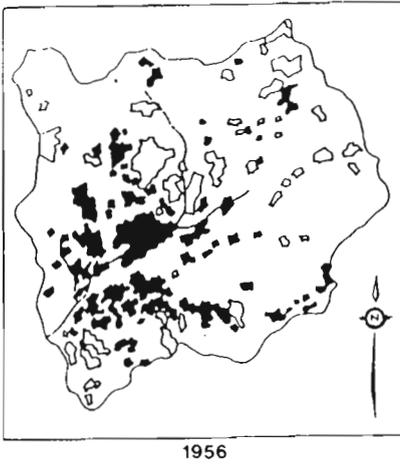
J. ALBERGEL : *hydrologue*, ORSTOM BP 1386, Dakar, Sénégal

A. CASENAVE : *hydrologue*, représentant de l'ORSTOM au Niger, ORSTOM, BP 1146 Niamey, Niger

P. RIBSTEIN : *hydrologue*, ORSTOM, CP 8714, La Paz, Bolivie

C. VALENTIN : *pédologue*, ORSTOM, 72 route d'Aulnay, 93143 Bondy cedex, France

a) Occupation des sols. 1956-1980



0 1 km

b) Zones très érodées. 1956-1980

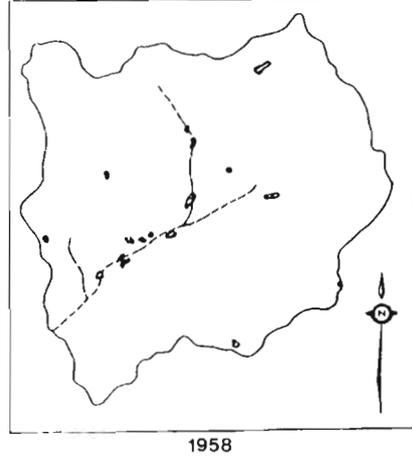


Figure 4 - Bassin de Kognere. Évolution de l'occupation des sols et des zones érodées entre 1956 et 1980 (d'après VALENTIN, 1986).

BIBLIOGRAPHIE

- ALBERGEL (J.), 1987. - Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso. Du m² au km² étude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. Thèse de doctorat sc. nat., université Paris-VI, 341 p.
- ALBERGEL (J.), CARBONNEL (J. - P.) et GROUZIS (M.), 1984. - Péjoration climatique au Burkina Faso. Incidences sur les ressources en eau et sur les productions végétales. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., vol. XXI, n°1 : 3-19

- ALBERGEL (J.), RIBSTEIN (P.) et VALENTIN (C.), 1985. - L'infiltration, quels facteurs explicatifs ? Analyses sur 48 parcelles du Burkina Faso. Journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier (17-18 sept. 1985). *Colloques et séminaires*, ORSTOM : 26-48
- ALBERGEL (J.) et VALENTIN (C.), 1986 - «Sahélisation» d'un petit bassin versant : Boulsa Kognere au centre nord du Burkina Faso. Colloque Nordest Sahel IHEAL Paris.
- ASSELINE (J.) et VALENTIN (C.), 1978. - Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. *Cah. ORSTOM sér. Hydrol.*, vol. XV, n° 4 : 321-349.
- CARBONNEL (J.-P.) et HUBERT (P.), 1985. - Sur la sécheresse au Sahel d'Afrique de l'Ouest. Une rupture climatique dans les séries pluviométriques du Burkina Faso (ex-Haute-Volta). *C.R. Acad. sc.*, t. 301, n° 13 : 41-944
- COUREL (M.-F.), 1984. - Étude de l'évolution récente des milieux sahéliens à partir des mesures fournies par satellites. Thèse de doctorat d'État ès lettres et sc. hum., université Paris I, 407 p.
- GROUZIS (M.), 1987. - Structure, productivité et dynamique des systèmes écologiques sahéliens (mare d'Oursi, Burkina Faso). Thèse de doctorat d'État sc. nat., université Paris-Sud, 336 p.
- MOREL SEYTOUX (H. J.), 1981. - Application of infiltration theory for the determination of excess rainfall hyetograph. *Water resources bull.* : 1012-1022
- MUSY (A.) et MEYLAN (P.), 1987. - Modélisation d'un processus non stationnaire. Application à la pluviométrie en zone semi-aride. The influence of climate change and climatic variability on the hydrologic regime and water resources. (*Proceedings of the Vancouver Symposium*, AUG. 1987) *IAHS publ.*, 168, 1987 : 287-299
- SNIDJERS (T. A. B.), 1986. - Interstation corrélations and non stationarity of Burkina Faso rainfall. *Journ. of climate and applied meteorology*, vol. 25 : 524-531
- VALENTIN (C.), 1986. - Différencier les milieux selon leur aptitude au ruissellement. Une cartographie adaptée aux besoins hydrologiques. Journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier (17-18 sept. 1985) . *Colloques et séminaires*, ORSTOM : 50-74