

Influence de la longueur de pente sur le ruissellement : rôle de la formation de rigoles et de croûtes de sédimentation

J.W.A. POESEN (1), R.B. BRYAN (2)

(1) *Fond national de la Recherche scientifique, Laboratoire de Géomorphologie expérimentale, K.U. Leuven, Redingenstraat 16 bis, 3000 Leuven, Belgique.* (2) *Soil Erosion Laboratory, University of Toronto, Scarborough Campus, Toronto, Ontario M1C 1A4, Canada.*

RÉSUMÉ

Des expériences de laboratoire ont été menées pour savoir si la relation entre la longueur de la pente et le volume de ruissellement hortonien par unité de surface de sol pourrait être expliquée par les phénomènes d'érosion et de sédimentation observés dans les parcelles correspondantes. A cet effet, un mélange de sédiments, très sujets à la battance, a été testé sur des pentes de longueurs de 2,39 m, 7,18 m et 17 m sous pluie simulée d'une intensité de 24,2 à 26 mm/h pendant au moins 200 minutes. La relation entre le volume de ruissellement par unité de surface de sol et la longueur de pente est complexe et fortement influencée par la formation d'une pellicule de battance, par le développement de rigoles et de têtes de rigoles ainsi que par la formation de dépôts de pente. Les segments de pente, où des rigoles et des têtes de rigoles se développent, sont caractérisés par une vitesse d'infiltration et de percolation assez importante. D'autre part, les segments de pente couverts entièrement de pellicules de battance, soit du type « structural » soit du type « sédimentaire », sont caractérisés par une vitesse d'infiltration et de percolation moins élevée. Ces processus d'érosion et de sédimentation peuvent avoir un effet compensatoire sur la production de ruissellement le long d'un versant pendant les averses. Les modèles hydrologiques, ayant comme but de prédire le débit de ruissellement le long des versants, doivent être orientés en partie par un modèle d'érosion et de sédimentation.

MOTS-CLÉS : Battance — Croûte de sédimentation — Erosion — Longueur de pente — Rigoles — Ruissellement — Modèle d'érosion et de sédimentation.

ABSTRACT

RUNOFF GENERATION ON SLOPES OF DIFFERENT LENGTHS AS INFLUENCED BY RILLING AND SEDIMENTATION

Laboratory experiments have been conducted in order to investigate if the relationship between slope length and Horton runoff volume per unit area could be explained by the corresponding erosion and deposition patterns occurring within the plots. A binary soil mixture, very susceptible to surface sealing, was tested on 2.39 m, 7.18 m and 17 m slopes under simulated rainfall intensities from 24.2 — 26 mm/h for a minimum of 200 min. Runoff volume per unit area was not related to slope length in a simple manner. Detailed analysis of percolation data revealed a complex pattern dominated by surface sealing, rill development, headcut incision and colluvial fan formation. Slope segments where rills and headcuts developed were characterized by high infiltration and percolation rates. On the other hand, slope segments completely covered by sealed interrill surfaces or where important depositional seals formed, showed reduced infiltration and percolation rates. These processes can have compensating effects on runoff generation along a hillslope. Realistic hydrological models aiming at predicting overland flow discharge along hillslopes should be (partly) driven by an erosion/deposition model.

KEY WORDS : Slope length — Runoff — Percolation — Erosion — Surface sealing — Rill development.

RESUMEN

INFLUENCIA DE LA LONGITUD DE PENDIENTE SOBRE LA ESCORRENTÍA :
ROL DE LA FORMACIÓN DE ARROYADAS Y DE CORAZAS DE SEDIMENTACIÓN

Se efectuaron algunos experimentos de laboratorio para saber si la relación entre la longitud de pendiente y el volumen de escorrentía de Horton per unidad de superficie del suelo podría ser explicada por los fenómenos de erosión y de sedimentación observados en las parcelas correspondientes. Con este fin, una mezcla de sedimentos que están muy expuestos a la disgregación ha sido sometida a prueba en pendientes de 2,39 m, 7,18 m y 17 m de largo bajo lluvia simulada cuya intensidad es de 24,2 — 26 mm/h durante al menos 200 minutos. La relación entre el volumen de escorrentía per unidad de superficie del suelo y la longitud de pendiente es compleja y fuertemente influenciada por la formación de una película de disgregación, por el desarrollo de arroyadas y de arroyadas nacientes así como por la formación de depósitos de pendiente. Los segmentos de pendiente donde arroyadas y arroyadas nacientes se desarrollan se caracterizan por una velocidad de infiltración y de percolación bastante importante. Por otra parte, los segmentos de pendiente cubiertos completamente por películas de disgregación, sea de tipo « estructural » o de tipo « sedimentario » se caracterizan por una velocidad de infiltración y de percolación menos elevada. Esos procesos de erosión y de sedimentación pueden tener un efecto de compensación sobre la producción de escorrentía a lo largo de una vertiente durante los chaparrones. Los modelos hidrológicos cuyo objetivo consiste en prever el caudal de escorrentía a lo largo de las vertientes deben conformarse en parte con un modelo de erosión y de sedimentación.

PALABRAS CLAVES : Disgregación — Coraza de sedimentación — Erosión — Longitud de pendiente — Arroyadas — Escorrentía — Modelo de erosión y de sedimentación.

INTRODUCTION

Des données concernant l'influence de la longueur d'une pente sur le volume du ruissellement par unité de surface (R) en terrain nu ont été rassemblées par plusieurs chercheurs sur des pentes de différentes longueurs en installant des parcelles de ruissellement (cf. DULEY et ACKERMAN, 1934 ; ZINGG, 1940 ; LENVAIN, 1975 ; MUTCHLER et GREER, 1980 ; VALENTIN et ROOSE, 1981 ; LAL, 1982 ; EVETT et DUTT, 1984 ; DIKAU, 1986 ; SHARMA, 1986). La figure 1 montre quelques résultats typiques. En général R décroît (+/— exponentiellement) avec l'accroissement de la longueur de la pente sur des sols limono-sablo-argileux (c'est-à-dire limono-argileux, limoneux ou limono-sableux) qui sont extrêmement sujets à la battance. Les données présentées par LENVAIN (1975) pour un sol argileux ne montrent cependant aucune décroissance de R.

La décroissance de R avec l'allongement de la pente a été expliquée par un accroissement corrélatif du volume de l'eau infiltrée. On pense que celui-ci est dû :

— au fait que sur les parcelles plus longues le temps écoulé pendant l'absorption par le sol de l'eau de ruissellement est plus long que sur les parcelles plus courtes (DULEY et ACKERMAN, 1934) ;

— au fait que sur les pentes plus allongées, la détection et, par suite, l'épaisseur du ruissellement sont plus grandes que sur les parcelles plus courtes, ce qui donne

une charge hydraulique supplémentaire (MUTCHLER et GREER, 1980 ; LAL, 1982).

Aucun des auteurs cités n'a cependant mis en relation ses observations concernant les mécanismes variés d'érosion et de sédimentation avec la longueur de la pente. Les résultats des expérimentations sur le terrain et en laboratoire suggèrent que chaque facteur variable, entraînant l'érosion de la surface affectée de battance, contrecarrera les effets de la battance, et par là entraînera une augmentation du taux d'infiltration et une diminution du volume du ruissellement. ROOSE (1973) et POESEN (1984) ont établi que le gradient de pente est un tel facteur. YOUNG et ONSTAD (1986) indiquent que les taux d'infiltration restent plutôt élevés au fond et sur le flanc des rigoles tandis qu'ils décroissent rapidement sur les surfaces entre les rigoles où se forme effectivement une pellicule de battance. Par conséquent, chaque facteur qui influence le développement des rigoles, tel que la longueur de la pente par exemple, est également à même d'affecter la formation du ruissellement.

L'objectif de cette étude est de voir si la relation entre la longueur de la pente et R peut être expliquée par l'importance des formes d'érosion et de sédimentation correspondantes sur les parcelles. On a mené et suivi à cet effet des expérimentations en laboratoire.

DISPOSITIF ET PROTOCOLE EXPÉRIMENTAUX

On a mis en place au Laboratoire d'Erosion des Sols de l'Université de Toronto un dispositif expérimental

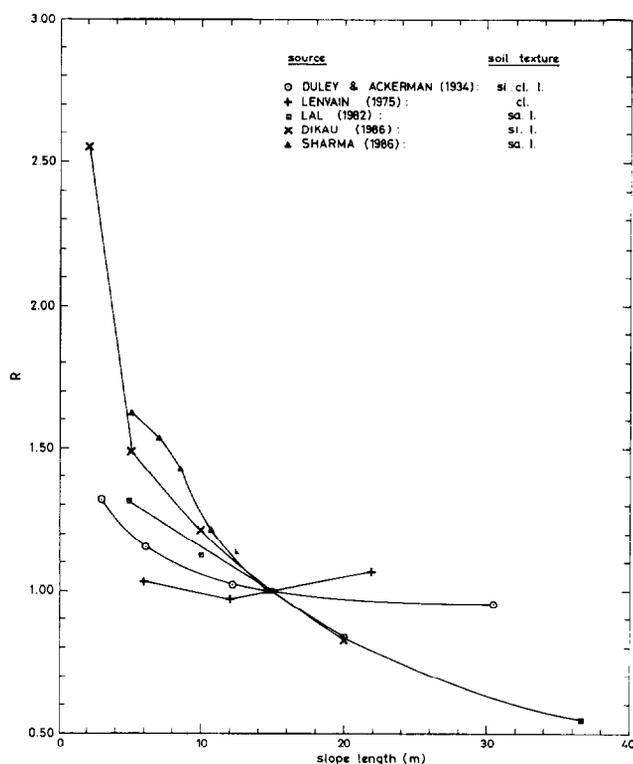


FIG. 1. — Effet de la longueur de pente sur le volume de ruissellement par unité de surface (R) pour des sols nus, selon différents auteurs. Afin de faciliter la comparaison, chaque valeur de R a été divisée par la valeur de R pour une pente de 15 m de longueur appartenant au même groupe de données. *Effect of plot slope length on relative runoff volume per unit area (R) for bare soil surfaces as reported by several investigators. In order to facilitate comparison, each R -value has been divided by the R -value for a 15 m long slope belonging to the same R -dataset.*

permettant de garder constants tous les facteurs déterminants du ruissellement, sauf la longueur de la pente. Les expérimentations furent menées avec un bac disposé en 1 à 7 segments distincts, combinables pour fournir différentes longueurs de pente (Photos 1 et 2). Chaque segment faisait 2,45 m de long, 0,85 m de large et 0,31 m de haut. Au cours de ces expérimentations ils étaient légèrement disjoints pour permettre de recueillir l'eau de percolation à l'extrémité de chaque segment. Les 7 segments furent assemblés pour former une pente rectiligne de 6 segments de pente de 0,068, plus un segment amont de pente de 0,03. Les segments du bac (S) furent numérotés de 1 à 7 d'aval en amont. On a retenu trois longueurs de pente de respectivement 1 (S1), 3 (S1-S3) et 7 (S1-S7) segments. En raison de contraintes mineures d'installation et d'espacements, les longueurs réelles des pentes simulées furent de 2,39 m, 7,18 m et

17,0 m. Le fond du bac était constitué d'un double fond de drainage en Plexiglas percé de trous de 1,3 cm de diamètre, espacés de 4-5 cm et couvert de deux couches d'un tissu de gaze de coton. La couche supérieure supportait la tranche de sol.

Pour assurer rapidement la formation d'un phénomène de battance pendant la simulation de pluie, on prépara un mélange de sol de texture limono-sableuse composé de 2 sols prélevés dans le sud de l'Ontario : le sable de Pontypool et l'argile de Peel dans le rapport de 4 : 1. Les agrégats de l'argile de Peel furent écrasés pour passer à travers un tamis de 4 mm et fournir le mélange le plus homogène possible avec le sable prédominant de Pontypool bien calibré. Des tests préalables de pluie sur des mélanges variés des deux sols avaient révélé qu'un mélange de 80 % de sable de Pontypool et de 20 % d'argile de Peel était le plus sujet à la formation de pellicules de battance. Un résultat similaire a été obtenu pour des mélanges de sédiments meubles (POESSEN, 1987). Il est intéressant de noter qu'un mélange de deux sols avec les mêmes proportions de particules « grossières » et « fines » est le plus exposé à la compaction en général (BODMAN et CONSTANTIN, 1965) et présente aussi les plus fortes densités texturales (FIÈS et STENGEL, 1981). Dans le bac, le mélange de sol formait une couche de 3,5 cm d'épaisseur, égalisée mais pas tassée. La percolation de l'eau à travers cette couche n'est régie que par la gravité. Il en résulte que le dispositif expérimental ne simule que des conditions de terrain particulières : à savoir des profils de sol comportant une discontinuité à (très) faible profondeur, qui réduit la vitesse de progression du front d'humectation, et/ou des sols à haute teneur en eau superficielle. D'autres échantillons de sol séchés à l'air furent préparés de la même façon et utilisés dans chaque expérimentation.

La pluie simulée fut produite uniformément sur la surface du sol par neuf gicleurs à projection conique émettant vers le haut des gouttelettes qui chutaient en arc d'une hauteur de 1,5 m à cause de la limite imposée par le plafond (Photo 3). Le diamètre moyen des gouttes était de 1,35 mm pour une intensité de pluie de 26 mm/h avec une énergie cinétique de chute correspondante de 4,5 J/m²/mm. Le sol manifesta rapidement des pellicules de battance même dans ces conditions de faible énergie de chute, mais on pourrait attendre des effets encore plus marqués avec des niveaux d'énergie plus proches de ceux des pluies naturelles.

Pendant les expérimentations, le ruissellement fut mesuré à l'extrémité aval du bac et les percolats collectés sous chaque segment pendant une minute à 5-10 minutes d'intervalle (Photo 1). Les chutes de pluie cumulées furent mesurées par 7 pluviomètres fixes (Photo 2) et un pluviographe mobile qui effectuait la moyenne pendant 5 minutes toutes les 30 minutes. L'intensité moyenne des chutes de pluie atteignit

26 mm/h sur les essais de longueur de pente de 2,39 et 7,18 m et 24,2 mm/h sur les essais de 17,0 m de longueur. Pendant les expérimentations on fit des observations des régimes d'écoulement ainsi que du développement des rigoles et des têtes de rigole. Après chaque essai, les formes des rigoles furent cartographiées alors que le modelé de la surface du sol et la profondeur des rigoles furent relevés par cheminement à l'aide de mesures ponctuelles tous les 0,5 m. Pour chaque longueur de pente on mena une expérimentation suivie d'un second essai sur la pente de 7,18 m.

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Le tableau I présente un résumé des données hydrologiques et de l'érosion pour les trois longueurs de pente soumises à l'essai. Après chaque pluie la réponse modale de la tranche de sol meuble initialement séchée à l'air fut semblable dans chaque bac. Des flaques dispersées apparurent après 10 minutes, suivies rapidement d'un ruissellement local, puis général. Le recueil du ruissellement dans le fond du bac précéda la formation de 100 % de flaques. La concentration de l'écoulement superficiel se produisit au cours de chaque essai, mais sur la pente de 2,38 m produisit seulement moins de 5 % de microrigoles (< 3 mm de profondeur) en surface à la fin de l'expérimentation. Sur la pente de 7,18 m une rigole profonde continue s'étendit sur 6,5 m après 40 minutes de pluie en bas de pente. Le développement initial de la rigole fut suivi par celui d'un colluvionnement sur le segment 1 et par celui d'une tête de rigole prononcée. A la fin de l'expérimentation 3,3 % de la surface étaient couverts par des rigoles profondes et 4,7 % par des rigoles peu profondes. Sur la pente de 17 m l'évolution des rigoles fut semblable mais plus importante, avec 6,8 % de couverture de rigoles profondes et 5,9 % de rigoles peu profondes. Les incisions étaient plus profondes, le développement de têtes de rigole plus important, la portion colluviale plus étendue et l'incision et la sédimentation cycliques plus prononcées. Les conditions de démarrage des rigoles et de migration des têtes de rigole (BRYAN et POESEN, 1989) se trouvèrent en accord avec celles énoncées par RAUWS et GOVERS (1988) et DE PLOEY (1989).

Aucune relation simple (négative) entre la longueur de pente et les coefficients de ruissellement (R.C.) et par conséquent le volume de ruissellement par unité de surface ne fut établie non plus. Lorsque la pente s'allonge de 2,38 m à 7,18 m, R.C. décroît de 54,4 % à 46,0 %. Sur la pente longue de 17,0 m cependant R.C. est 8,6 % plus fort que sur celle de 7,18 m. Le ruissellement ne pouvait être mesuré directement qu'au bout du bac alors que l'on mesurait séparément la percolation sur chaque segment de la pente. Afin de mieux

comprendre la relation entre la réponse hydrologique de la surface du sol dans le bac et les processus d'érosion, on a analysé plus en détail les données de percolation de chaque segment.

TABLEAU I
Paramètres hydrologiques et d'érosion pour les trois longueurs de pente
Hydrological and erosion parameters for the three slope lengths

L (cm)	238.5	718	1700
I (mm h ⁻¹)	26.0	26.0	24.2
I ₁₁ (mm)	5.6	7.8	4.4
I ₁₂ (mm)	11.3	11.7	11.6
P.C. (%)	33.9	39.8	30.4
R.C. (%)	54.4	46.0	54.6
Rsat. (%)	11.7	14.2	15.0
Interrill (%)	95.0	92.0	93.0
Shallow rill (%)	5.0	4.7	5.9
Deep rill (%)	0.0	3.3	6.8
Sed g.l ⁻¹	0.5	0.8	18.5

L : longueur de pente. I : intensité moyenne de la pluie. I₁₁ : seuil de pluviosité pour un ruissellement local. I₁₂ : seuil de pluviosité pour un ruissellement généralisé. P.C. : coefficient de percolation (= % du volume total des pluies perdu sous forme de percolation). R.C. : coefficient de ruissellement (= % du volume total des pluies perdu sous forme de ruissellement). Rsat : % du volume total de la pluie retenu pour saturer le sol dans le bac [Rsat = Pluviosité - (P.C. + R.C.)]. Interrill : % de la surface totale du sol non incisée par les rigoles après 200 min. de pluie. Rill : % de la surface totale du sol couvert par les rigoles après 200 min. de pluie. Shallow rill : rigoles de 0 à 0,3 cm de profondeur. Deep rill : rigoles de 0,3 à 2,5 cm de profondeur. Sed : concentration de sédiment dans l'eau de ruissellement au temps t = 200 min.

L : slope length. I : mean rainfall intensity. I₁₁ : threshold rainfall amount for local runoff. I₁₂ : threshold amount for general runoff. P.C. : Percolation coefficient (= % of total rainfall volume lost as percolation). R.C. : Runoff coefficient (= % of total rainfall volume lost as runoff). Rsat : % of total rainfall volume used to saturate the soil layer in the tray (Rsat = total rainfall volume - P.C. - R.C.). Interrill : % of total soil surface occupied by interrills at a rainfall duration of t = 200 min. Rill : % of total soil surface occupied by rills at a rainfall duration of t = 200 min. Shallow rill : depth between 0 and 0.3 cm. Deep rill : depth between 0.3 and 2.5 cm. Sed : sediment concentration in runoff at t = 200 min.

La figure 2 décrit un hydrogramme de percolation typique sur une pente de 2,39 m de long. La percolation initiale démarre après 10 minutes de pluie. Après une augmentation rapide le taux de percolation atteint un pic au bout de 30 minutes environ ; ensuite elle décroît exponentiellement. Cette décroissance est attribuée à l'apparition de battance seulement : c'est-à-dire l'évacuation par l'eau des particules fines à la surface du sol et la formation d'une couche enrichie en ces particules sur une profondeur de quelques millimètres de la surface (« filtration pavement », BRYAN, 1973). Il en résulte une réduction de la conductivité hydraulique

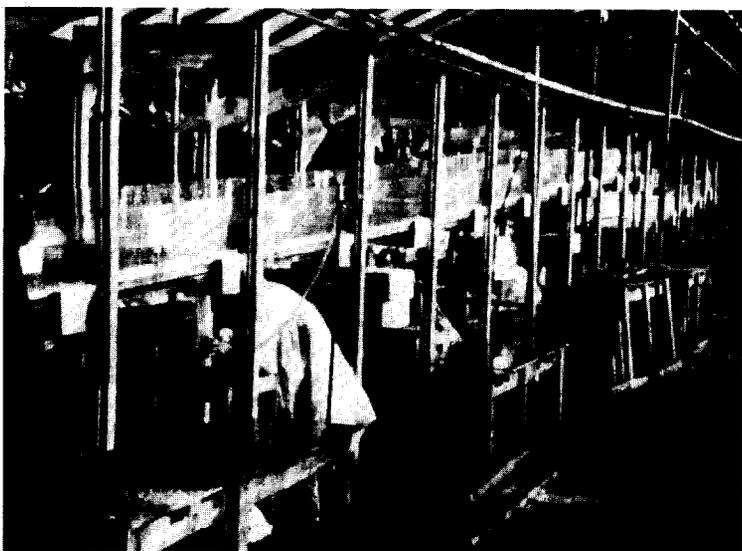


PHOTO 1. — Vue latérale du dispositif expérimental : le bac repose sur un support mobile. Le percolat est collecté sous chaque segment de pente.



PHOTO 2. — Vue longitudinale de la pente de 17 m de long équipée de pluviomètres fixes.

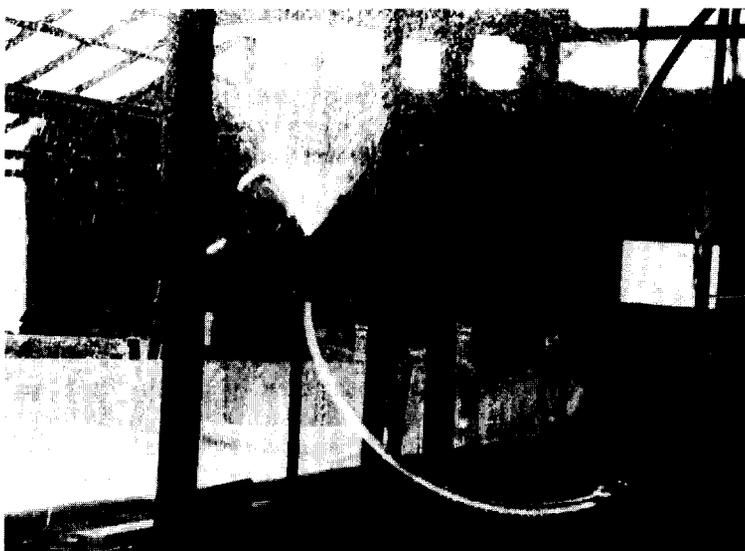


PHOTO 3. — Gicleur à projection conique ascendante qui produit la pluie simulée sur le bac.

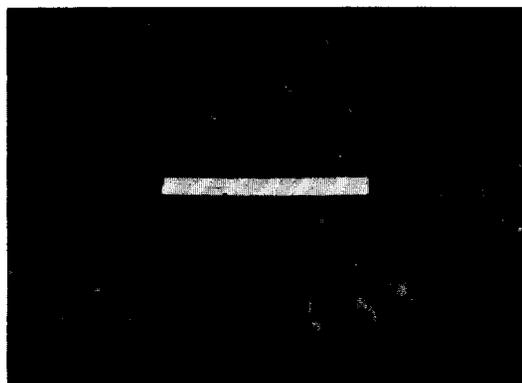


PHOTO 4. — Rigole à fond plat incisant la croûte superficielle. Noter les murs des têtes de rigoles provoqués par la couche superficielle compacte (la bande de mesure fait 15 cm).

saturée. Par conséquent le ruissellement engendré dans ces expérimentations est hortonien (DUNNE, 1983).

On a trouvé un hydrogramme de percolation presque identique pour le segment supérieur de la pente de 7,18 m (S3 de la figure 2). Pour les segments moyen et inférieur on a cependant enregistré des taux de percolation plus grands. Ceux-ci sont attribués non seulement aux effets de flux des écoulements superficiels issus du (ou des) segment(s) amont mais aussi et surtout à la formation de têtes de rigoles et de rigoles profondes. Ces phénomènes d'érosion aboutissent à la rupture de la croûte de battance superficielle et par voie de conséquence à une augmentation locale du taux de percolation. La figure 3 montre la correspondance entre le coefficient de percolation par segment — c'est-à-dire le pourcentage du volume total des pluies perdu par percolation — et le pourcentage de la surface totale du sol occupée par des rigoles profondes sur les segments correspondants.

Pour la pente de 17,0 m de long, une disposition cyclique de rigoles s'est développée et la correspondance entre P.C. et le pourcentage de surface du sol occupé par des rigoles profondes, ou entre P.C. et la section transversale des rigoles, est également frappante (fig. 4). Les segments de pente affectés de phénomènes d'érosion linéaire (Photo 4) étaient caractérisés par des valeurs de P.C. relativement fortes. Du fait que les rigoles rompaient l'uniformité de la battance sur ces segments, le taux local de percolation augmentait. L'effet tangible dépendait de l'extension de l'incision et de la déviation du flux d'eau superficiel en direction des entailles. Les taux accrus de la percolation réduisaient le débit du ruissellement vers l'aval à l'intérieur des rigoles. Ceci provoquait alors l'accroissement de concentration des sédiments, leur sédimentation et la formation de colluvions qui dispersaient l'écoulement superficiel. A la suite de quoi se formaient des pellicules de sédimentation. Comme l'a montré BOIFFIN (1984), ces pellicules sont plus efficaces pour réduire le taux d'infiltration que les pellicules de battance initialement situées entre les rigoles. La formation de pellicules de sédimentation est plus prononcée sur les segments du bac S4 et S1.

Il découle de l'interprétation des données expérimentales que P.C. est corrélé positivement avec l'intensité de l'érosion linéaire. C'est ce que montre la figure 5. Ceci peut être expliqué par les effets combinés de deux actions, à savoir :

- 1) sur le fond et sur les flancs des rigoles la surface du sol n'est pas durcie : par conséquent et par comparaison l'infiltration y est supérieure à celle qui se manifeste à la surface du sol durcie entre les rigoles ;
- 2) la profondeur maximale d'écoulement dans les rigoles pendant l'expérimentation est de 0,5 cm. Si on

considère l'épaisseur réduite de la couche de sol sous les rigoles (en l'occurrence une épaisseur minimale de 1 cm), cette profondeur maximale pouvait accroître le gradient hydraulique d'une valeur atteignant parfois 50 %, d'où résulte bien entendu une augmentation du taux de percolation.

Du fait de l'évolution complexe de la surface du sol dans le bac au cours des expérimentations, les taux d'infiltration et de percolation et, par suite aussi, le volume du ruissellement par unité de surface, ne sont pas en relation avec la distance horizontale de l'écoulement d'une façon simple, mais sont largement dépendants des processus d'érosion et de sédimentation survenant dans la parcelle. Les deux processus peuvent avoir des effets compensatoires sur la formation du ruissellement le long des versants.

On attirera l'attention du lecteur sur le fait que les résultats discutés ici ne concernent que les sols extrêmement sujets à la battance et à la sédimentation. Les sols qui n'y seraient pas sujets, en raison d'une bonne stabilité structurale, montreraient probablement des réactions à l'érosion et des comportements hydrologiques différents.

CONSÉQUENCES ET CONCLUSIONS

La plupart des modèles d'érosion prédictifs de l'abrasion du sol par effet de ruissellement superficiel sont réglés sur un modèle hydrologique (cf. HORTON, 1945 ; KILINC et RICHARDSON, 1973 ; KIRKBY, 1980 ; ROSE, 1985). De tels modèles hydrologiques prévoient, dans des conditions de stabilité données, le débit unitaire de ruissellement superficiel, à une distance horizontale x de la ligne de partage, par l'équation :

$$q(x) = R x$$

avec R (excès de précipitation) défini comme $R = P - I$
avec P = taux de précipitation
et I = taux moyen d'infiltration.

Dans ces modèles on attribue à R une valeur constante chaque fois que l'on augmente la longueur de la pente. Les résultats expérimentaux présentés ici montrent clairement que R n'est pas constant mais dépend largement des processus d'érosion et de sédimentation mis en jeu sur chaque segment de pente. En outre les données montrent que pendant les pluies un mécanisme important de rétroaction intervient sur les versants : le volume du ruissellement par unité de surface détermine, entre autres facteurs, le développement des rigoles et le dépôt des sédiments, mais ce dernier à son tour provoque aussi partiellement la formation de ruissellement. L'apparition de zones d'érosion et de sédimentation, semblables à celles décrites dans cette étude, a été

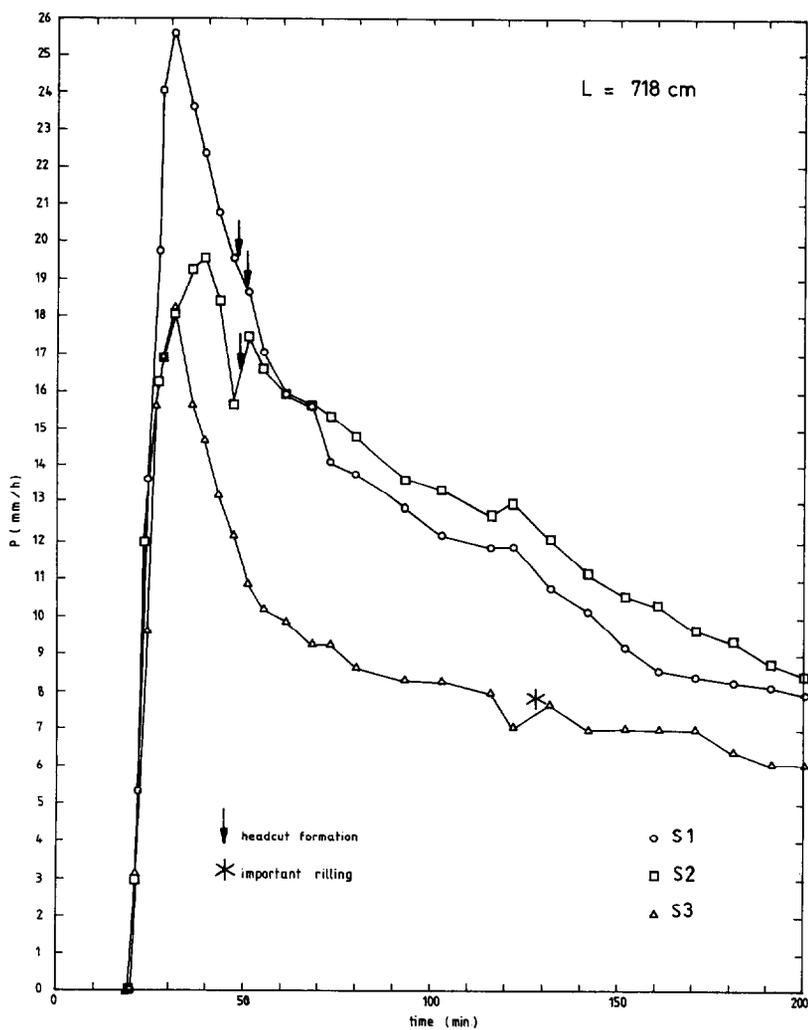
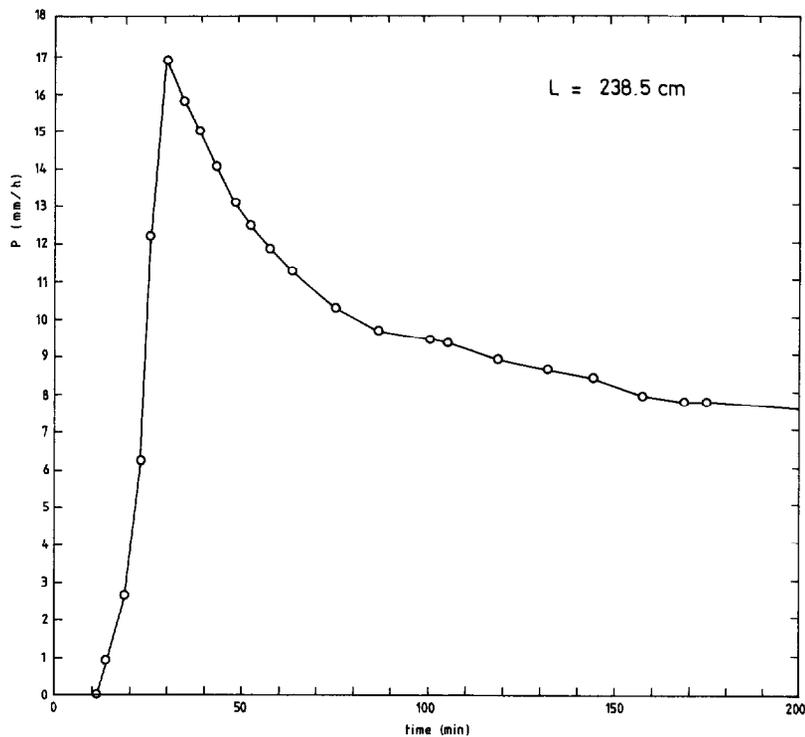


FIG. 2. — Hydrographes de percolation pour des pentes de 2,39 m et de 7,18 m de longueur. S1, S2 et S3 se réfèrent respectivement aux segments aval, moyen et amont. Percolation hydrographs for a 2.39 m and a 7.18 m long slope. S1, S2 and S3 refer to the downslope, the midslope and the upslope segment respectively.

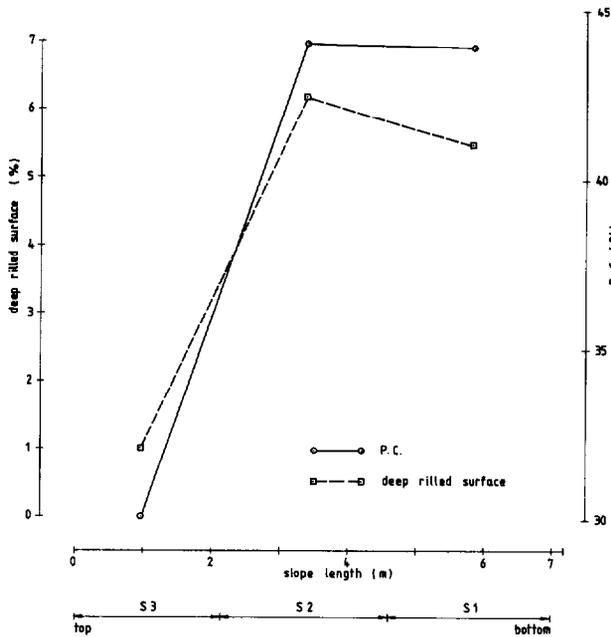


FIG. 3. — Evolution du pourcentage de surface de sol couvert par des rigoles profondes (c'est-à-dire d'une profondeur > 3 mm) et du coefficient de percolation (P.C. = le pourcentage du volume de pluie qui a percolé à travers le segment de pente) le long d'une pente de 7,18 m de longueur. S1, S2 et S3 se réfèrent respectivement aux segments de pente aval, moyen et amont.

Evolution of percentage of soil surface covered by deep rills (i.e. with depths > 3 mm) and percolation coefficient (P.C.) along the 7.18 m long slope. S1, S2 and S3 refers to the downslope, the mid-slope and the upslope segment respectively.

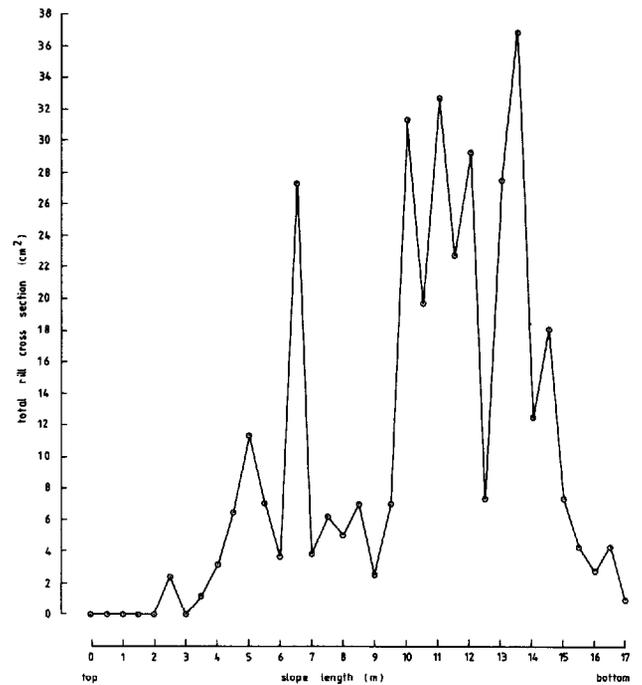
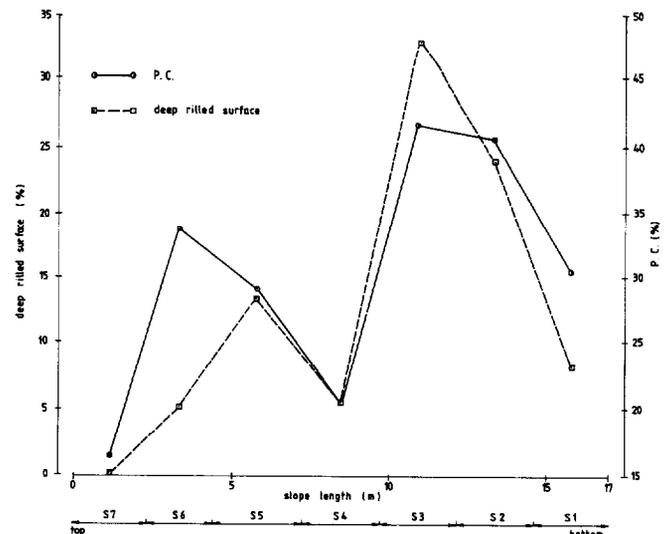


FIG. 4. — Evolution de la section transversale totale des rigoles, du pourcentage de la surface de sol occupé par des rigoles profondes (c'est-à-dire d'une profondeur > 3 mm) et du coefficient de percolation (P.C.) le long d'une pente de 17 m de longueur. S1 et S7 se réfèrent respectivement aux segments de pente aval et amont.

Evolution of total rill cross section, percentage of soil surface covered by deep rills (i.e. with depth > 3 mm) and percolation coefficient (P.C.) along the 17 m long slope. S1 and S7 refers to the downslope and the upslope segment respectively.



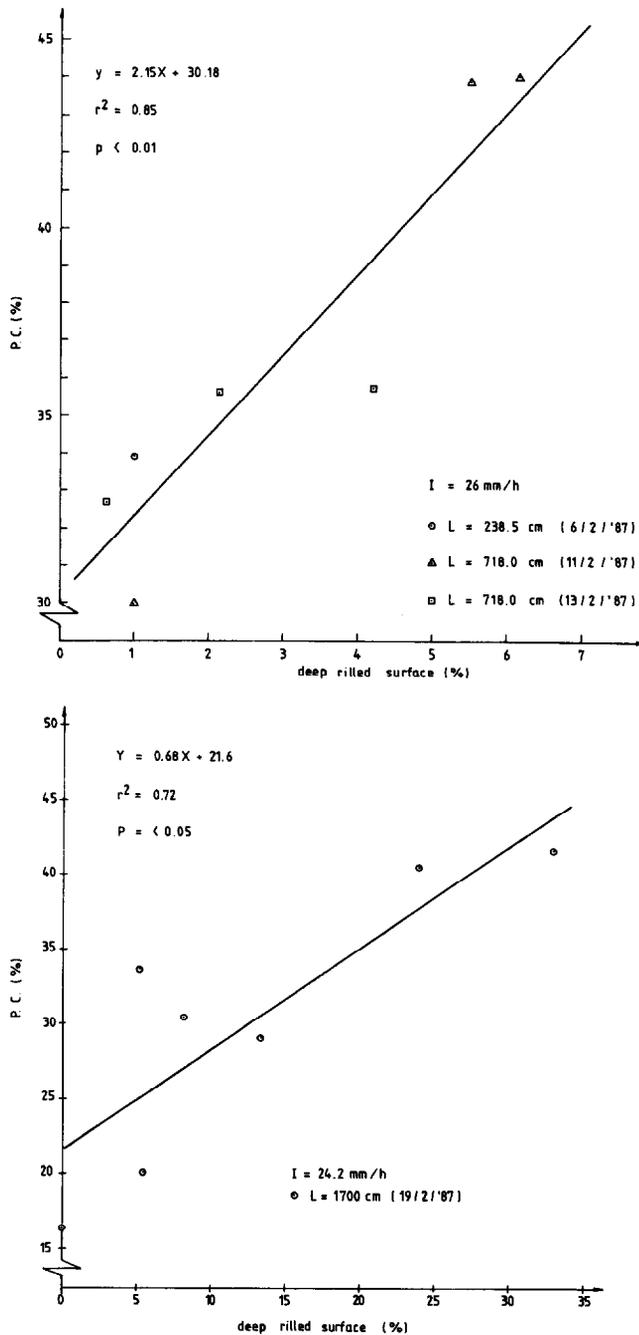


FIG. 5. — Relation entre le pourcentage de surface de sol occupé par des rigoles profondes (c'est-à-dire avec une profondeur > 3 mm) et le coefficient de percolation (P.C.) pour les trois longueurs de pente testées. Chaque point correspond à un segment de pente.

Relation between percentage of soil surface that is deeply rilled (i.e. rills with a depth > 3 mm) and percolation coefficient (P.C.) for the three simulated slope lengths. Each data point corresponds to one slope segment.

observée sur des pentes naturelles par plusieurs auteurs (cf. GOVERS, 1986 ; BONELL et WILLIAMS, 1987 ; SPOMER et MAHURIN, 1987 ; MOEYERSONS, 1989). Par conséquent, des modèles hydrologique et d'érosion réalistes pourraient prendre en compte les mécanismes rétroactifs décrits. Autrement dit les modèles hydrologiques prédictifs du débit de l'écoulement superficiel sur pentes de sols nus devraient dépendre aussi (pour partie) de modèles d'érosion.

Finalement il faudrait insister sur le fait que les relations complexes décrites furent établies dans des conditions simplifiées de sol, de précipitations et de pente, homogènes. On peut s'attendre à des relations beaucoup plus complexes sur les pentes naturelles où les sols sont hétérogènes, les pluies rarement uniformes, les pentes irrégulières et où divers processus générateurs de ruissellement entrent souvent en jeu.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient :

- L'Organisation du Traité de l'Atlantique Nord pour la bourse de recherche scientifique.
- Le Fonds National de la Recherche Scientifique (Belgique) ainsi que le Natural Sciences and Engineering Research Council (Canada) pour leur support financier.
- Dr E. ROOSE (ORSTOM, Montpellier) et DR. J. MOEYERSONS (Musée Royal de l'Afrique Centrale, Tervuren, Belgique) pour les commentaires et les corrections apportés au document.
- M. MISSET (ORSTOM, Montpellier) pour la traduction.

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 23-10-89.

BIBLIOGRAPHIE

- BODMAN (G.B.), CONSTANTIN (G.K.), 1965. — Influence of particle size distribution in soil compaction. *Hilgardia*, 36 : 567-591.
- BOIFFIN (J.), 1984. — La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. PhD thesis, Paris INA P-G, 320 p.
- BONELL (M.), WILLIAMS (J.), 1987. — Infiltration and redistribution of overland flow and sediment on a low relief landscape of semi-arid, tropical Queensland. *IAHS Publ.* 167 : 199-211.
- BRYAN (R.B.), 1973. — Surface crusts formed under simulated rainfall on Canadian soils. Report to a conference held in Pisa, CNR, 30 p.
- BRYAN (R.B.), POESEN (J.), 1989. — Laboratory experiments on the influence of slope length on runoff, percolation and rill development. *Earth Surface Processes and Landforms*, 14 : 211-231.
- DE PLOEY (J.), 1989. — A model for headcut retreat in rills and gullies. *Catena Suppl.* 14 : 81-86.
- DIKAU (R.), 1986. — Experimentelle Untersuchungen zu Oberflächenabfluss von Messparzellen und landwirtschaftlichen Nutzflächen. *Heidelberger Geographischen Arbeiten* 18, 195 p.
- DULEY (F.), ACKERMAN (F.), 1934. — Run-off and erosion from plots of different lengths. *Journal of Agricultural Research* 48 : 505-510.
- DUNNE (T.), 1983. — Relation of field studies and modelling in the prediction of storm runoff. *Journal of Hydrology* 65 : 25-48.
- EVETT (R.), DUTT (G.), 1985. — Length and slope effects on runoff from sodium dispersed, compacted earth microcatchments. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49 : 734-738.
- FIES (J.C.), STENGEL (P.), 1981. — Densité texturale de sols naturels II. — Eléments d'interprétation. *Agronomie I* : 659-666.
- GOVERS (G.), 1986. — Mechanismen van akkererosie op lemige bodems. Unpublished PhD thesis, K.U.Leuven, 393 p.
- HORTON (R.), 1945. — Erosional development of streams and their drainage basins, hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bull. Geol. Soc. Am.* 56 : 275-370.
- KILINC (M.), RICHARDSON (E.), 1973. — Mechanics of soil erosion from overland flow generated by simulated rainfall. Hydrology papers Colorado State University, 63, 54 p.
- KIRKBY (M.), 1980. — Modelling water erosion processes. In : M. Kirkby and R.P. Morgan (editors), *Soil Erosion*. Wiley : 183-216.
- LAL (R.), 1982. — Effects of slope length and terracing on runoff and erosion on a tropical soil. *IAHS Publ.* 137 : 23-31.
- LENVAIN (J.), 1975. — Kritische studie van de Universele Erosievergelijking en haar bruikbaarheid als evaluatiemiddel van de bodemkonditioneringstechniek in de vochtige tropen. Unpublished PhD thesis, R.U.Gent, 131 p.
- MOEYERSONS (J.), 1989. — La nature de l'érosion des versants au Rwanda. Musée Royal de l'Afrique centrale, Tervuren, Belgique, *Annales Sciences Economiques*, 19 : 379 p.
- MUTCHLER (C.), GREER (J.), 1980. — Effect of slope length on erosion from low slopes. *Trans. ASAE* 23 : 866-869, 876.
- POESEN (J.), 1984. — The influence of slope angle on infiltration rate and Hortonian overland flow volume. *Zeit. Geom. Suppl.* Bd. 49 : 117-131.
- POESEN (J.), 1987. — The role of slope angle in surface seal formation. In : V. Gardiner (editor), *International Geomorphology II* : 437-448.
- RAUWS (G.), GOVERS (G.), 1988. — Hydraulic and soil mechanical aspects of rill generation on agricultural soils. *The Journal of Soil Science*, 39 : 111-124.
- ROOSE (E.), 1973. — Dix-sept années de mesures expérimentales de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de basse Côte d'Ivoire. ORSTOM Abidjan, 125 p. Thèse Doct. Ing. Fac. Sciences. Abidjan, n° 20.
- ROOSE (E.), 1977. — Erosion et Ruissellement en Afrique de l'Ouest. Vingt années de mesure en petites parcelles expérimentales. *Trav. et Doc. de l'ORSTOM*, Paris, n° 78, 108 p.
- ROSE (C.), 1985. — Developments in Soil Erosion and Deposition Models. *Advances in Soil Science*, 2 : 1-63.
- SHARMA (K.D.), 1986. — Runoff behaviour of water harvesting microcatchments. *Agricultural Water Management*, 11 : 137-144.
- SPOMER (R.G.), MAHURIN (R.L.), 1987. — Landform changes determined photogrammetrically on deep loess soils. *Trans. ASAE*, 30 : 153-157.
- VALENTIN (C.), ROOSE (E.), 1981. — Soil and water conservation problems in pineapple plantations of South Ivory Coast. In : R.P. Morgan (editor), *Soil Conservation, Problems and Prospects*, Wiley : 239-246.
- YOUNG (R.), ONSTAD (C.), 1986. — The effect of erosive forces on surface seal formation. In : F. Callebaut, D. Gabriels and M. De Boodt (editors), *Assessment of Soil Surface Sealing and Crusting*. R.U. Gent : 72-80.
- ZINGG (A.), 1940. — Degree and length of slope as it affects soil loss in runoff. *Agr. Engng.*, 21 : 3-8.