



7

Spécificité des processus du ruissellement en zone sahélienne. Influence des états de surface

A. CASENAVE

ORSTOM, BP 375, Lomé, Togo

L'un des problèmes les plus délicats à résoudre en matière d'hydrologie appliquée est la transposition des résultats d'un bassin versant à un bassin non observé. Nombreux sont les hydrologues qui ont rêvé de déterminer les caractéristiques d'un bassin — débit moyen annuel ou débit de pointe de crue de telle ou telle fréquence — après un simple examen, sans observation, ni mesure de débit.

Pour tenter de résoudre ce problème, deux types d'approche sont possibles, l'une déterministe, l'autre stochastique.

La première de ces approches est illustrée par les travaux des hydrologues de l'ORSTOM qui, depuis le milieu des années 50, ont étudié plus de 300 Bassins Représentatifs et Expérimentaux (BRE), principalement en Afrique.

Le but de ces hydrologues était d'élaborer, à partir de l'analyse d'un échantillon le plus consistant possible, une typologie des bassins versants, fondée sur des paramètres caractéristiques du milieu (paramètres physiques : indice de compacité, de pente, ...; grands types de couvert végétal, nature géologique du substratum, grands types de sols), facilement mesurables.

Lors des premières synthèses de ces résultats, que ce soient ceux des crues décennales (Rodier-Auvray [15]) ou des écoulements (Dubreuil *et al.* [10]; Rodier [14] et 1976), on s'est heurté à un certain nombre de difficultés :

- Impossibilité de quantifier l'aptitude au ruissellement d'un bassin. Faute de mieux, on a classé les bassins en 5 catégories, P1 à P5 (Rodier en 1988 a remplacé ces symboles par les termes « très imperméables », « imperméables », « relativement imperméables », « perméables » et « très perméables »),

plus en accord avec le caractère subjectif de cette classification) mais plus à partir des résultats observés que de critères objectifs. Cette déficience semblait provenir d'une incapacité à prendre en compte les caractéristiques pédologiques des bassins. La nature des sols n'apparaissait pas, lors de l'analyse statistique des résultats, comme un facteur discriminant vis-à-vis du ruissellement ce qui pouvait paraître, a priori, comme surprenant.

- Impossibilité de donner un mode de calcul précis de la crue décennale en zone forestière, les coefficients de ruissellement y variant dans des proportions telles, sans qu'on puisse en déterminer exactement les causes, qu'il n'était même pas possible de classer ces bassins dans des catégories d'aptitude au ruissellement, comme on l'avait fait pour la zone de savane. Là encore, il semblait que l'absence de connaissances sur le comportement hydrodynamique des sols forestiers, était à l'origine de cet échec.

La seconde méthode, stochastique, est illustrée par les travaux du CIEH (Puech et Chabi Gonni [13]). Ces auteurs ont fait des régressions multiples entre les résultats hydrologiques compilés dans le « Recueil des données de base des bassins représentatifs et expérimentaux de l'ORSTOM » (Dubreuil [9]) et les principaux facteurs du ruissellement, plus particulièrement la surface et la pente, pour les bassins du Sahel. Les résultats de cette méthode, beaucoup plus simple d'emploi, sont très nettement améliorés si on peut faire intervenir dans les régressions le coefficient de ruissellement ce qui revient à estimer, comme dans la méthode déterministe, l'aptitude au ruissellement du bassin à partir de critères objectifs.

Les facteurs conditionnels du ruissellement en Afrique de l'Ouest

Depuis le milieu des années 70, les hydrologues et pédologues de l'ORSTOM utilisent, pour améliorer leur connaissance de l'hydrodynamique des sols, des simulateurs de pluie qui permettent de s'affranchir des aléas des précipitations naturelles.

Après avoir utilisé un premier appareil dérivé du simulateur de type Swanson, arrosant deux parcelles de 50 m², ils ont mis au point, en 1977, un minisimulateur de pluie permettant d'étudier des parcelles de 1 m² (Asseline et Valentin [3]). La comparaison des résultats obtenus sur ces parcelles avec ceux des parcelles de 50 m² (Collinet [8]) ou avec les données des bassins représentatifs (Casenave *et al.* [5]) a montré que, malgré la faible surface étudiée, l'appareil était fiable sous réserve d'une utilisation appropriée. Depuis 1980, l'ORSTOM a largement développé cette nouvelle technique dans de nombreux pays d'Afrique francophone (Côte d'Ivoire, Burkina Faso, Niger, Togo, Cameroun, Congo, Sénégal).

L'ensemble de ces mesures (environ 1 000 averses simulées sur 150 parcelles) a permis de déterminer, sur une vaste zone géographique, les facteurs conditionnels de l'infiltration et du ruissellement et de hiérarchiser l'importance relative de ces différents facteurs (Valentin [17]).

En zone Sahélienne, l'analyse statistique des données obtenues, a montré que trois variables caractéristiques du milieu — couvert végétal, activité faunique et

nature des croûtes — suffisent à expliquer significativement ($R^2 = 0,84$) le coefficient d'infiltration.

De trop nombreux exemples montrent cependant que l'utilisation aveugle de telles formules statistiques n'est pas exempte de dangers et qu'une approche plus naturaliste, de type système expert, peut constituer un « garde fou » précieux, en fournissant un mode d'emploi de ces régressions. C'est pourquoi Casenave et Valentin [6] ont proposé une typologie des surfaces élémentaires, qui essaye de concilier les deux approches; statistique et naturaliste. Cette typologie est fondée sur une base expérimentale et des traitements statistiques, mais ses résultats sont pondérées par des critères d'ordre morphologique.

La typologie des surfaces élémentaires

A la base de cette typologie se trouve le concept de « surface élémentaire » qui désigne, à un instant donné, un ensemble homogène constitué par :

- le couvert végétal;
- la surface du sol;
- les organisations pédologiques superficielles qui ont subi des transformations sous l'effet des facteurs météorologiques, fauniques ou anthropiques : les croûtes.

Les critères d'identification

La typologie des surfaces élémentaires repose sur un certain nombre de critères caractéristiques du milieu, dont l'analyse statistique a montré qu'ils influençaient de manière sensible la capacité d'infiltration. Ces principaux critères sont les suivants :

Le type de croûte

L'étude des processus et l'analyse des facteurs de formation des croûtes superficielles, associées à la description des microhorizons, ont amené Casenave et Valentin [6] à la définition d'une typologie morpho-génétique des principales croûtes sahéliennes. Cette typologie, synthétisée dans la figure 1, permet de distinguer 9 types principaux dont la désignation fait référence à leur mécanismes de formation.

La nature du milieu : naturel ou cultivé

Deux facteurs conditionnels importants de l'infiltration, la couverture végétale et le microrelief, sont considérablement modifiés par la mise en culture. De plus, l'évolution des surfaces est différente en milieu naturel où les croûtes, une fois formées, sont relativement protégées et en milieu cultivé où les croûtes sont souvent détruites par les travaux culturaux. Ceci a amené à distinguer ces deux types de milieu.

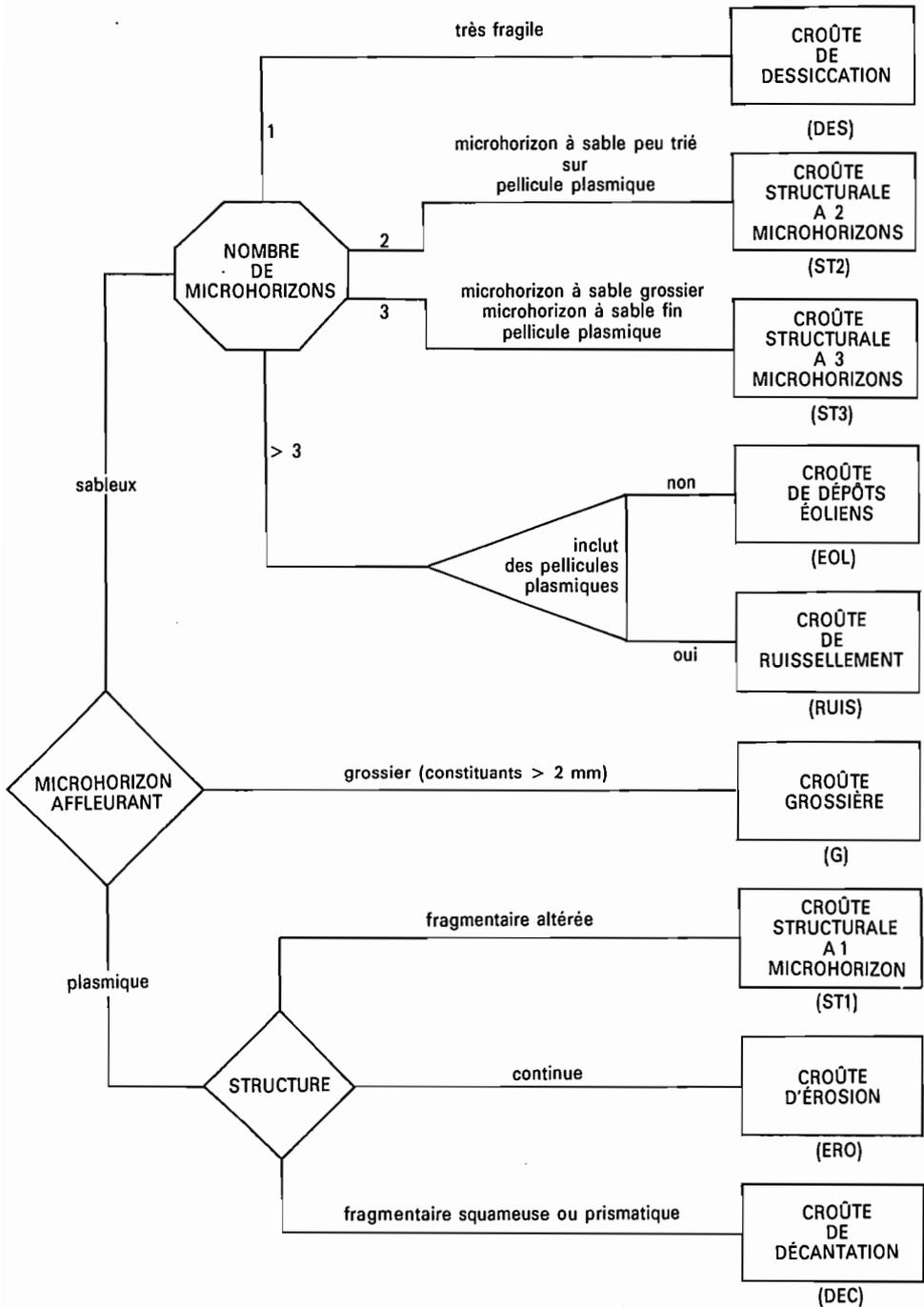


Figure 1. Clé de détermination des principales croûtes sahéniennes.

La porosité vésiculaire

Les microhorizons des croûtes sahéliennes sont souvent riches en vésicules qui peuvent créer une très forte porosité. Celle-ci n'est cependant pas fonctionnelle, les pores ne communiquant pas les uns avec les autres. Il s'agit pourtant d'un indice précieux de conditions peu favorables à l'infiltration. Ces vésicules se forment en effet, lors de l'humectation, lorsque l'air du sol ne peut s'échapper dans aucune direction, du fait d'une forte imperméabilité du milieu. L'analyse statistique a mis en évidence une très bonne relation entre l'abondance de ces pores et l'aptitude au ruissellement (Albergel *et al.* [2]).

L'activité faunique

Elle a une influence directe sur l'infiltration par la porosité qu'elle génère. Lavelle [11], par exemple, a montré qu'à Lamto (Côte d'Ivoire), les vers rejettent 30 à 40 m³ de terre en surface, par hectare et par an. A ce volume de rejets correspond un volume comparable de pores à l'intérieur du sol et cette porosité communique avec la surface, facilitant ainsi le drainage rapide de l'eau. De plus, et ce n'est pas là le moindre des effets du travail de la mésofaune, elle détruit, au moins localement, les croûtes qui s'opposent à l'infiltration.

La charge grossière

Il s'agit des fractions granulométriques de taille supérieure à 2 mm. Cette charge grossière peut être utilisée comme indicateur de l'infiltrabilité parce qu'en zone aride et semi-aride, elle s'accompagne, le plus souvent, d'un degré de réorganisation maximal. Les éléments grossiers sont, dans la majeure partie des cas, englobés dans une croûte à trois microhorizons (Type ST3) très imperméable.

Les éléments « modulateurs »

Pour tenir compte de la diversité des milieux étudiés, on a été amené à définir, dans certains types de surface, des variantes en fonction d'éléments « modulateurs » qui sont :

- La couverture végétale

Elle intervient en assurant la protection du sol contre les « agressions » extérieures (pluie, vent, ...) qui sont les principaux agents de formation des croûtes. Elle n'est prise en compte que lorsqu'elle couvre une surface au sol supérieure à 50 %.

- Le microrelief

Ce sont les petits accidents du terrain, d'une amplitude comprise entre 5 et 50 cm, naturels ou induits par les techniques culturales, qui confèrent au sol la rugosité susceptible de diminuer le ruissellement et d'augmenter le stockage superficiel de l'eau.

- La texture du sol

Pour la zone sahélienne, seules la texture très sableuse (taux des sables > 90 %) et la texture argileuse (taux d'argile > 40 %) ont une influence sur l'infiltration.

Ces éléments modulateurs ne changent pas la définition du type de surface, mais ont une influence sur les valeurs de l'infiltration qui lui sont liées.

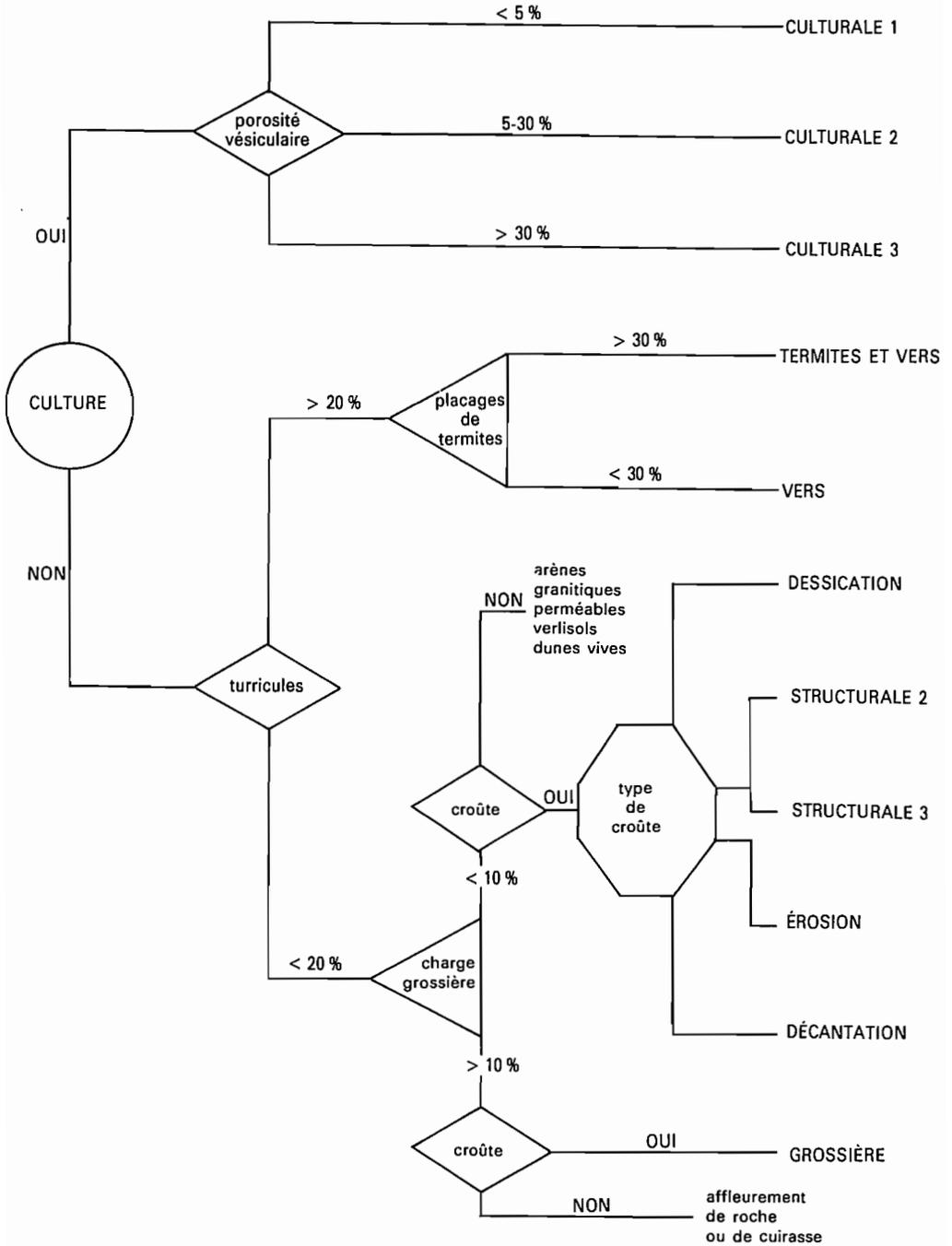


Figure 2. Clé de détermination des types de surfaces élémentaires.

Les grands types de surfaces élémentaires

A partir des critères d'identification précédents, on peut classer toutes les surfaces élémentaires en 11 grands types. La clef de détermination en est donnée sur la figure 2.

A chaque type de surface élémentaire (type modal ou variante) correspond un fonctionnement hydrologique particulier qui est caractérisé par une équation du ruissellement (uniquement pour le type modal) et les fourchettes des valeurs que peuvent prendre certaines variables de l'infiltration. Un exemple en est donné ci-après pour les surfaces de type ST2.

Surface de type structurale 2 : ST2

Définition

Surface non cultivée présentant moins de 20 % de turricules de vers et moins de 40 % de charge grossière, couverte d'une croûte structurale à 2 microhorizons (sable grossier continu légèrement pris en masse recouvrant une pellicule plasmique).

Ruissellement

$$Lr = 0,85 Pu + 0,01 IK + 0,003 Pu IK - 8,0$$

Lrq : lame ruisselée en mm.

Pu : hauteur de l'averse en mm.

IK : indice des précipitations antérieures (Casenave [4]).

Infiltration

Ki %	Ki0 %	Ki20 %	I1 mmh ⁻¹	Pis mm	Pih mm
40-55	60-75	50-65	5-15	10-20	3-6

Variante

Si la couverture végétale est supérieure à 50 %.

Ki %	Ki0 %	Ki20 %	I1 mmh ⁻¹	Pis mm	Pih mm
60-70	80-90	75-85	10-20	20-30	5-10

Ki = Coefficient d'infiltration pour l'ensemble du protocole des pluies simulées sur une parcelle;

Ki0 = Coefficient d'infiltration pour une pluie de 50 mm et IK = 0;

Ki20 = Coefficient d'infiltration pour une pluie de 50 mm et IK = 20;

I1 = Intensité limite de ruissellement (Casenave, 1982);

Pis = Pluie d'imbibition pour un sol sec (IK = 0);

Pih = Pluie d'imbibition pour un sol très humecté (IK > 80).

Utilisations hydrologiques de la typologie

Le concept d'état de surface

S'il est possible, comme nous venons de le voir, de décomposer la surface du sol, à l'échelle de la parcelle, en un nombre limité de fractions hydrologiquement homogènes, les « surfaces élémentaires », il n'en est pas de même à l'échelle directement supérieure, celle du petit bassin versant. A cette échelle, le nombre trop élevé de combinaisons possibles entre les surfaces élémentaires impose, pour caractériser le milieu, un nouveau concept : celui d'« état de surface ». Ce terme peut désigner :

- une seule surface élémentaire, si elle est de grande taille; par exemple, un reg en zone sub-désertique qui couvre souvent plusieurs km²;
- la juxtaposition de plusieurs; par exemple, une steppe qui comprend au moins deux surfaces élémentaires : les zones enherbées alternant avec des taches dépourvues de végétation et couvertes de croûtes;
- un système de surfaces élémentaires, c'est-à-dire un ensemble au sein duquel jouent des interactions. Dans un tel système, les surfaces élémentaires ne sont pas seulement juxtaposées mais interdépendantes. C'est le cas de la brousse tigrée, où la zone nue, toujours fortement encroûtée alimente par son fort ruissellement la zone boisée située à l'aval. La face amont du fourré a tendance à s'étendre tandis que la face aval dépérit. Ainsi l'ensemble du système progresse vers l'amont.

Etats de surface et fonctionnement hydrologique des bassins

Les concepts de surface élémentaire et d'état de surface ont été utilisés pour définir un nouveau mode de représentation cartographique du milieu (Valentin, 1986), où ne sont prises en compte que les variables conditionnant l'infiltration et le ruissellement, c'est-à-dire, pour toute la zone sahélienne, celles caractérisant les états de surface. Les unités définies dans cette méthode répondent à des critères d'homogénéité tant au niveau de leur dynamique évolutive qu'à celui de leur fonctionnement hydrologique.

Pour répondre totalement aux besoins des hydrologues, cette méthode cartographique devait encore s'avérer extensible et transposable. Pour ce faire, on a utilisé les images satellitaires. La cartographie des états de surface d'un petit bassin versant (9,14 km²) alimentant la mare d'Oursi au nord du Burkina Faso (Valentin [16]) a été étendue à l'ensemble du bassin de la mare (263 km²) à partir des données d'une image Landsat (Lointier et Lortic [12]). De même, les thèmes déterminés sur les bassins d'Oursi ont été transposés aux deux petits bassins versants de Gagara, situés à une cinquantaine de km de la mare (Albergel [1]).

Le fonctionnement hydrodynamique de chaque surface élémentaire est caractérisé par une relation de type :

$$Lr = A.Pu + B.IK + CPu IK + D$$

Le problème qui se pose, et qui n'est encore que très imparfaitement résolu, est d'étendre les résultats des parcelles de 1 m² au bassin versant, c'est-à-dire à comprendre comment se fait la composition des ruissellements élémentaires le long des versants. Sur les bassins imperméables et très imperméables ou dont l'imperméabilisation est croissante lorsque l'on passe du haut au bas des versants (cas fort heureusement très répandu en zone sahélienne) un modèle additif, pourtant très sommaire (les ruissellements élémentaires sont combinés au prorata des pourcentages occupés par chaque surface élémentaire), suffit à une estimation satisfaisante des fortes crues du bassin.

Pour les bassins plus perméables, l'introduction dans un modèle à discrétisation spatiale des cartes des états de surface et des fonctions de production qui leur sont associées, permet de modéliser le fonctionnement du bassin. C'est ainsi que Chevallier [7] arrive à simuler avec précision les niveaux de la mare d'Oursi, ou que Albergel [1] reconstitue, avec une erreur inférieure à 5 %, les volumes écoulés des deux bassins de Gagara.

Conclusion

Les mesures sous pluies simulées ont mis en évidence le rôle prépondérant des caractéristiques de la surface du sol, particulièrement le couvert végétal, l'activité faunique et le type de croûte, sur l'infiltrabilité.

De l'identification des grands types de croûtes, et d'autres critères relatifs à l'activité faunique, à la couverture et au travail du sol, découle une typologie des principales surfaces élémentaires. A chacune correspond un comportement hydrodynamique particulier.

S'il est possible de définir ainsi, à l'échelle du m², un fonctionnement hydrologique, à partir d'une description très simple du milieu, la transposition de ces résultats à l'échelle du petit bassin versant pose encore quelques problèmes. Pour tenter de les résoudre, des recherches sont menées actuellement selon trois voies :

- Utilisation conjointe de la télédétection pour la cartographie des états de surface et de MNT pour l'introduction, dans des modèles mathématiques de ruissellement, des positions respectives de ces différents états de surface.
- Mesure des ruissellements à l'échelle du versant pour tenter de mieux expliciter la composition des ruissellements élémentaires.
- Définition de nouveaux modèles mathématiques de ruissellement permettant une meilleure représentation du fonctionnement des bassins.

Références

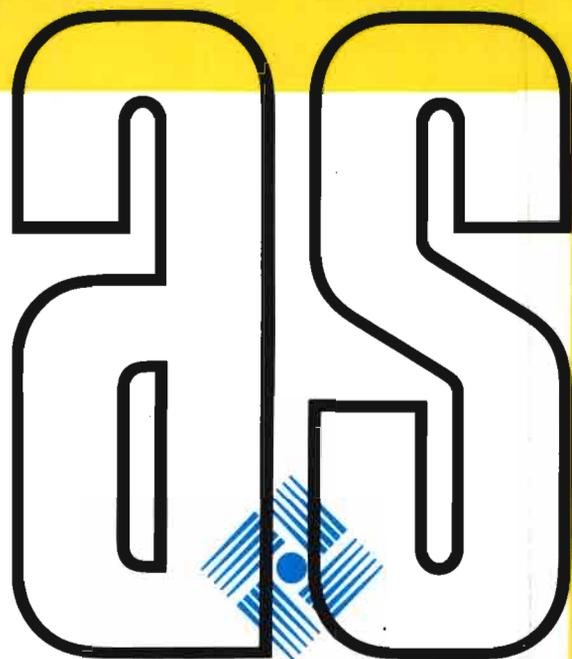
1. Albergel J. (1987). Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso. Du m² au km². Etude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. Thèse Univ. Paris VI, 336 p.

2. Albergel J., Ribstein P., Valentin C. (1986). L'infiltration : quels facteurs explicatifs ? Analyse des résultats acquis sur 48 parcelles soumises à des simulations de pluies au Burkina Faso. Journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier. Coll. ORSTOM, Colloques et Séminaires, pp. 25-48.
3. Asseline J., Valentin C. (1978). Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., XV(4), pp. 321-349.
4. Casenave A. (1982). Le minisimulateur de pluie. Conditions d'utilisation et principes de l'interprétation des mesures. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., XIX(4), pp. 207-227.
5. Casenave A., Guigen N., Simon J.-M. (1982). Etude des crues décennales des petits bassins versants forestiers en Afrique tropicale. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., XIX(4), pp. 229-252.
6. Casenave A., Valentin C. (1988). Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. ORSTOM-CEE, tome 1, 260 p., 43 fig. et cartes + annexes, tome 2, 197 photos.
7. Chevallier P. (1986). Simulation de pluie, télédétection, modélisation. Exemple de la Mare d'Oursi, Burkina Faso. Journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier. Coll. ORSTOM, Colloques et Séminaires, pp. 90-104.
8. Collinet J. (1986). Hydrodynamique superficielle de quelques types de sols du Sahel africain, comparaison des données fournies par deux dimensions de parcelles de simulation de pluie. Journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier. Coll. ORSTOM, Colloques et Séminaires, pp. 117-153.
9. Dubreuil P. (1972). Recueil des données de base des bassins représentatifs et expérimentaux, 1951-1969. ORSTOM, Paris, 916 p.
10. Dubreuil P., Morell M., Sechet P. (1975). Comportement et interactions des paramètres physiques des petits bassins versants semi-arides et intertropicaux. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., XII(1), pp. 13-36.
11. Lavelle P. (1983). The soil fauna of tropical savannas. II. The earthworms in : Tropical Savannas. Bourlière (F.) édit., Elsevier, Amsterdam, pp. 485-504.
12. Lointier M., Lortic B. (1984). Mare d'Oursi (Haute-Volta). Traitement numérique de la vue Landsat du 4 février 1976. ORSTOM, Cayenne, 13 p.
13. Puech C., Chabi Gonni D. (1983). Méthode de calcul des débits de crue décennale pour les petits et moyens bassins en Afrique de l'Ouest et Centrale. CIEH, 77 p.
14. Rodier J. (1975). Evaluation de l'écoulement annuel dans le Sahel tropical africain. Trav. et Doc. de l'ORSTOM, n° 46, Paris, 121 p. + fig.
15. Rodier J., Auvray C. (1965). Estimation des débits de crues décennales pour des bassins versants de superficie inférieure à 200 km² en Afrique Occidentale. ORSTOM-CIEH, Paris, 30 p., 13 fig.
16. Valentin C. (1981). Esquisse au 1/25 000^e des différenciations morpho-structurales de la surface des sols d'un petit bassin versant sahélien (Polaka-Oursi, Nord Haute-Volta). ORSTOM, Abidjan, 11 p.
17. Valentin C. (1986). Différencier les milieux selon leur aptitude au ruissellement : une cartographie adaptée aux besoins hydrologiques. Journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier. Coll. ORSTOM, Colloques et Séminaires, pp. 50-74.

André Kergreis
Jacques Claude

**UTILISATION
RATIONNELLE**
de L'EAU
des
**PETITS
BASSINS
VERSANTS**
en **ZONE
ARIDE**

AUPELF



actualité scientifique

British Library Cataloguing in Publication Data

Kergreis, André

Utilisation rationnelle de l'eau des petits
bassins versants en zone aride.

1. Hydrology

I. Title

551.49

ISBN 0-86196-315-6

Editions John Libbey Eurotext

6, rue Blanche, 92120 Montrouge,
France

Tél : (1) 47 35 85 52

John Libbey and Company Ltd

13 Smith Yard, Summerley Street,
London SW18 4HR, England

Tél : (81) 947 27 77

John Libbey CIC

Via Spallanzani 11,
00161, Rome, Italy

Tél : (06) 862.289

© 1991, Paris

Il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement le présent ouvrage — loi du 11 mars 1957 — sans autorisation de l'éditeur ou du Centre Français du Copyright, 6 bis, rue Gabriel-Laumain, 75010 Paris, France.

UTILISATION RATIONNELLE DE L'EAU DES PETITS BASSINS VERSANTS EN ZONE ARIDE

Journées scientifiques du Réseau
« Génie Para-Sécheresse » de l'UREF
organisées avec la collaboration
du Réseau Recherche Résistance à la Sécheresse (R3S)
et de l'Ecole Inter Etats d'Ingénieurs de l'Equipement
Rural (EIER)
EIER, Ouagadougou, 12-15 mars 1990

COORDINATION

André Kergreis

Jacques Claude

