

Modélisation du ruissellement en relation avec l'évolution saisonnière de la végétation (mil, arachide, jachère) au centre Sénégal

Surface runoff modelling related to seasonal vegetation cycles (millet, groundnut and fallow) in central Senegal

L. SÉGUI^{1,*}, J.-C. BADER¹

Reçu le 12 mai 1997, accepté le 8 août 1997*.

RÉSUMÉ

Sous climat soudanien caractérisé par une unique saison des pluies, les sols sont dénudés en fin de saison sèche suite au pâturage et aux travaux préparatoires au semis. Le ruissellement intense en début d'hivernage diminue progressivement avec la mise en place des couverts végétaux.

L'influence du développement de la végétation sur le ruissellement est étudié au moyen des données pluie-débit de 4 parcelles (50 m²) couvertes en mil, arachide, jachère ou maintenue dénudée du centre Sénégal au cours d'une saison des pluies (1994). Un modèle analogique de ruissellement à stockage de surface (BADER, 1994), dans lequel l'infiltration est une fonction croissante de la lame d'eau en surface du sol est ajusté sur les données. Le modèle présente 3 paramètres : un paramètre de transfert n , un paramètre de ruissellement H et un paramètre d'infiltration S . Une analyse de sensibilité menée sur les données de la parcelle de sol nu montre que le paramètre n est le plus sensible des trois.

Le calage numérique des paramètres sur chaque crue au cours de l'hivernage permet d'étudier leur évolution temporelle. Cette évolution est cohérente avec l'occupation de chaque parcelle. Les paramètres n et S de la parcelle de sol nu sont invariants sur la saison tandis que ceux des parcelles en végétation s'écartent progressivement des valeurs obtenues sur sol nu. Pour les parcelles en végétation, les valeurs de S divergent de celles du sol nu lorsque l'indice radiométrique de végétation (NDVI) servant à l'estimation du couvert dépasse 0,30-0,35 environ.

L'évolution des paramètres n et S des parcelles en végétation peut être reliée au temps écoulé depuis le semis (mil, arachide) ou le sarclage initial (jachère) et à l'état d'humectation du sol (pour S). On montre également que le paramètre

1. Laboratoire d'Hydrologie, ORSTOM, BP 5045, 34032 Montpellier Cedex 1, France.

* Les commentaires seront reçus jusqu'au 20 juillet 1998.

HI peut être estimé linéairement à partir d'un indice de rugosité de surface descriptif de la microtopographie.

Mots-clés : ruissellement, mil, arachide, jachère, Sénégal.

SUMMARY

The Sudanese climate is characterized by a rainy season and a dry season (mean annual rainfall between 400 and 900 mm). At the end of the dry season (June in the northern hemisphere), the landscape is completely bare under the effect of animal grazing or soil tillage. During the first rainfalls this leads to high runoff coefficients. These runoff coefficients decrease gradually as the amount of vegetation increases during the growing season (RODIER, 1984-1985; ALBERGEL, 1988).

This is particularly true in the Groundnut basin of central Senegal where millet and groundnut are cultivated every other year. As the vegetative cover increases, a system of macropores develops in the soil and preferentially induces water infiltration through mesofauna burrows and along root systems. Hence, many authors have distinguished matrix infiltration governed by the generalized Darcy's law, from preferential infiltration through macropores characterized by a strongly heterogeneous spatial distribution (GERMAN, 1990). These macropores are thought to be responsible for the proportional increase in infiltration with increase in rainfall intensity observed on several experimental plots (BOUCHARDEAU and RODIER, 1960; VALENTIN, 1985; COL-LINET, 1985; ALBERGEL, 1988). A more complete surface ponding or a differential distribution of the macroporosity in relation with the microtopography can contribute to this phenomenon.

A conceptual runoff model accounting for surface storage, which views infiltration as a function of water depth on the ground surface, is proposed to describe the aforementioned phenomenon under three characteristic vegetative canopies of central Senegal (millet, groundnut and fallow). The model (BADER, 1994) is a distributed, three parameter model that accounts for transfer between spatial elements (parameter n), runoff (parameter HI) and infiltration (parameter S). The model solves the equation of continuity according to an explicit scheme (forward time). The discharge exiting a spatial element is defined by a power function based on the water depth on the element. The value of the transfer parameter n (dimensionless) depends on the roughness and slope of the soil surface. Parameter HI (meters) is equivalent to the water depth from which runoff occurs and is found in the discharge expression. Infiltration is defined as the product of the square root of the depth of ponded water of a plot and a S parameter (dimensionless) representing surface porosity.

The experimental work took place on 4 rectangular 50 m² plots (10 m by 5 m) that were initially bare and weedy. At the beginning of the rainy season, two plots were cultivated in millet and groundnut, one left fallow and the fourth stripped by a powerful herbicide. The runoff was measured by a capacitive gauging system with each tank being equipped with a pressure transducer connected to a datalogger. A tipping bucket rain gauge was also connected to the datalogger and rainfall and runoff were recorded simultaneously. The measurements were made to a precision of 4 mm in the tanks (0.16 mm uncertainty for surface runoff depth). With a total seasonal rainfall of 711 mm in 1994, the cumulative surface runoff varied between 40 mm for the fallow plot to 150 mm for the bare soil plot. The cultivated groundnut and millet plots had cumulative runoff depths of 55 and 60 mm, respectively. The fallow plot would have had less runoff if it had been more than one-year old. The microtopography of each plot was evaluated using a profile meter. The surface roughness was estimated by the standard-error of measured relative elevations (GUILLOBEZ and

ZOUGMORE, 1994). Measurements were taken after each significant rainfall and following tillage operations. The roughness index varied from 18 mm following vigorous weeding of the groundnut plot to 5 mm for the fallow plot whose microtopography remained constant throughout the season. The development of the vegetative cover was indirectly followed by the calculation of a vegetation index (NDVI) derived from red and near infrared reflectances measured with a field radiometer. Although this index tends to saturate with full ground cover, it nevertheless remains a good indicator at the start of vegetative growth.

The proposed model was used to reproduce measured runoff during several storm events. Calculations were undertaken with a 10-s time step on a 1m-long spatial element with a uniform set of parameters for each plot. A sensitivity analysis was performed for all runoff events on the bare plot. Hydrograph characteristics (runoff volume, peak discharge and time-to-peak) were particularly sensitive to variations in the transfer parameter (n) and to a lesser extent to changes in the infiltration (S) and runoff (HI) parameters. For the 42 measured runoff hydrographs for all four plots, the results were excellent: 70% of the simulated hydrographs had a Nash's coefficient greater than or equal to 0.90.

For each plot, the seasonal chronicle of each parameter is coherent with the plot cover. The parameters for the bare plot were invariant throughout the rainy season. However for the other plots, they varied with the vegetative cover. At the beginning of the growing season, they were similar to those obtained on bare soil and, as the vegetative cover increased, they varied until the NDVI exceeded 0.35 (approximately 20 days after seeding). The evolution of the n and S parameters for the cultivated plots was linearly extrapolated from past events (seeding for the cultivated plots and chemical weeding for the fallow plot) and for S to an antecedent precipitation index. Farming practices that modified surface roughness needed to be accounted for, as well. For the transfer parameter (n) of the groundnut plot, an increase of approximately 0.4 was observed when a rainfall event followed weeding. No significant increase was seen for the millet plot. A linear relationship between the index of roughness and the roughness parameter (HI) was also derived.

Key words : surface runoff, millet, groundnut, fallow, Senegal.

1 – INTRODUCTION

Classiquement, l'importance et l'intensité du ruissellement, en un site restreint, sont expliquées par des facteurs relativement constants et intrinsèques (topographie, nature du sol), des facteurs contingents (hyétogramme de la précipitation, réserve hydrique) et des facteurs évolutifs (état de surface, couvert végétal). Dans la savane soudano-sahélienne, l'évolution saisonnière du couvert végétal apparaît comme l'un des facteurs primordiaux : plusieurs auteurs (RODIER, 1984-1985 ; ALBERGEL, 1988) ont attribué les forts coefficients d'écoulement de début d'hivernage aux sols encore dénudés à cette date. Si le milieu naturel n'est pas surpâturé (HOLT *et al.*, 1996), l'activité faunique associée à l'herbe sèche de la précédente saison des pluies diminue déjà le ruissellement en début d'hivernage. Par contre, dans les zones rurales densément peuplées, les cultures occupent l'essentiel du paysage et les travaux avant semis effectués avant les premières pluies, entraînent une dénudation complète du sol, propice au ruissellement. Deux mois plus tard (mi-août), le recouvrement végétal atteint

80 à 100 %. CASENAVE et VALENTIN (1989) ont ainsi proposé de minorer les fonctions de production (pluie-lame ruisselée) pour un état de surface donné au-delà d'un seuil de 50 % de couverture végétale. THEBE (1987) a directement introduit le pourcentage de couvert végétal comme variable explicative dans la fonction de production de petits bassins du nord-Cameroun. La nature du couvert végétal doit aussi être prise en compte : au Sénégal, PEREZ (1994) a ainsi observé de plus faibles coefficients de ruissellement sous couvert d'arachide que de mil. Induite par le développement de la végétation, une macroporosité s'organise au cours de la saison dans le sol. L'infiltration s'effectue préférentiellement dans les tunnels creusés par la mésofaune (vers, termites, iules, fourmis etc.) ou au long des racines. De nombreux auteurs ont ainsi distingué une infiltration matricielle répondant à la loi de Darcy généralisée, d'une infiltration préférentielle dans les macropores à distribution spatiale fortement hétérogène (large revue effectuée par GERMAN (1990)). Cette variabilité à petite échelle spatiale de l'aptitude à l'infiltration des sols est à l'origine de l'augmentation de l'infiltration en fonction de l'intensité de pluie, constatée sur parcelles expérimentales par plusieurs auteurs (BOUCHARDEAU et RODIER, 1960 ; VALENTIN, 1981 ; COLLINET, 1985 ; ALBERGEL, 1988). Les explications peuvent être multiples. En premier lieu, on peut considérer une mise en charge plus complète de la surface (COOK, 1946). En second lieu, le phénomène peut s'expliquer par une répartition différentielle des macropores en surface, en fonction de la microtopographie. Les zones basses sont moins perméables que les points hauts du microrelief occupé par la végétation. Lors de l'accroissement du ruissellement avec l'intensité de pluie, les zones les plus perméables sont inondées. Cette répartition a été décrite sur des versants occupés par de la végétation naturelle au Kenya et en Côte d'Ivoire (DUNNE *et al.*, 1991 ; PLANCHON, 1991) ainsi que sur les sols cultivés au Sahel (CASENAVE et VALENTIN, 1989).

Pour décrire le ruissellement par événement pluvieux sous trois couverts végétaux caractéristiques du centre Sénégal, on propose ici d'utiliser un modèle conceptuel simple à trois paramètres (BADER, 1994) rendant compte de l'augmentation de l'infiltration avec l'intensité de la pluie. Les principes du modèle seront d'abord rappelés, puis on présentera le dispositif de mesures et les données collectées. On effectuera ensuite une analyse de sensibilité, avant de décrire l'évolution des paramètres sur la saison et la possibilité de calculer ceux-ci en fonction du développement du couvert et de la topographie de la surface du sol.

2 – RAPPEL SUR LE MODÈLE DE RUISSÈLEMENT À STOCKAGE DE SURFACE

Le modèle développé par BADER (1994) est un modèle monodimensionnel à 3 paramètres. Il a été mis au point pour tenter de représenter et d'extrapoler des mesures de ruissellement faites au Togo sous mini-simulateur de pluie, sur des sols où l'infiltration semble croître en fonction de l'épaisseur d'eau en surface. Ce modèle est basé sur une analogie entre une parcelle élémentaire et un système hydraulique simple composé d'une cuve dont le fond est percé d'un trou et dont l'un des côtés est constitué d'un déversoir à lame mince. (*fig. 1*).

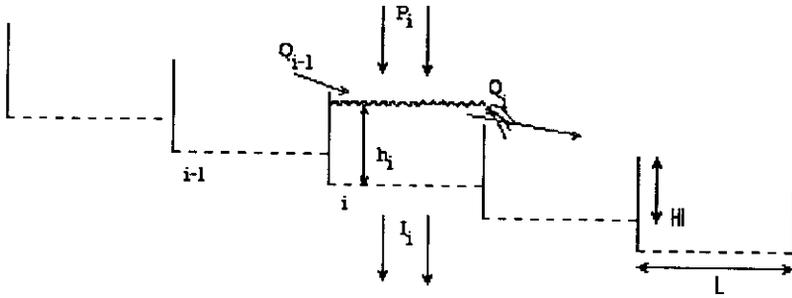


Figure 1 Schéma de principe du modèle de Bader (1994).
Schematic representation of Bader's model (1994).

Sur la maille i :

Q_{i-1} et Q_i sont les débits ruisselés entrant et sortant ($m^3 s^{-1}$),

h_i est l'épaisseur d'eau moyenne (m),

P_i est l'intensité de la pluie ($m s^{-1}$),

I_i le débit infiltré ($m^3 s^{-1}$),

L est la longueur de la maille, dirigée dans le sens de l'écoulement (m),

l_0 est la largeur de la maille (m).

À partir de l'équation de continuité, h_i est calculé selon un schéma explicite dans le temps.

$$h_i(t+dt) = \max \left\{ 0, h_i(t) + \left[\frac{Q_{i-1}(t)}{Ll_0} + P_i(t) - \frac{Q_i(t)}{Ll_0} - \frac{I_i(t)}{Ll_0} \right] dt \right\} \quad (1)$$

L'équation du débit utilisée dans le modèle, correspond à la loi d'un déversoir à lame mince :

$$\frac{Q_i}{l_0} = K(h_i - HI)^n \quad \text{si } h_i > HI \quad (2)$$

$HI(m)$ est la hauteur d'eau à partir de laquelle il y a ruissellement.

$K(m^{2-n} s^{-1})$ et n (sans dimension) dépendent de la rugosité du lit et de la pente.

La dimension de K montre que K et n ne sont pas totalement indépendants. Ceci est d'ailleurs mis en évidence par MAHESHWARI (1994) sur les paramètres d'une équation hauteur-ruissellement similaire à l'équation (2), à partir de données recueillies sur différents terrains. Afin de diminuer le nombre de paramètres du modèle, on prend donc le parti de fixer K égal à 1. Les divers essais de calage effectués sur nos données, montrent que cette simplification n'altère pratiquement pas la qualité d'ajustement du modèle.

Le modèle, étant monodimensionnel, suppose que le débit infiltré sur la parcelle, ainsi que le débit ruisselé à l'exutoire, sont proportionnels à la largeur de la parcelle. Les équations (1) et (2) où les termes Q_i et I_i apparaissent toujours divi-

sés par l_0 , relie donc en fait les débits ruisselés et infiltrés par unité de largeur à l'intensité de pluie et à la lame d'eau en surface.

L'équation 2 peut être rattachée plus généralement à l'expression du débit dans un écoulement uniforme (pente de la ligne d'eau égale à la pente du lit). Sous ce régime, la force de frottement est contrebalancée par la gravité. De l'équation d'équilibre des forces, on déduit la formule de Chézy :

$$v = C\sqrt{Rp} \quad (3)$$

avec v vitesse ($m.s^{-1}$),
 C coefficient de frottement ($m^{1/2}.s^{-1}$),
 R rayon hydraulique (m),
 p pente du lit.

Dans le cas d'un ruissellement en nappe, le rayon hydraulique (section mouillée/périmètre mouillé) est environ égal à l'épaisseur de la lame d'eau. Le débit s'exprime donc par :

$$Q = C \times l_0 h \times \sqrt{hp} = Cl_0 \sqrt{p} \times h^{3/2} \quad (4)$$

La forme empirique de cette équation rencontrée dans les modèles de ruissellement (MOORE et FOSTER, 1990) est :

$$\frac{Q}{l_0} = \alpha h^m \quad (5)$$

L'infiltration I_i est exprimée comme une fonction de l'épaisseur d'eau sur la maille.

$$I_i = SLl_0 \sqrt{2gh_i} \quad (6)$$

g est l'accélération de la pesanteur,
 S (sans dimension) est assimilable à une porosité surfacique,
 I_i augmente avec la lame d'eau sur le sol. L'infiltration varie donc avec le hystérogamme de l'averse.

3 – DISPOSITIF DE MESURES ET DONNÉES RECUEILLIES

L'étude a porté sur les cultures de mil et d'arachide associées en rotation annuelle dans le centre du Sénégal. En 1994, quatre parcelles de $50 m^2$ (largeur = 5 m, longueur = 10 m) ont été implantées sur un sol nu et sarclé initialement. Deux d'entre elles ont été cultivées (mil et arachide, semis le 5 juillet) en lignes de semis isohypses, en subissant des sarclages réguliers, une autre a été laissée en jachère et la dernière a servi de témoin, maintenue dénudée au moyen d'un dés-herbage chimique puissant en début de saison. La parcelle en jachère a progressivement été recouverte d'une végétation naturelle au cours de la saison tandis

que le pouvoir rémanent de l'herbicide a permis de maintenir dénudée la dernière parcelle durant tout l'hivernage sans intervention mécanique (sarclage) qui modifierait l'état de surface du sol. Les parcelles de pente uniforme (1,3 %) sont délimitées par des tôles enfoncées de 10 cm dans le sol sur 3 côtés. La bordure aval, ouverte, est matérialisée par une gouttière collectant le ruissellement vers une cuve parallélépipédique de 1 m² de section. La mesure du ruissellement est faite par capacité à l'aide d'un capteur de pression échantillonnant la hauteur d'eau dans la cuve pour toute variation supérieure à 4 mm soit une précision sur la lame équivalente d'eau ruisselée de 0,08 mm. Chaque basculement des augets (20 cm³) d'un pluviographe (bague réceptrice de 400 cm²) est détecté par un capteur de proximité et stocké dans la centrale d'acquisition recueillant les niveaux d'eau des cuves. Précipitation et ruissellement étant enregistrés sur la même base de temps, le problème fréquent de calage dans le temps des données pluie-débit disparaît. La pluviométrie annuelle, en 1994, a été de 711 mm soit légèrement déficitaire par rapport à la valeur médiane de 820 mm (sur une série 1932-1992) (fig. 2). La répartition temporelle des précipitations est régulière du 15 juin à fin octobre, à l'exception du mois de septembre plus sec. Ceci ne constitue pas un handicap pour les cultures qui sont déjà en pleine maturité. Les lames ruisselées cumulées varient entre 40 mm pour la parcelle de jachère et 150 mm pour la parcelle de sol nu, soit des coefficients de ruissellement saisonnier respectivement de 5,6 et 21 %. La différence de ruissellement entre les parcelles cultivées et la jachère est moindre car celle-ci est de l'année. Sur une jachère de 4 ans d'âge, nous avons observé une lame ruisselée saisonnière dix fois moindre que sur les parcelles cultivées (SÉGUI, 1995). En une minute, la plus forte intensité précipitée (observée le 25 septembre 1994) a été de 213 mm h⁻¹. Il en a résulté des intensités de ruissellement de 170 mm h⁻¹ pour la parcelle de sol nu, 60 mm h⁻¹ pour les parcelles cultivées et 20 mm h⁻¹ pour la parcelle de jachère.

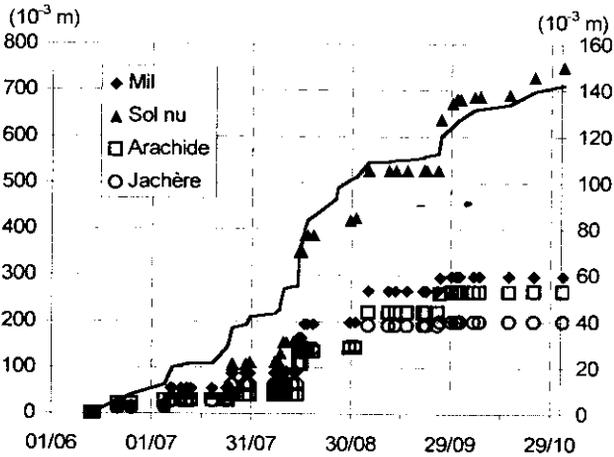


Figure 2

Hauteurs précipitées cumulées (trait plein) et lames ruisselées cumulées sur les parcelles durant l'hivernage 1994.

Cumulative rainfall depth (continuous line) and cumulative depth of surface runoff on the plots during the rainy season 1994.

Sur chaque parcelle, la rugosité de surface du sol est estimée au moyen d'un profilographe à aiguilles. Cet appareil est constitué d'un cadre métallique supportant 37 tiges verticales régulièrement espacées sur un mètre. La dénivellation enregistrée par la tige sur le sol est reportée à l'autre extrémité sur une feuille de papier millimétré. La rugosité de surface est représentée par l'écart-type des 37 valeurs connues à (1 mm (GUILLOBEZ et ZOUGMORE, 1994). Cet indice statistique est plus sensible à la profondeur maximale atteinte qu'à la pente maximale observée sur le profil (PEREZ, 1994). Quatre répétitions, perpendiculairement aux rangs, sont entreprises sur chaque parcelle. L'indice de rugosité de surface de la parcelle est défini comme la moyenne des quatre essais. On effectue des mesures après chaque travail du sol et chaque pluie importante. La figure 3 présente l'évolution de l'indice de rugosité de surface sur les parcelles en végétation. Les maxima de rugosité correspondent aux mesures suivant les sarclages. Les rugosités du mil et de l'arachide sont comparables, à l'exception du 23 juillet où l'arachide a, en plus, été buttée. La rugosité moyenne de surface de la parcelle de sol nu est d'environ 4 mm sur la saison.

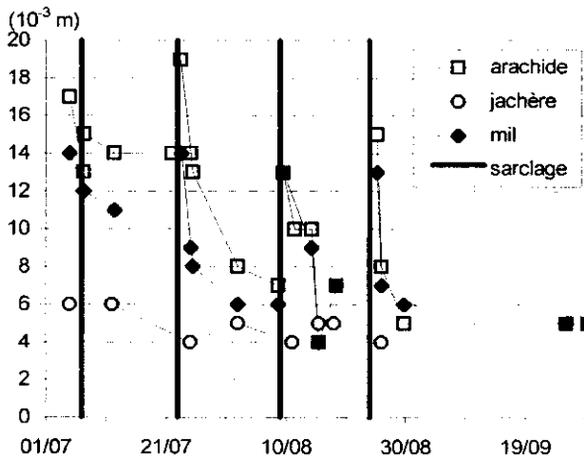


Figure 3 Évolution de l'indice de rugosité de surface durant la saison des pluies 1994 sur les 3 parcelles en végétation.

Change of the roughness index on the 3 vegetative plots during the rainy season 1994.

L'importance de la couverture végétale du sol a été estimée indirectement à l'aide d'un radiomètre de terrain. Cet appareil, suspendu à une potence à 3 m au dessus du sol, nous a permis de déterminer la réflectance des canaux rouge (R_2 : 0,615-0,680 μm) et proche infrarouge (R_3 : 0,79-0,89 μm) sur des cibles de 50 cm de diamètre à l'intérieur de chaque parcelle. Vingt-deux mesures étaient faites sur la parcelle puis moyennées. La moyenne des coefficients de variation des réflectances varie entre 7 % pour le sol nu et 14 % pour le mil. Un indice de végétation (NDVI) égal au rapport $(R_3 - R_2)/(R_3 + R_2)$ était ensuite calculé. Le NDVI est un indicateur de la couverture végétale du sol et de la couleur de la végétation (plus ou moins chlorophyllienne). On considère que le recouvrement

végétal est de 50 % lorsque NDVI atteint 0,5 (Qi *et al.*, 1994 ; SÉGUI, 1996). La figure 4 présente l'évolution de cet indice sur la saison.

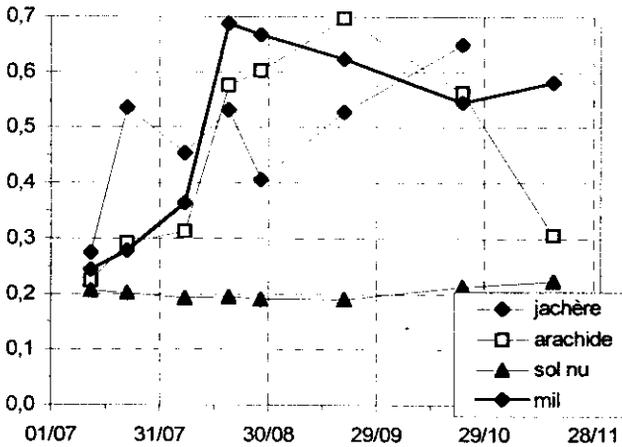


Figure 4 Évolution de l'indice de végétation (NDVI) durant la saison des pluies 1994.
Change of the vegetation index (NDVI) during the rainy season 1994.

Sur la parcelle de sol nu, l'indice reste égal à 0,2 durant toute la saison des pluies. Sur la parcelle en jachère, on observe une mise en place rapide de la végétation, l'indice atteignant son plafond vers le 25 juillet. Sur les parcelles cultivées, la couverture du sol est plus tardive, vers le 15 août. En fin de saison, la chute brutale de l'indice pour la parcelle d'arachide correspond à la récolte dénudant le sol. Le mil est récolté fin septembre par simple prélèvement des épis. Le développement d'adventices entre les pieds entraîne une légère remontée de l'indice en novembre.

4 – ANALYSE DE SENSIBILITÉ DU MODÈLE

Le modèle décrit précédemment a été utilisé pour reproduire, sur chacune des parcelles, les débits ruisselés mesurés lors des différentes averses. Les calculs sont effectués au pas de temps de 10 secondes, sur des mailles de longueur 1 mètre, avec un jeu de paramètre n , HI et S uniforme sur chaque parcelle. L'ajustement du modèle consiste à déterminer les valeurs de n , HI et S qui optimisent le critère de Nash (RIBSTEIN, 1990) calculé sur les débits mesurés et modélisés à l'exutoire des parcelles et égal à :

$$1 - \frac{\sum (Q_{obs} - Q_{cal})^2}{\sum (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (7)$$

avec :

Q_{obs} : débits observé et calculé à l'exutoire de la parcelle,

$\overline{Q_{obs}}$: moyenne des débits observés.

Ce critère adimensionnel varie entre 1 (ajustement parfait) et $-\infty$. Il est égal à 0 si l'on pose les débits calculés égaux à la moyenne des débits observés.

Une analyse de sensibilité a été menée afin de déterminer quels sont parmi les trois paramètres ceux dont les variations altèrent le plus la prévision du ruissellement. Le test a porté sur l'ensemble des crues de la parcelle de sol nu, où aucune modification de l'état de surface n'intervient durant la saison des pluies. La sensibilité est évaluée en considérant l'importance de la modification des caractéristiques de l'hydrogramme (temps d'apparition du ruissellement (T_r) mesuré à partir du début de l'averse, volume ruisselé (V_r), débit maximal (Q_{max}) et temps correspondant à ce dernier (T_{max})) suite au changement des paramètres d'entrée. La figure 5 regroupe les fonctions de répartition des écarts relatifs occasionnés pour chaque caractéristique d'hydrogramme, par des modifications des paramètres d'entrée du modèle de $\pm 25\%$ à partir des valeurs optimisées.

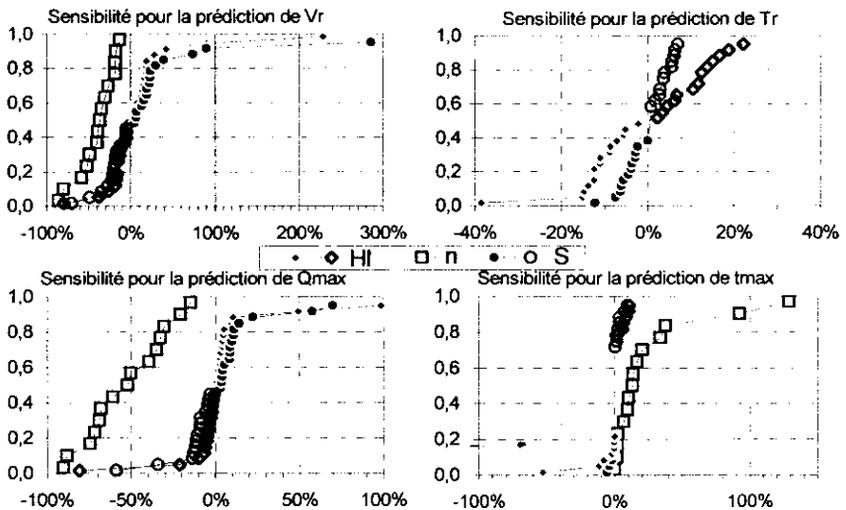


Figure 5 Fonction de répartition des écart relatifs aux valeurs optimales du volume ruisselé (V_r), du temps d'apparition du ruissellement (T_r), du débit maximal (Q_{max}) et temps associé (T_{max}) pour des variations des paramètres HI, n et S de -25% (symboles pleins) et $+25\%$ (symboles vides) sur la parcelle de sol nu.

Cumulative distribution function of the relative deviations from optimal values of volume of surface runoff (V_r), ponding time (T_r), peak discharge (Q_{max}) and time associated (T_{max}) for variations of HI, n and S parameters of -25% (black symbols) and $+25\%$ (white symbols) on the bare plot.

Le paramètre n gouvernant le transfert de maille à maille est le plus sensible pour la détermination de V_r , Q_{max} et T_{max} . Des valeurs de n inférieures à 1,37 induisent, dans certains cas, pour le pas de temps de discrétisation retenu (10 s) des oscillations numériques dans le calcul des débits. Nous n'envisageons donc pour ce paramètre qu'une variation de + 25 % à partir des valeurs optimales qui entraînent les résultats suivants :

- 75 % des V_r s'écartent de plus de 20 % en dessous des V_r optimaux,
- 90 % des Q_{max} s'écartent de plus de 20 % en dessous des Q_{max} optimaux,
- 30 % des T_{max} s'écartent de plus de 20 % au-dessus des T_{max} optimaux.

On vérifie que T_r , indépendant de n , est plus sensible à HI qu'à S . Mais la sensibilité de T_r à HI est modérée car seulement 10 % des T_r s'écartent de ± 20 % des T_r optimaux lorsque HI varie de ± 25 %.

On note que chacune des autres caractéristiques de l'hydrogramme est modérément sensible aux variations de HI ou S . Cette faible sensibilité a pour conséquence de rendre la détermination des paramètres HI et S moins précise que celle de n , lors des ajustements.

Pour évaluer l'influence du pas d'espace, nous avons également modélisé les crues de la parcelle de sol nu, avec des mailles de longueur 2, 5 et 10 m. La qualité de la modélisation n'est pas altérée en réduisant le nombre de mailles de dix à une mais les paramètres n , HI et S sont légèrement modifiés. Lorsque la maille est allongée, HI augmente tandis que n et S diminuent. Entre une discrétisation au pas de un mètre et une au pas de dix mètres, la variation des paramètres est de l'ordre de 10 %.

Pour un pas d'espace de un mètre, des essais avec un pas de temps de 30 s ont présenté de très nombreuses oscillations numériques.

5 – ÉVOLUTION DES PARAMÈTRES DU MODÈLE AU COURS DE LA SAISON ET IDENTIFICATION

Entre le 25 juillet et le 1^{er} novembre 1994, 42 hydrogrammes de ruissellement, toutes parcelles confondues, ont été modélisés en utilisant le coefficient de Nash comme critère d'ajustement. Les premières averses après semis (7/7 et 24/7) n'ont pu être étudiées à cause de dysfonctionnements du système d'enregistrement. Sur la figure 6, on constate que la modélisation est la meilleure sur les parcelles non cultivées où tous les hydrogrammes ont un coefficients de Nash supérieur à 0,80. Sur les parcelles de mil et d'arachide, seulement 70 % des hydrogrammes ont un coefficient dépassant 0,80. Une explication peut être une hétérogénéité à l'intérieur des parcelles cultivées liée aux interventions humaines et non prise en compte par la modélisation avec un jeu de paramètres uniformes. Enfin, les plus mauvais ajustements sont observés sur les crues de très faibles débits (1-3 mm h⁻¹).

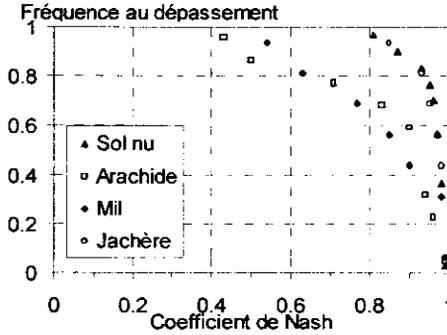


Figure 6 Fréquence au dépassement du critère d'optimisation du modèle (coefficient de Nash) sur les 42 hydrogrammes de ruissellement.

Exceedence probability of the fitting criterion (Nash's coefficient) on the 42 runoff hydrographs.

5.1 Le paramètre de transfert n

Comme on l'a vu plus haut, n est lié à la rugosité du lit. Cette notion englobe la rugosité de surface et le freinage de l'écoulement par la végétation. Fort logiquement, n reste constant (égal à 1,41, écart-type : 0,03) sur toute la saison pour la parcelle de sol nu, sans modification de l'état de surface (fig. 7). La pente d'un ajustement linéaire de n en fonction du temps est non significativement différente de zéro, au seuil de 5 %. Sur les parcelles en végétation, on remarque une augmentation de n au cours de la saison à partir de valeurs comparables à celle du sol nu. Fin septembre, n atteint 1,80 environ. D'après l'équation (2), cette augmentation de n équivaut, à débit ruisselé égal, à une augmentation du stock d'eau en surface (car $h - Hl < 1$ m). La figure 5 nous montre également qu'elle équivaut à un allongement des temps de transfert. L'augmentation de n est à associer au développement des couverts qui freinent le ruissellement. Avant le 10 août, les parcelles cultivées ont un couvert faible (NDVI inférieur à 0,35 sur la figure 4). Leurs valeurs de n sont très voisines de celles de la parcelle de sol nu. Par contre, la jachère a déjà le 25 juillet un couvert important (NDVI de 0,5), sa valeur de n (1,67) est déjà très différente de celle du sol nu (1,41). À cette tendance saisonnière se surimpose l'effet des sarclages sur les parcelles cultivées. Les sarclages du 22 juillet et du 9 août entraînent une majoration de n de l'ordre de 0,4 sur la parcelle d'arachide. À l'averse consécutive au dernier sarclage (24 août), la majoration de n est plus faible (0,1). L'augmentation de n suivant le travail du sol est moins visible sur la parcelle de mil.

Pour chaque parcelle en végétation, après retrait des valeurs consécutives aux sarclages (pour le mil : 14/8 et pas d'enregistrement le 25/8, pour l'arachide : 25/7, 14/8 et 25/8/1994a), une régression linéaire a pu être établie (fig. 7) entre les valeurs de n et le temps T compté en jours depuis le 5 juillet 1994 ($T = 0$). Cette date correspond au jour du semis pour les parcelles de mil et d'arachide et au sarclage initial pour la parcelle de jachère. Nous n'avons pas relié n à l'indice de végétation (NDVI) car n croît tout au long de la saison tandis que NDVI plafonne rapidement. La croissance de n dépend de l'importance du recouvrement végétal du sol et d'autres facteurs induits comme, par exemple, la macroporosité

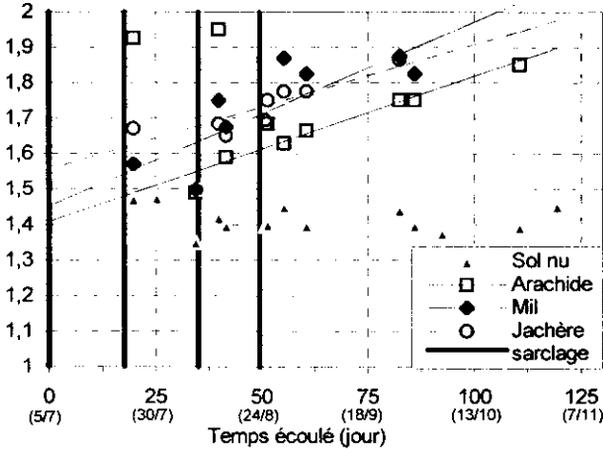


Figure 7 Évolution du paramètre de transfert n au cours de la saison des pluies 1994.

Change of the transfer parameter n during the rainy season 1994.

développée progressivement par la mésofaune. Calculées sur chacun des couverts, les équations suivantes décrivent l'évolution saisonnière de n :

$$\begin{aligned}
 n_{\text{jachère}} &= 0,0035 T + 1,55 & n &= 7 & r^2 &= 0,79 & \text{pour } T < 125 \text{ jours,} \\
 n_{\text{mil}} &= 0,0052 T + 1,45 & n &= 7 & r^2 &= 0,69 & \text{pour } T < 100 \text{ jours,} \\
 n_{\text{arachide}} &= 0,0041 T + 1,41 & n &= 8 & r^2 &= 0,90 & \text{pour } T < 125 \text{ jours,}
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

À partir d'expérimentations sur des parcelles de pentes diverses semées en blé ou laissées en herbe, MAHESHWARI (1994) a ajusté sur les débits Q par unité de largeur ($m^2 \cdot s^{-1}$) et les hauteurs d'eau h observés (m), la formule suivante :

$$Q = kh^a \sqrt{p} \tag{9}$$

avec $k (m^{2-a} s^{-1})$ et a (sans dimension) paramètres dépendant de la rugosité, de la pente,

p pente de la ligne d'eau, quasi confondue avec la pente du lit.

Soixante-dix sept essais ont été effectués avec des hauteurs d'eau variant entre 25 et 810 mm. Il est montré que les valeurs ajustées de K et a sont liées.

Lorsque le ruissellement est généralisé sur nos parcelles, l'importance de Hl est faible dans l'équation (2). En posant Hl nul et en égalisant les deux formules du débit par unité de largeur (équations 2 et 9), on obtient :

$$\begin{aligned}
 a &= n \\
 k &= \frac{K}{\sqrt{P}}
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

La pente de nos parcelles étant d'environ 1,3 % et en supposant la ligne d'eau parallèle à cette pente, K ayant été posé égal à 1, on détermine k égal à 8,77. Pour cette valeur de k, le coefficient a de Maheshwari varie environ entre 1,4 et

2,15. Ceci correspond bien aux valeurs extrêmes de n calculées sur nos parcelles dont l'ordre de grandeur est également compatible avec les valeurs obtenues par BADER (1994) sur diverses parcelles de 1m^2 testées au Togo (entre 1,78 et 2,14).

5.2 Le paramètre d'infiltration S

Comme pour n , le paramètre S de la parcelle de sol nu reste stable sur toute la saison ($20,6 \cdot 10^{-6}$ avec un écart-type de $3,4 \cdot 10^{-6}$). Égales aux valeurs de la parcelle de sol nu en début de saison, les valeurs de S des parcelles en végétation augmentent ensuite, ce qui indique une augmentation des flux infiltrés (équation 6).

Sur toute la saison, la jachère présente les plus fortes valeurs de S (fig. 8). Faute de ruissellement après cette date, la dernière valeur connue de S sur la jachère est de $92 \cdot 10^{-6}$ le 25 septembre, soit plus du quadruple de celle relative au sol nu.

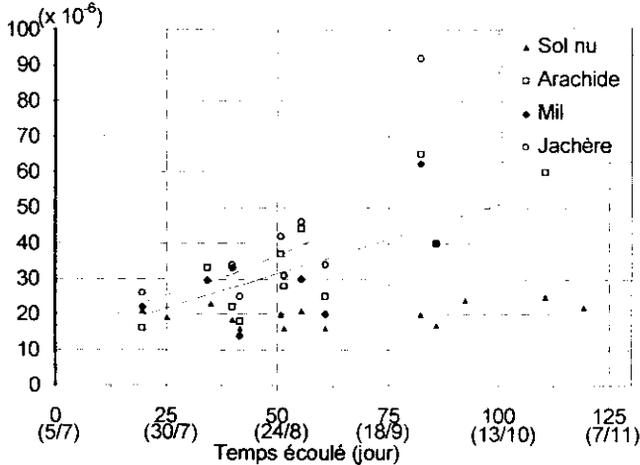


Figure 8

Évolution du paramètre d'infiltration S au cours de la saison des pluies 1994. (trait continu : valeurs de S pour une valeur d'IPA moyen sur la saison de 13×10^{-3} m sur les parcelles cultivées ; tirets : valeurs de S moyen sur la parcelle en jachère sans prise en compte du terme correctif fonction d'IPA).

Change of the S infiltration parameter during the rainy season 1994 (continuous line: S values for an average value of IPA of 13×10^{-3} m during the season on the cultivated plots; dashed line: medium S values on the fallow plot without considering the corrective term function of API).

Logiquement, S doit être lié au temps pour définir l'influence de la végétation et à un état d'humectation du sol. L'indice des précipitations antérieures (IPA) défini par LINSLEY *et al.* (1949) est sensé représenter cet état à un instant donné. Son expression est la suivante :

$$\text{IPA}_{i+1} = (\text{IPA}_i + F_i) \exp[-0,5(t_{i+1} - t_{i,f})] \quad (11)$$

avec IPA_{i+1} indice au début de l'averse de rang $i + 1$ (m),
 IPA_i indice au début de l'averse de rang i (m),
 F_i lame infiltrée lors de l'averse de rang i (m),
 t_{i+1} date (jour julien) du début de l'averse de rang $i + 1$,
 $t_{i,f}$ date (jour julien) de la fin de l'averse de rang i .

Le paramètre S sur les parcelles de mil et d'arachide présentant des évolutions voisines, nous avons calculé une seule régression multilinéaire à partir de T ($T = 0$, le 5 juillet 1994) et IPA sur les deux parcelles regroupées :

Si $21 \text{ jours} < T < 125 \text{ jours}$ et $IPA < 45 \text{ mm}$,

$$S_{\text{arachide, mil}} = (0,39 T - 310 IPA + 15,94) 10^{-6} \quad n = 19 \quad r^2 = 0,64 \quad (12)$$

La variable explicative principale de la régression est T dont la pente est significativement différente de zéro au seuil de 1 %. Par contre, IPA la variable secondaire a un coefficient de pente significativement différent de zéro qu'au seuil de 13 %. La valeur négative du coefficient de pente montre cependant bien une diminution de S lorsque le sol est plus humide.

Pour la parcelle de jachère, une fonction linéaire représente mal l'évolution saisonnière de S . La courbe moyenne suivante a été adoptée :

Si $10 \text{ jours} < T < 125 \text{ jours}$ et $IPA < 45 \text{ mm}$,

$$S_{\text{jachère}} = [20 \exp(0,015(T - 10)) - 316 IPA + 6,67] 10^{-6} \quad n = 8 \quad r^2 = 0,71 \quad (13)$$

Pour des temps écoulés inférieurs à 10 et 21 jours respectivement sur la jachère et les parcelles cultivées, la valeur de S peut être prise égale à celle du sol nu ($20 \cdot 10^{-6}$). Pour ces temps, les couverts ne sont probablement pas suffisants pour que la mésofaune se développe et induise une macroporosité croissante. Aux dates associées à ces temps, l'indice radiométrique de végétation NDVI (fig. 4) est compris entre 0,30 et 0,35 quelle que soit la nature du couvert.

5.3 Le paramètre de ruissellement HI

On note sur la figure 9 que le paramètre HI n'évolue pas en cours de saison pour le sol nu et la jachère. Pour les parcelles cultivées, HI augmente à la suite de chaque sarclage. Ceci est cohérent avec la définition de HI comme la hauteur d'eau limite à partir de laquelle le ruissellement débute (équation 2).

Les valeurs de HI sur le sol nu (2,5 mm) sont du même ordre que des hauteurs d'eau mesurées sous pluies naturelles sur des parcelles dénudées d'un site proche. Sur la figure 10, on a reporté le dernier indice de rugosité mesurée avant la pluie et le paramètre HI déterminé sur l'hydrogramme de ruissellement de la pluie. L'équation linéaire suivante (en mm) a été établie :

Si rugosité $< 15 \text{ mm}$,

$$HI = 0,41 \text{ Rugosité} + 0,95 \quad n = 17 \quad r^2 = 0,85 \quad \text{pour Rugosité} < 15 \text{ mm} \quad (14)$$

Cette relation établie sur les parcelles cultivées permet de retrouver les valeurs de HI calculées sur les parcelles de jachère et de sol nu. Pour des rugosités mesurées moyenne de 4,5 mm sur le sol nu et de 4,9 mm sur la jachère, on détermine par l'équation 14 des HI respectivement égaux à 2,8 et 2,9, valeurs proches de celles obtenues par optimisation.

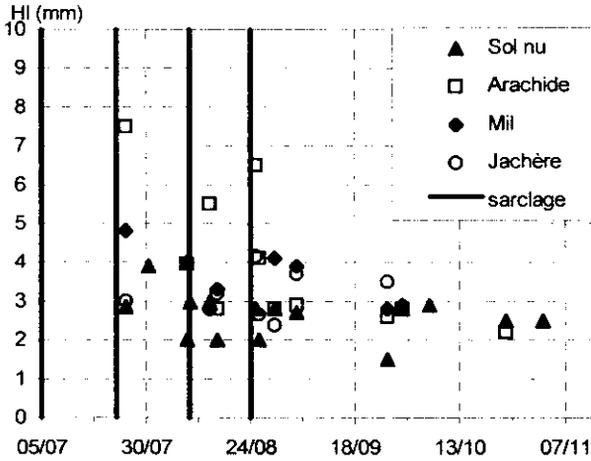


Figure 9 Évolution du paramètre HI (mm) au cours de la saison des pluies 1994.
Change of the runoff HI parameter during the rainy season 1994.

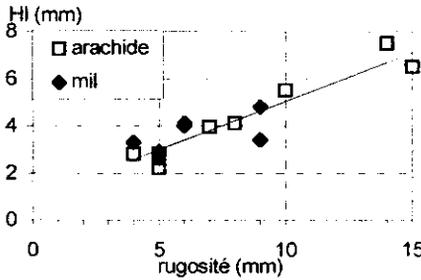


Figure 10 Relation entre rugosité de surface et HI sur les parcelles de mil et d'arachide.
HI runoff parameter as a function of roughness on the millet and groundnut plots.

6 – ESTIMATION DU RUISSELLEMENT À PARTIR DU TEMPS, DE LA RUGOSITÉ ET DE L'INDICE DES PRÉCIPITATIONS ANTÉRIEURES

À partir des équations 8, 12, 13 et 14 décrivant les 3 paramètres du modèle en fonction du temps écoulé, de l'indice de rugosité et de l'indice des précipitations antérieures, nous avons recalculé les paramètres n , HI et S pour l'ensemble des crues. Les valeurs obtenues ont été utilisées pour reconstituer les hydrogrammes. Évidemment, on observe une diminution du coefficient de Nash qui dépasse la valeur 0,78 dans 80 % des cas sur la parcelle de sol nu, et la valeur 0,6 dans 60 % des cas sur les autres parcelles (fig. 11). Cependant, sur la

figure 12, on constate un bon accord entre les valeurs ainsi modélisées et les valeurs observées pour les volumes ruisselés et les débits ruisselés maximaux. Ceci ne constitue pas une validation du modèle utilisé, faute d'une autre année d'observations, mais confirme néanmoins la dépendance des paramètres par rapport au développement végétal et à la rugosité. La figure 13 présente un exemple d'hydrogrammes mesurés et modélisés.

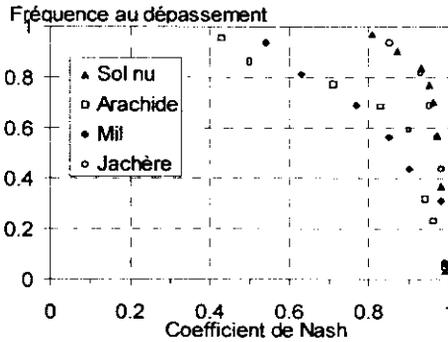


Figure 11 Fréquence au dépassement du critère d'optimisation du modèle (coefficient de Nash) pour chaque parcelle.

Exceedence probability of the fitting criterion (Nash's coefficient) for each plot.

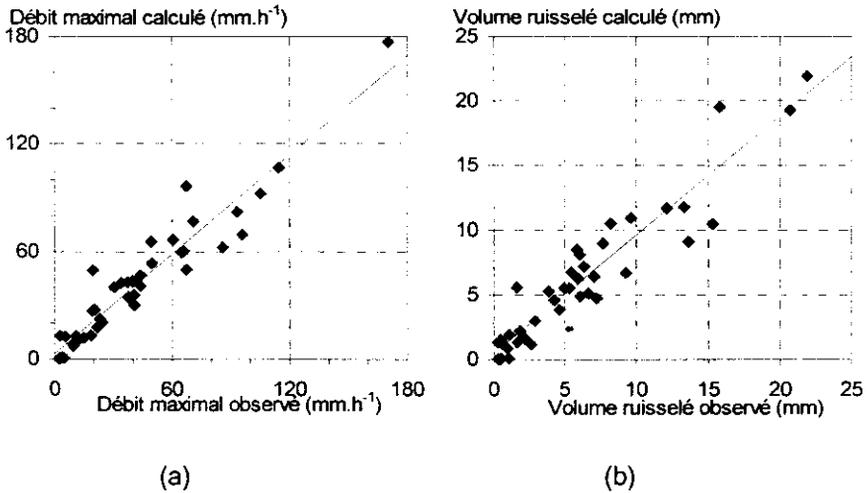


Figure 12 Comparaison des valeurs observées et prédites.
(a) : débit maximal (déb. max. prédit = $0,92$ déb. max. observé + $3,22$ $r^2 = 0,91$). (b) : volume ruisselé (vol. ruiss. prédit = $0,92$ vol. ruiss. observé + $0,45$ $r^2 = 0,90$).

*Comparison of observed and predicted values:
(a): peak discharge, (b): runoff volume.*

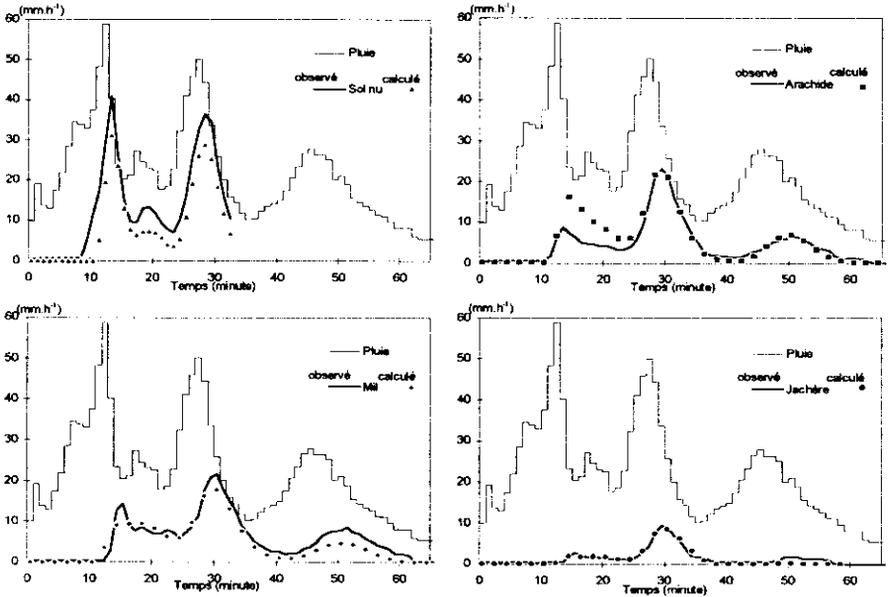


Figure 13 Exemple d'hydrogrammes mesurés et calculés sur les 4 parcelles (événement du 16/8/1994, lacune en fin d'enregistrement du ruissellement sur la parcelle de sol nu).

Comparison between measured and predicted runoff hydrographs on the 4 plots (rainfall of 8/16/1994, gap at the end of surface runoff recording on the bare plot).

7 – CONCLUSION

Faute d'appareillages de mesure suffisamment précis, peu d'études fines des relations pluie-débit avaient été menées sur l'influence du développement saisonnier de la végétation sur le ruissellement au Sahel. À partir des données collectées, durant une saison des pluies, sur quatre-parcelles de ruissellement couvertes en mil, arachide, jachère ou laissée dénudée, nous avons analysé les écoulements au moyen d'un modèle distribué, conceptuel à trois paramètres. Les points suivants ont pu être dégagés :

- Les caractéristiques des crues sont particulièrement sensibles au paramètre de transfert (n) et bien moins aux paramètres d'infiltration (S) et de ruissellement (Hl). Ceci entraîne une détermination plus précise de n que des deux autres paramètres lors des ajustements.
- L'ajustement sur chacune des crues est, dans la plupart des cas, excellent : 70 % des crues modélisées présentent un coefficient de Nash supérieur à 0,90.
- Pour chaque parcelle, la chronique saisonnière de chaque paramètre est cohérente avec l'occupation de la parcelle. Sur la parcelle de sol nu, les trois paramètres du modèle sont invariants durant tout l'hivernage. Sur les parcelles en végétation, les paramètres n et S présentent, en début de saison, des valeurs

voisines de celles obtenues sur le sol nu. Puis, les couverts se développant, les valeurs de n et S augmentent. L'augmentation du paramètre S n'est sensible qu'à la date où l'indice de végétation (NDVI) dépasse 0,30-0,35 ce qui survient environ 20 jours après les semis des parcelles cultivées.

– Pour les parcelles en végétation, l'évolution des paramètres n et S peut être reliée au temps écoulé depuis le semis (mil, arachide) ou le sarclage initial (jachère) et à l'état d'humectation du sol. À ceci, viennent s'ajouter les effets des travaux culturaux modifiant la rugosité. Le paramètre n de transfert est majoré de 0,4 environ pour la pluie consécutive au sarclage sur la parcelle d'arachide. Pour la parcelle de mil, il n'y a pas d'augmentation significative. Une relation entre un indice de rugosité décrivant la microtopographie et le paramètre de ruissellement HI a également été établie.

Par une autre campagne de mesures, il conviendra de valider les tendances saisonnières établies pour chacun des paramètres. La détermination des paramètres à l'échelle de la parcelle considérée comme surface élémentaire homogène devrait ensuite permettre leur utilisation dans la modélisation du ruissellement à l'échelle d'un versant constitué d'un assemblage des surfaces élémentaires étudiées.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALBERGEL, J. (1988). Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso. Du m^2 au km^2 . Étude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. Coll. Études et Thèses. ORSTOM éd., Paris (France), 341 p.
- BADER, J.-C. (1994). Modèle analogique de ruissellement à stockage de surface : test sur parcelles et extrapolation sur versant homogène. *Journ. Scienc. Hydrol.*, 39, 6, p. 569-592.
- BOUCHARDEAU, A., RODIER, J. (1960). Nouvelle méthode de détermination de la capacité d'absorption en terrains perméables. Mémoires et Travaux de la S.H.F., n° 1, Paris (France), 11 p.
- CASENAVE, A., VALENTIN, C. (1989). Les états de surface de la zone sahélienne : influence sur l'infiltration. Coll. Didactiques. éd. ORSTOM, Paris (France), 229 p.
- COLLINET, J. (1985). Hydrodynamique superficielle de quelques types de sol du Sahel Africain. Comparaison des données fournies par deux dimensions de parcelles de simulation de pluie. in *Journées hydrologiques 17-18 Septembre 1985*, ORSTOM, Montpellier (France), p. 117-153.
- COOK, H.L. (1946). The infiltration approach to the calculation of the surface runoff. *Trans. Am. Geophys. Union*, 27, p. 726-747.
- DUNNE, T., ZHANG, W., AUBRY, B.F. (1991). Effects of rainfall, vegetation, and microtopography on soils by rainfall simulation. *Water Resour. Res.*, 27, 9, p. 2271-2285.
- GERMANN, P.F. (1990). Macropores and hydrologic hillslope processes. In Anderson-M.G* et Burt T.P. (éd.), *Process studies in hillslope hydrology*, John Wiley, Chichester (Royaume Uni), p. 327-364.
- GUILLOBEZ, S., ZOUGMORE, R. (1994). Étude du ruissellement et de ses principaux paramètres à la parcelle (Saria, Burkina Faso, 1990). In *Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique tropicale. Vers une gestion des flux hydriques par le système de culture*, 9-13 décembre 1991, Bamako (Mali), Aupelf-Uref J. Libbey Eurotext (éd.), Paris (France), p. 319-329.
- HOLT, J.A., BRISTOW, K.L., Mc IVOR, J.G. (1996). The effect of grazing pressure on soils animals and hydraulic properties of

- two soils in semi-arid tropical Queensland. *Austr. J. Soil Res.*, 34, p. 69-79.
- LINSLEY, R.K., KOHLER, M.A., PAULUS, J.L. (1949). *Applied hydrology*, 414-418. Mac Graw Hill, New York (USA).
- MAHESHWARI, B.L. (1994). Values for the exponent of the storage-discharge equation in runoff-routing models. *J. Hydrology*, 163, p. 95-106.
- MOORE, I.D., FOSTER, G. R. (1990). Hydraulics and overland flow. In Anderson M.G. et Burt T.P. (éd.), *Process studies in hillslope hydrology*, John Wiley, Chichester (Royaume Uni), p. 215-254.
- PEREZ, P. (1994). Genèse du ruissellement sur les sols cultivés du sud Saloum (Sénégal). Du diagnostic à l'aménagement de parcelle. Thèse de doctorat sci. agronom., ENSA, Montpellier (France), 250 p.
- PLANCHON, O. (1991). La propagation du ruissellement le long d'un versant : nouvelles mesures et perspectives de modélisation. In : *Utilisation rationnelle de l'eau et des petits bassins versants en zone aride*, Journées Scientifiques du Réseau « Génie Para-Sécheresse » de l'UREF, 12-15 mars 1990, Ouagadougou (Burkina-Faso), J. Libbey Eurotext (éd.), Paris (France), p. 59-75.
- QI, J., CHEBBOUNI, A., HUETE, A. R., KERR Y. H., SOROOSHIAN, S. (1994). A modified soil adjusted vegetation index. *Remote sens. Environ.*, 48 : 119-126.
- RIBSTEIN, P. (1990). Modèles de crues et petits bassins versants au Sahel. Coll. Études et Thèses. ORSTOM éd., Paris (France), 317 p.
- RODIER, J.A. (1984-1985). Caractéristiques des crues des petits bassins versants représentatifs au Sahel. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. XX1, n° 2, p. 3-26 plus annexes.
- SÉGUI, L. (1996). Microbassin S5. Rapport hydrologique. Hivernage 1995. Thysse Kaymor (Sénégal). Rapport interne. ORSTOM éd., Dakar (Sénégal), 22 p. plus annexes.
- SÉGUI, L., BOSCHER C., ALBERGEL, J. (1996). Discrimination de différentes couvertures végétales par radiométrie de terrain en savane soudano-sahélienne. In *X^e Journées hydrologiques : Interactions surface continentale/atmosphère : l'expérience Hapex-Sahel*, 13-14 septembre 1995, coll. Études et Thèses. ORSTOM éd., Paris (France), p. 671-684.
- THEBE, B. (1987). Hydrodynamique de quelques sols du Nord-Cameroun : bassins versants de Mouda : contribution à l'étude des transferts d'échelles. Thèse. Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier (France), 307 p. plus annexes.
- VALENTIN, C. (1985). Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de région subdésertique (Agadez - République du Niger). Dynamique de formation et conséquences sur l'économie en eau. Coll. Études et Thèses. ORSTOM éd., Paris (France), 259 p.