

Influence de la dégradation structurale superficielle sur le ruissellement enregistré sous pluies simulées

TREVISAN D.*
LELONG F.**

RÉSUMÉ

Pour évaluer dans quelle mesure la simulation de pluie peut contribuer à la caractérisation quantitative de l'évolution des caractéristiques hydrauliques et structurales de la surface du sol, nous avons comparé deux protocoles de simulation de pluie ; l'un à intensité de pluie variable, l'autre à intensité de pluie constante et élevée. On montre que les régimes de ruissellement sont largement dépendants de l'évolution structurale de la surface du sol. Un modèle décrivant l'évolution spatiale des propriétés hydrauliques de la surface du sol permet d'évaluer la perte d'infiltration au cours du train d'averses à intensité constante et élevée. Il peut contribuer à l'étude du rôle des conditions initiales (configuration de l'état de surface, humidité et texture du sol) sur la cinétique de dégradation structurale superficielle.

MOTS-CLES : simulation de pluie - érosion - ruissellement - pellicule de battance.

INFLUENCE OF SUPERFICIAL STRUCTURAL DEGRADATION ON RUNOFF REGISTERED UNDER SIMULATED RAINFALL

In order to evaluate the contribution of rainfall simulation in the study of structural changes in the soil surface, we have compared two methods of simulation, one with constant rainfall intensity, one other with variable intensity. We have observed that runoff is linked to the potential evolution of soil surface. We have developed a model describing the structural changes in soil surface during successive constant intensity rainfalls, and tested their influence on the decrease in infiltration rates. It could probably be used in studies of the influences of initial conditions (soil moisture and texture, configuration of soil surface) on the kinetics of the structural changes in soil surface.

KEY-WORDS : rainfall simulation - erosion - runoff - soil crust.

INTRODUCTION

Dans le contexte de grande culture des milieux tempérés, le phénomène majeur à l'origine du ruissellement est la dégradation structurale superficielle du sol sous l'action des gouttes de pluie.

Ce phénomène a été étudié à plusieurs échelles :

* INRA - Station d'hydrobiologie lacustre, GIS Alpes du Nord - 75, avenue de Corzent - BP 11 F - 74203 Thonon-les-Bains.

** Université de Bourgogne - 6, boulevard Gabriel - 21000 Dijon.

– l'échelle de l'agrégat de sol (LE BISSONNAIS, 1989), où plusieurs mécanismes (fissuration, éclatement, désagrégation mécanique) déterminent la cinétique de la dégradation structurale et les caractéristiques des croûtes de battance ;

– l'échelle du m^2 , où BOIFFIN (1984) a mis en évidence plusieurs phases successives d'évolution de la surface et montré l'influence de la fragmentation des mottes, de l'agressivité des pluies et de la perméabilité du sol ;

– l'échelle de la parcelle, où BOIFFIN, PAPY et EIMBERCK (1988) ont montré que, sous pluie hivernale de faible intensité, l'apparition des premiers symptômes d'érosion est concomitante de celle du faciès de dégradation ultime de la surface sous l'action des pluies.

Si le déterminisme des risques érosifs est ainsi mieux appréhendé, la périodicité et la quantification des pertes en terre laissent un champ ouvert à l'expérimentation, avec notamment la caractérisation quantitative de l'évolution des caractéristiques hydrauliques et structurales de la surface du sol.

Dans ce cadre d'étude, la simulation de pluie peut s'avérer intéressante dans la mesure où elle permet de suivre (sur de courtes longueurs de pente et avec de fortes intensités de pluie) la cinétique du ruissellement et de l'exportation des matériaux. Les mesures sous pluies artificielles peuvent en effet être exploitées méthodiquement, grâce à une analyse des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration menée par LAFFORGUE (1977).

L'analyse des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration suppose néanmoins d'effectuer des pluies simulées sur des états de surface de sol n'évoluant pas au cours des pluies.

Cette restriction est gênante, car comme on travaille sous pluies de forte intensité, la condition n'est vérifiée que dans deux cas extrêmes :

- une surface de sol très stable qui n'évolue pas sous l'effet des averses ;
- une surface de sol très dégradée, comme celle observée dans la phase ultime de l'évolution de la surface du sol.

C'est la raison pour laquelle, en comparant deux protocoles de simulation de pluie, nous nous proposons d'évaluer dans quelle mesure les régimes de ruissellement enregistrés sous pluies simulées peuvent être affectés par la dégradation de la surface du sol. Nous tenterons par ailleurs d'analyser quels sont les protocoles de simulation de pluie les plus pertinents pour une caractérisation des propriétés hydrauliques et structurales de la surface du sol.

Il s'agit donc d'apporter une contribution à une exploitation rationnelle des données de simulation de pluie.

I - MATÉRIEL ET MÉTHODE

1. LE DISPOSITIF DE SIMULATION DE PLUIE

Nous utilisons un simulateur de pluie conçu et mis au point par ASSELINE et VALENTIN (1977). Une case métallique, fichée dans le sol, délimite une placette de mesure d'une surface de $1 m^2$. Elle présente à l'aval une série de trous qui permettent le

libre écoulement des lames d'eau ruisselées vers un dispositif de mesure de débit. Cet appareil permet d'effectuer des averses d'intensité forte puisque variant entre 30 et 120 mm/h. Durant les averses, l'intensité de la pluie est régulièrement contrôlée et un dispositif permet de corriger des éventuelles fluctuations, liées aux variations du débit d'eau d'alimentation.

2. MÉTHODE

Nous avons mesuré la dynamique de ruissellement sur plusieurs situations culturales, présentant des potentialités d'évolution de surface variables. Le sol est un sol lessivé glossique présentant au niveau de l'Ap une fraction limoneuse largement dominante (75 %) et un faible taux d'argile (11 %) qui lui confère une forte sensibilité à la battance (ISAMBERT, 1984).

Deux protocoles de simulation de pluie sont analysés : l'un à intensité variable, l'autre à intensité constante. Pour mesurer l'effet de la dégradation de la surface du sol sur le régime de ruissellement, les protocoles ont été appliqués sur différentes parcelles cultivées en blé ou en maïs et présentant des états de surface plus ou moins dégradés (Tableau I). Ces derniers ont été choisis sur la base d'observations qualitatives portant sur la continuité de la pellicule de battance. Ils sont classés en utilisant les codes définis par BOIFFIN (1984). On sait en effet que la dégradation de la surface du sol s'effectue au cours de phases successives et avec des processus bien caractérisés. Ainsi, un faciès initial F0, correspondant à l'état motteux, succède progressivement à un faciès F1 où les agrégats superficiels présentent des limites peu discernables sous l'effet d'une redistribution de particules libérées par le splash et l'humectation. Au faciès F1 succède progressivement un faciès F2, caractérisé par l'application de croûtes de battance qui proviennent d'une sédimentation des particules libérées dans des flaques d'eau superficielles.

Tableau I : Caractéristiques des averses et du dispositif expérimental

Characteristics of rainfalls and experimental device

	Occupation du sol	Etat de surface	Protocole d'aspersion
Protocole à intensité de pluie variable	Blé d'hiver	Faciès F2 : Pellicule de battance continue	3 averses successives – 60 mm/h (1 heure) – 80 mm/h (15') – 45 mm/h (30')
	Chaume de maïs non drainé	Faciès F2 + F1 : Pellicule de battance continue mais quelques îlots agrégaires	
	Chaume de maïs drainé	Faciès F1 + F2 : Pellicule de battance discontinue. Prédominance des phases agrégaires.	
Protocole à intensité de pluie constante	Standard (surface nue)	Faciès F0 : Surface bêchée (taille des mottes : 2-3 cm)	5 averses successives de 75 mm/h pendant 20'

3. RAPPEL SUR LES CARACTÉRISTIQUES DE L'HYDROGRAMME DE RUISSELLEMENT

Au cours d'une pluie simulée d'intensité constante, l'intensité de ruissellement prend des valeurs caractéristiques (Fig. 1).

On peut décrire quatre phases successives (LAFFORGUE, 1977) :

– de **to** à **ti** : une phase d'imbibition pendant laquelle l'eau non infiltrée sert au remplissage de dépressions ou cuvettes de perméabilité inférieure à l'intensité de la pluie, le débordement de ces cuvettes déclenchant le ruissellement ;

– de **ti** à **tm** : une phase transitoire qui révèle une augmentation du stockage de l'eau dans les flaques incomplètement remplies lors de la phase précédente et une augmentation de la hauteur de la lame d'eau en mouvement ;

– de **tm** à **tu** : une phase de régime permanent au cours de laquelle les variations des volumes d'eau stockés en surface et d'hauteur d'eau en mouvement sont nulles.

En phase de régime permanent de ruissellement, on peut calculer l'intensité minimale d'infiltration F_n :

$$F_n = I - R_x$$

(I : intensité de la pluie)

(R_x : intensité de ruissellement durant la phase de régime permanent).

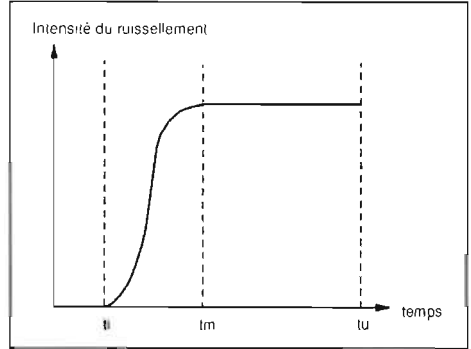


Fig. 1 : Intensité de ruissellement durant une pluie simulée d'intensité constante

Runoff intensity during a simulated rainfall of constant intensity

II - RÉSULTATS - DISCUSSION

1. ANALYSE DES RÉSULTATS DU PROTOCOLE A INTENSITÉ VARIABLE

A titre d'exemple, on donne à la figure 2 les intensités de ruissellement enregistrées au cours de la première pluie du train d'averses. On constate que le ruissellement atteint une valeur maximale et constante pour des durées de pluie variables selon les situations culturales. Durant cette phase de régime permanent, l'intensité du ruissellement peut varier de 2 à 5 mm/h, en raison des fluctuations de l'intensité de la pluie.

Dans le cas des protocoles d'aspersion à intensité plus variable, on étudie systématiquement la relation entre l'intensité minimale d'infiltration F_n et l'intensité de la pluie I . Cette étude permet de mettre en évidence l'influence de l'état de la surface du sol sur l'intensité d'infiltration (COLLINET *et al.*, 1981 ; CHEVALIER, 1981 ; VALENTIN, 1981 ; TREVISAN, 1986).

a) Cas du blé d'hiver (pellicule de battance continue, faciès F2) (Fig. 3a)

Les trois placettes de mesure où la dégradation de la surface a atteint un stade ultime (pellicule continue) montrent une similitude de comportement. Les intensités d'infiltration sont très faibles, de l'ordre de 2-3 mm/h (grandeur équivalente aux incertitudes de mesure) et comparables à celles mesurées par BOU-FIN (1984) pour ce type de matériaux limoneux.

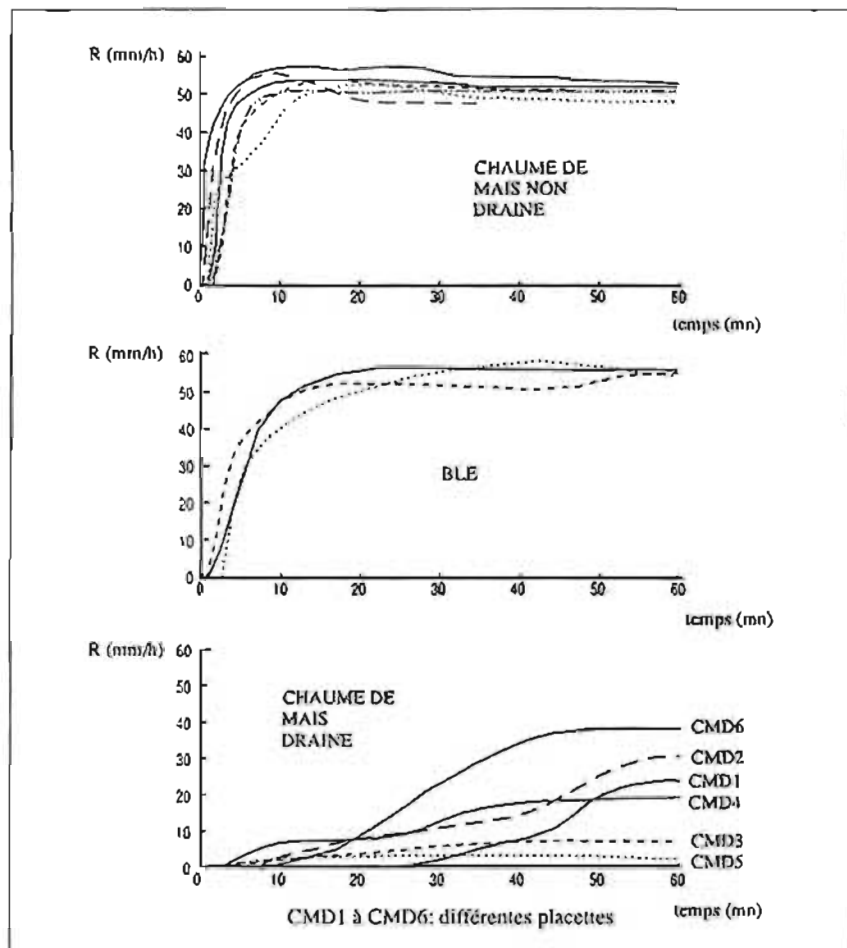


Figure 2 : Intensité du ruissellement durant la première pluie (60 mm/h)
 Runoff intensity during the first rain (60 mm/h)

b) Cas du chaume de maïs non drainé (pellicule de battance discontinue, faciès F1+F2) (Fig. 3b)

On trouve là aussi une homogénéité de réponse, avec des infiltrabilités comprises entre 5 et 10 mm/h. Cette légère amélioration de l'infiltration par rapport au cas précédent résulte de la présence de plages agrégaires déstructurées mais non entièrement recouvertes par des croûtes de dépôt.

c) Cas du chaume de maïs drainé (état de surface dominé par les plages agrégaires, faciès F1+F2) (Fig. 3c)

On peut constater deux types de réponse :

- des relations F_n (I) croissantes (placettes CMD1, CMD4 et CMD5 situées à la proximité du drain) ;
- des relations "en cloche" (placettes CMD2, CMD 3 et CMD6 situées à l'interdrain).

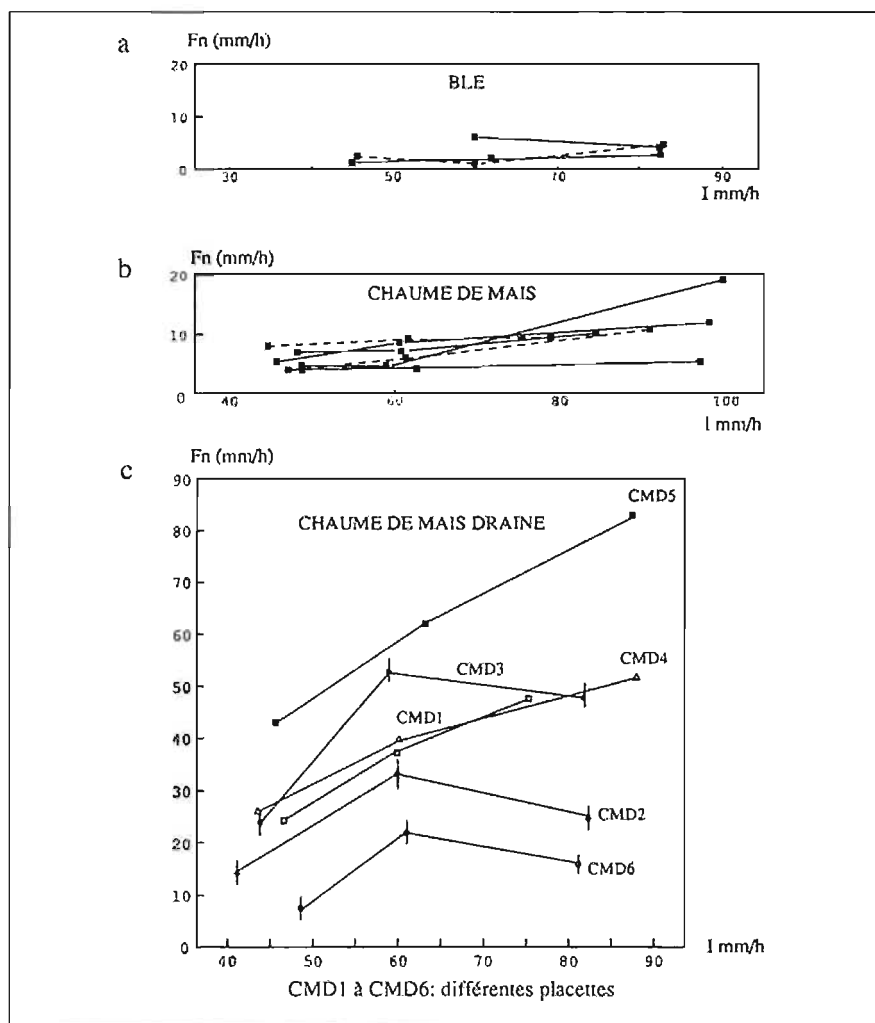


Figure 3 : Relation entre l'intensité de la pluie I et l'intensité d'infiltration F_n
Relation between rainfall intensity I and infiltration rate F_n

d) Discussion

L'état initial de la surface du sol influence de manière générale l'infiltration : celle-ci est plus importante dans le cas des états de surface peu dégradés, tel le chaume de maïs drainé.

L'effet de l'évolution de surface sur l'infiltration au cours du train d'averses peut être analysé en considérant plusieurs phénomènes.

Considérons en effet une placette de mesure où il existe une multitude de conductivités saturées ponctuelles de la surface du sol. Si cette placette de mesure, d'aire totale A , reçoit une pluie d'intensité I_1 , seule une fraction d'aire a_1 est submergée au niveau des points les moins conducteurs (généralement localisés au niveau des dépressions).

On peut écrire en phase de régime permanent :

$$R_{x_1} = I_1 - (A - a_1) I_1/A - a_1 V_1$$

où R_{x_1} : débit de ruissellement maximal,

$(A - a_1) I_1/A$: débit infiltré par l'aire non submergée $(A - a_1)$,

$a_1 V_1$: débit infiltré par l'aire submergée a_1 .

Dans ce dernier terme, on a $V_1 = K_1 i$, où V_1 est la vitesse d'infiltration, K_1 la conductivité saturée ponctuelle de l'aire submergée, i le gradient de charge hydraulique (peu différent de 1 en régime permanent d'écoulement).

On peut aussi écrire : $F_{n_1} = I_1 - R_{x_1}$

où F_{n_1} est l'intensité minimale d'infiltration.

On a donc pour une aire totale A unitaire ($A = 1$) :

$$F_{n_1} = (1 - a_1) I_1 + a_1 V_1$$

Si l'intensité de la pluie augmente ($I_2 > I_1$), la surface submergée de la placette s'accroît d'une aire a_2 :

$$F_{n_2} = (1 - a_1 - a_2) I_2 + a_1 V_1 + a_2 V_2$$

Enfin, pour toute pluie d'intensité $I_n > I_{n-1}$, l'intensité minimale d'infiltration peut s'écrire :

$$F_{n_n} = (1 - a_1 - a_2 - \dots - a_n) I_n + a_1 V_1 + a_2 V_2 + \dots + a_n V_n$$

Nous avons testé cette équation générale en fixant les valeurs de a et V pour trois surfaces hypothétiques d'homogénéité hydraulique croissante (Fig. 4). La valeur de V (liée en régime permanent à la hauteur d'eau en charge à la surface du sol) peut en effet, dans une première approche, être considérée comme constante, en accord avec les résultats de LAFFORGUE (1977) qui montre sur des placettes étanches que la hauteur moyenne d'eau mobilisable varie de 0,5 à 0,8 mm lorsque le ruissellement augmente de 30 à 150 mm/h.

On peut dès lors considérer (Fig. 4) que la relation $F_n \times I$ présente une pente proportionnelle à l'hétérogénéité de la surface, qui s'annule au fur et à mesure que la submersion affecte l'ensemble de la surface de la placette de mesure. Nous nous proposons d'appliquer ce modèle aux résultats de simulation de pluie et de le discuter en terme de caractérisation d'état de surface et de potentialité d'évolution.

Dans le cas du blé d'hiver et du chaume de maïs non drainé, les pentes des faisceaux de courbes $F_n \times I$ sont quasi nulles et, conformément au modèle, on peut considérer que l'ensemble de la surface fonctionne en submersion totale dès 45 mm/h. La stabilité des réponses nous permet ici d'envisager une absence de dégradation de l'état de surface au cours du train d'averses, ce qui n'est pas surprenant dans la mesure où la surface initiale de ces placettes était déjà très évoluée.

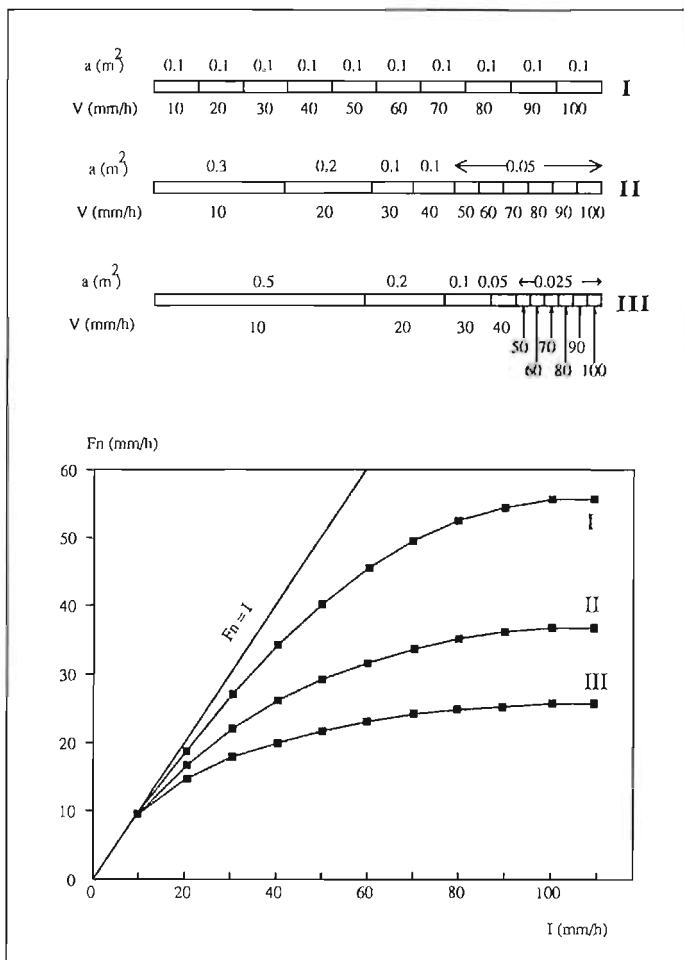


Figure 4 : Intensité d'infiltration calculée pour trois surfaces hypothétiques
Infiltration rates calculated in three hypothetical surfaces

Dans le cas du chaume de maïs drainé, le premier type de réponse (placettes CMD1, CMD4 et CMD5, situées à proximité du drain, Fig. 3c) pourrait être interprété sur la base de notre modèle : il décrit la réaction de placettes qui sont marquées par une forte hétérogénéité de la surface et qui fonctionnent en submersion partielle. Le second type (placettes CMD2, CMD3 et CMD6, situées dans l'interdrain) requiert plus d'attention. On constate qu'au-delà de 60 mm/h, la relation $F_n \times I$ n'atteint pas un plateau, mais que l'intensité de l'infiltration F_n prend au contraire des valeurs plus faibles, avec des écarts supérieurs aux incertitudes de mesure.

On est donc forcé d'admettre qu'il y a une baisse de l'infiltration des placettes de mesure, consécutive à une dégradation des propriétés hydrauliques de la surface, avec notamment une extension des aires de faible infiltration. On passerait dans notre application (Fig. 4) d'une surface de type I à une surface de type III, par exemple.

Le modèle d'interprétation des relations $F_n \times I$ est de ce fait incomplet puisqu'il faut y introduire une fonction traduisant l'évolution potentielle de la surface au cours des trains d'averses.

2. ANALYSE DES RÉSULTATS DU PROTOCOLE A INTENSITÉ CONSTANTE

Trois placettes de mesure dont la surface a été dénudée et bêchée (diamètre moyen des mottes : 2 cm) ont reçu une série de cinq pluies successives d'intensité de 75 mm/h.

La figure 5 donne la valeur des intensités de ruissellement enregistrées sur les différentes placettes de mesure. On constate que les hydrogrammes de ruissellement présentent bien la succession typique : phase d'imbibition, transitoire et régime permanent. Au cours de la phase de régime permanent, l'intensité de ruissellement est bien stable, même pour des durées de pluies qui excèdent 40 minutes. Notons que ce fait se vérifie également sur l'ensemble des hydrogrammes enregistrés au cours du protocole à intensité variable.

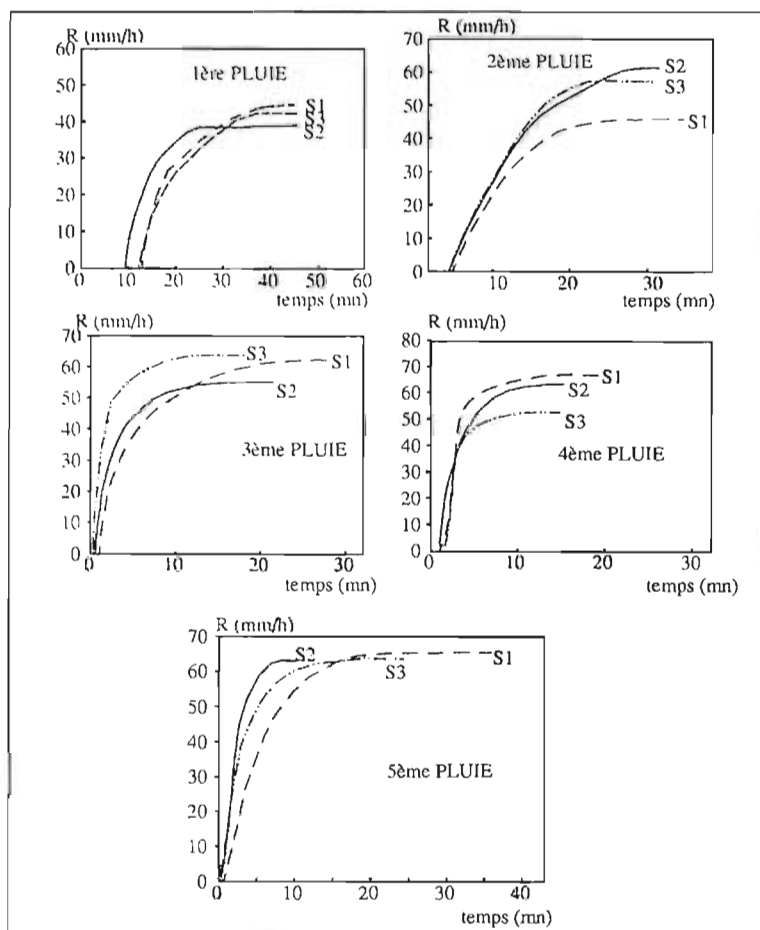


Figure 5 : Intensité du ruissellement durant le train d'averses. S1 à S3 : différentes placettes de mesure

Runoff intensity during successive rainfalls

Ceci semble en contradiction avec une dégradation des propriétés hydrauliques de la surface au fur et à mesure que la battance se développe. On pourrait en effet s'attendre, en phase de régime permanent, à une augmentation graduelle de l'intensité de ruissellement sous l'effet de la dégradation superficielle.

Si on calcule les intensités minimales d'infiltration F_n , on constate cependant qu'elles diminuent bien d'une pluie à l'autre (Tableau II).

Tableau II : Intensités d'infiltration F_n (mm/h) au cours du train d'averses

Infiltration rates F_n (mm/h) during successive rainfalls

	pluie 1	pluie 2	pluie 3	pluie 4	pluie 5
placette S1	30,5	26,3	13,1	8,7	9,2
placette S2	36,3	13,8	20,7	13,9	11,2
placette S3	31,1	18,3	11,0	14,0	11,5

Discussion

Ces résultats laisseraient supposer que la dégradation des propriétés hydrauliques de la surface s'effectuerait au cours des deux premières phases du régime de ruissellement.

Ainsi, au cours de la phase de régime permanent, toutes les flaques d'eau sont en communication avec l'exutoire ; les particules émises doivent être continuellement exportées par la lame d'eau ruisselante, échappant de la sorte à la sédimentation et à la redistribution des particules à la surface du sol. Inversement, au cours de la phase d'imbibition et de la phase transitoire du régime de ruissellement, on peut penser que la redistribution et la sédimentation des particules sont opérantes, car il existe toujours au cours de ces phases une certaine proportion de la surface non en communication avec l'exutoire.

Nous avons testé cette hypothèse en tentant d'exprimer la variation de F_n observée au cours de pluies successives en fonction de la durée cumulée des phases d'imbibition et des phases transitoires.

En phase de régime permanent, on peut écrire que le débit d'infiltration F_n est égal à :

$$F_n = F_{F0} + F_{F1} + F_{F2}$$

où F_{F0} est le débit d'infiltration au travers des mottes,

F_{F1} le débit au travers des croûtes structurales,

F_{F2} le débit d'infiltration au travers des croûtes continues.

A tout instant t de la phase d'imbibition et de la phase transitoire, on peut suggérer que la vitesse de diminution de l'aire $a(t)$ des mottes $F0$ est proportionnelle à cette aire, à un coefficient k près :

$$da(t)/dt = -k a(t)$$

La solution de cette équation est :

$$a(t) = Ae^{-kt}$$

où A est l'aire de la surface des mottes au temps t_0 et donc égale à 1 dans le cas d'une parcelle de mesure de surface unitaire.

En phase de régime permanent où le gradient de charge peut être considéré comme unitaire, le débit d'infiltration F_{F0} au travers des mottes est égal à :

$$F_{F0} = K_{F0} e^{-kt}$$

où K_{F0} est la vitesse de filtration en saturé du sol motteux.

On peut de même écrire que le débit d'infiltration $F_{F1} + F_{F2}$ au travers des faciès F1 et F2 est :

$$F_{F1} + F_{F2} = Vm(t) (1-a(t))$$

où $1-a(t)$ est l'aire des faciès F1 et F2,

et $Vm(t)$ la vitesse moyenne de filtration de cette aire.

La vitesse $Vm(t)$ doit diminuer au fur et à mesure que la battance s'amplifie (que l'épaisseur des dépôts sédimentaires augmente) et tendre vers une valeur minimale. On peut *a priori* représenter l'évolution de $Vm(t)$ (Fig. 6).

Au temps $t = 0$, $Vm(t)$ est égale à la perméabilité saturée K_{F1} du faciès F1, alors qu'au fur et à mesure que l'épaisseur des zones sédimentaires augmente, $Vm(t)$ tend vers une perméabilité saturée minimale K_{F2} , égale à celle des croûtes de battance continues (HILLEL, 1974).

L'expression mathématique d'une telle courbe a été décrite par HORTON (1940) qui s'attachait alors à écrire la décroissance de l'intensité d'infiltration au cours du temps. Elle peut être transposée à notre problème en utilisant les paramètres qui nous concernent :

$$Vm(t) = K_{F2} + (K_{F1} - K_{F2}) e^{-ct}$$

où c équivaut au travail à effectuer pour passer de K_{F1} à K_{F2} et ne dépend que des conditions initiales (texture, rugosité de la surface...).

L'intensité minimale d'infiltration F_n peut dès lors s'écrire :

$$F_n(t) = K_{F0} e^{-kt} + (1 - e^{-kt}) (K_{F2} + (K_{F1} - K_{F2}) e^{-ct})$$

L'ajustement aux données de ce modèle (Fig. 7) fournit les constantes suivantes :

$$c = 2,06 \quad k = 1,39 \quad K_{F0} = 59,8 \text{ mm/h} \quad K_{F1} = 15,27 \text{ mm/h} \quad K_{F2} = 2,72 \text{ mm/h}$$

Ce sont surtout les valeurs de K_{F0} , K_{F1} , K_{F2} qui peuvent nous servir de base pour la validation du modèle.

On constate qu'elles sont voisines de celles estimées par BOIFFIN *et al.* (1984). Ces auteurs donnent en effet des gammes de variation pour l'infiltration des différents faciès superficiels de sols limoneux :

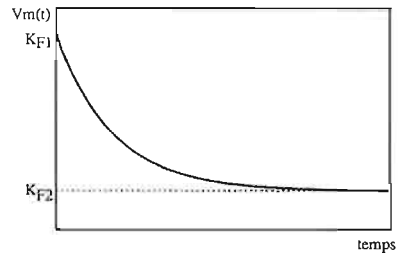


Figure 6 : Variation théorique de Vm au cours du temps

Theoretical variation of Vm during time

F0 faciès fragmentaire	30-50 mm/h
F1 faciès à croûtes structurales	5-30 mm/h
F2 faciès à croûtes continues	1-2 mm/h

Par ailleurs, K_{F2} estimé est similaire à l'infiltration des points les moins conducteurs relevés dans le cas du blé d'hiver à croûte continue.

Ces résultats tendent ainsi à valider l'hypothèse selon laquelle l'évolution de la surface s'effectuerait au cours de la phase transitoire du régime d'infiltration.

On voit par ailleurs que l'intérêt de ce protocole à intensité constante est supérieur à celui à intensité variable puisqu'il permet d'évaluer l'infiltration des différents faciès de la configuration superficielle et de fournir une vision dynamique de la configuration structurale de la surface.

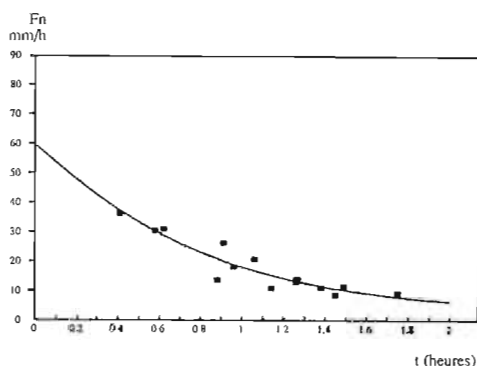


Figure 7 : Valeurs observées et ajustement de F_n
Observed and adjusted values of F_n

CONCLUSION

L'importance majeure des états de surface dans le processus d'érosion nous a incités à évaluer dans quelle mesure la simulation de pluie peut apporter des éléments pour caractériser les cinétiques d'évolution superficielles.

Dans ce but, nous avons exploré les possibilités d'interprétation de deux types de protocoles de simulation de pluie : un protocole à intensité variable et un à intensité constante.

Ceci nous a permis de voir que les régimes de ruissellement enregistrés sous pluies simulées sont largement dépendants de l'évolution structurale superficielle, dans la mesure où il existe un potentiel de dégradation de la surface. On voit par ailleurs que les protocoles à intensité constante permettent d'appréhender plus directement la dynamique d'évolution de la surface.

Le modèle proposé pour rendre compte de la variation de l'intensité d'infiltration F_n en fonction de la durée cumulée des phases d'imbibition et transitoire, analyse l'évolution spatiale des différents faciès de la surface et détermine leurs caractéristiques hydrauliques.

Ces caractéristiques sont certainement liées aux conditions initiales (taille des mottes, structure des agrégats, humidité, texture) dont on sait l'importance en terme de cinétique de dégradation et de propriétés hydrauliques des pellicules résultantes (LE BISSONNAIS, 1989). Un champ d'expérimentation s'ouvre donc, visant l'acquisition de références pour la prévision de l'évolution spatiale et des propriétés des faciès de la surface du sol.

Reçu pour publication : Mai 1992

Accepté pour publication : Décembre 1992

BIBLIOGRAPHIE

- ASSELIN J. et VALENTIN C., 1977. - Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. ORSTOM Adiopoudoumé, 34 p.
- BOIFFIN J., 1984. - *La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies*. Thèse INAPG, 320 p. + annexes.
- BOIFFIN J., PAPY F. et EIMBERCK M., 1988. - Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. I. Analyse des conditions de déclenchement de l'érosion. *Agronomie*, 8 (8), 663-673.
- COLLINET J. et VALENTIN C., 1979. - Mesures de ruissellement et de l'érosion sous pluies simulées pour quelques types de sols de Haute-Volta. ORSTOM Adiopoudoumé, 55 p.
- HILLEL D., 1974. - *L'eau et le sol. Principes et processus physiques*. Ed. Vander, Paris, 288 p.
- HORTON R.E., 1940. - An approach toward a physical interpolation of infiltration capacity. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 5, 399-417.
- ISAMBERT M., 1984. - *Carte pédologique de France au 1/100 000. Feuille de Châteaudun*. Notice explicative. SESCOF INRA, 259 p.
- LAFFORGUE A., 1977. - Inventaire et examen des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration sur parcelles. Application à une exploitation méthodique des données sous pluies simulées. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, 14 (41), 299-344.
- LE BISSONNAIS Y., 1988. - *Analyse des mécanismes de la dégradation et de la mobilisation des particules de terre sous l'action des pluies*. Thèse Univ. d'Orléans, 225 p.
- TREVISAN D., 1986. - *Comportement hydrique et susceptibilité à l'érosion des sols limoneux cultivés. Etude expérimentale au champ sous pluies simulées*. Thèse Univ. d'Orléans, 243 p.
- VALENTIN C., 1981. - *Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de la région subdésertique. Dynamique de formation et conséquences sur l'économie de l'eau*. Thèse, Paris, 213 p.

