

Etude expérimentale sous pluie simulée de la formation des croûtes superficielles

Apport à la notion d'érodibilité des sols

Yves LE BISSONNAIS, Ary BRUAND et Marcel JAMAGNE

Service d'étude des sols et de la carte pédologique de France. INRA. Ardon. 45160 Olivet

RÉSUMÉ

La formation de croûtes à la surface du sol, sous l'action des pluies, entraîne une réduction d'infiltrabilité qui accroît les risques de ruissellement et d'érosion. L'étude présentée a pour objectif l'analyse de la dynamique de formation et de la structure de ces croûtes, en relation avec les conditions hydriques initiales. Deux cas sont envisagés afin de privilégier deux mécanismes de désagrégation : l'éclatement, à partir d'agrégats initialement secs et la désagrégation mécanique, à partir d'agrégats initialement saturés. Les expériences ont été menées sous pluie simulée. La structure des croûtes a été décrite à partir d'observations morphologiques, et de la mesure de la taille des particules produites.

Les résultats montrent que la structure des croûtes obtenues, et leur cinétique de formation, sont très différentes suivant l'état d'hydratation initial des agrégats. Lorsque les agrégats sont secs, la formation de la croûte intervient dès le début de la pluie, les premières couches d'agrégats sont totalement désagrégées et un excès d'eau apparaît rapidement en surface. En revanche, lorsqu'ils sont saturés, la croûte se forme lentement et l'infiltrabilité reste élevée. Ces résultats sont interprétés en termes de mécanismes de désagrégation. Ils montrent que le risque d'apparition de ruissellement peut être très variable pour un même sol, suivant son état hydrique initial. La quantité et la dimension des particules produites sont également différentes suivant les cas. Ceci conduit à relativiser la notion d'érodibilité, puisque la sensibilité d'un sol à l'érosion n'est pas un caractère permanent, et dépend des interactions entre le climat, l'état initial et la nature du sol.

MOTS-CLÉS : Sol limoneux — Battance — Désagrégation — Etat hydrique — Micromorphologie.

ABSTRACT

EXPERIMENTAL STUDY OF SOIL CRUSTING

Crust formation under raindrops impact increases the risk of runoff and erosion. The aim of this study is to analyse the dynamic of crusting and the crust organization, in relationship with aggregate initial water content. Two cases are studied in order to privilege two mechanisms of aggregate breakdown : slacking with initial dry aggregates, and mechanical breakdown with prewetted aggregates. A rainfall simulator is used for the experiments. Crust organization is described with morphological observations and the measure of the size of the producted particles.

Results show that crust structure and dynamic of formation are very different according to the aggregates initial water content. When they are dry, crusting start quickly, surface aggregates are totally broken and an excess of water appears during the experiment. When they are prewetted, crust develops slowly and hydraulic conductivity remains high. Results are discussed in terms of mechanism of breakdown. They show that the risk of runoff can be very different for the same soil according to its initial moisture content. Quantity and size of producted particles differ also. These results led to discuss the notion of erodibility, because of soil sensibility to erosion is not a permanent characteristic, and depends on the interaction between climate, initial state and soil characteristics.

KEY WORDS : Silty soil — Sealing — Aggregate breakdown — Water content — Micromorphology.

RESUMEN

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA FORMACIÓN DE CORAZAS SUPERFICIALES BAJO LLUVIAS SIMULADAS
CONTRIBUCIÓN A LA NOCIÓN DE LA CAPACIDAD DE EROSIÓN DE LOS SUELOS

La formación de corazas superficiales bajo la acción de las lluvias produce una reducción de infiltrabilidad que aumenta los riesgos de escorrentía y de erosión. Ese estudio tiene por objeto de analizar la dinámica de formación y la estructura de esas corazas con relación a las condiciones hídricas iniciales. Se consideran dos casos a fin de estudiar dos mecanismos de desintegración : la fragmentación a partir de agregados inicialmente secos y la desintegración mecánica a partir de agregados inicialmente saturados. Los experimentos han sido efectuados bajo lluvia simulada. La estructura de las corazas ha sido descrita a partir de observaciones morfológicas y de la dimensión de las partículas producidas.

Los resultados muestran que la estructura de las corazas obtenidas y su cinética de formación son muy diferentes según el contenido de agua inicial en los agregados. Cuando los agregados son secos, la formación de la coraza se observa desde las primeras precipitaciones, las primeras capas de agregados se fragmentan completamente y un exceso de agua se observa rápidamente en la superficie. En cambio, cuando son saturados, la coraza se forma lentamente y la infiltrabilidad permanece elevada. Esos resultados se interpretan como mecanismos de desintegración. Muestran que el riesgo de escorrentía puede ser muy variable en el mismo suelo, según su contenido de agua inicial. También varían con los casos la cantidad y la dimensión de las partículas producidas. Eso conduce a hacer relativa la noción de capacidad de erosión, ya que la sensibilidad de un suelo a la erosión no constituye un factor permanente y depende de las interacciones entre el clima, las condiciones iniciales y la naturaleza del suelo.

PALABRAS CLAVES : Suelo limoso — Desintegración — Contenido de agua — Micromorfología.

INTRODUCTION

La formation de croûtes superficielles, en sols limoneux et sous l'impact des gouttes de pluie, a fait l'objet de nombreux travaux, dont certains très récents (BOLLIN, 1982 ; DE PLOEY et POESEN, 1985 ; GHADIRI et PAYNE, 1986 ; TREVISAN, 1986). Ces croûtes sont la principale cause de la diminution de l'infiltrabilité de la surface du sol et augmentent, par conséquent, les risques de ruissellement et d'érosion (BOIFFIN, 1984).

En 1945, ELLISON établissait, en étudiant le développement des croûtes, que l'érosion débute par la désagrégation des mottes présentes en surface et le déplacement des particules produites par rejaillissement sous l'impact des gouttes de pluie (effet *splash*). Dans un travail expérimental, Mc INTYRE (1958) a, par la suite, montré comment les propriétés du sol pouvaient intervenir sur le splash et la formation des croûtes. Plus récemment de nombreuses recherches ont été menées sur la désagrégation et le splash (SAVAT et POESEN, 1981 ; AL DURRAH et BRADFORD, 1982 ; COUSEN et FARRES, 1984), et sur la structure des croûtes (CHEN *et al.*, 1980 ; VALENTIN, 1981 ; ONOFIOK et SINGER, 1984 ; BOIFFIN et BRESSON, 1987 ; NORTON, 1987).

En sols limoneux, BOIFFIN (1984), et BOIFFIN et MONNIER (1985), ont montré que la formation des croûtes résultait d'une combinaison de processus : 1 — déta-

chement des particules, 2 — déplacement et colmatage interstitiel et 3 — compaction par le choc des gouttes. La quantité et la dimension des particules mobilisées sont déterminées par le mode de division des agrégats initiaux. Trois mécanismes de division ont été identifiés (BOIFFIN, 1984) :

- l'éclatement qui résulte de la compression de l'air dans la porosité des agrégats lors de l'humectation ;
- la désagrégation mécanique due à l'impact des gouttes de pluie sur les agrégats ;
- la microfissuration liée aux cycles d'humectation et dessiccation.

Cet auteur a mis aussi en évidence l'influence de l'état hydrique initial sur le comportement des agrégats lors de la mise en contact avec de l'eau. Dans une étude expérimentale détaillée de la désagrégation (LE BISSONNAIS, 1988), il a été montré que le type de mécanisme de désagrégation intervenant était étroitement lié à l'état hydrique initial et au mode de réhumectation des agrégats. La distribution de taille des particules produites est alors différente suivant les cas.

Dans ce travail, notre objectif est d'analyser la relation entre les mécanismes de désagrégation et la formation des croûtes sous différentes conditions expérimentales. Nous chercherons, en particulier, à étudier l'influence de l'état hydrique initial sur la dynamique de formation et la structure des croûtes résultantes. Ces

résultats nous permettront également de discuter des risques d'érosion associés à ce type d'évolution structurale et du caractère relatif de la notion d'érodibilité des sols.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Le sol

Les échantillons ont été prélevés dans l'horizon cultivé d'un sol limoneux de type « brun lessivé » (orthic luvisol) (BOIFFIN, 1984). Les mottes ont été séchées à l'air et forcées à la main à travers un tamis de 4 mm.

Seuls les agrégats de 3 à 4 mm de diamètre sont utilisés. Les résultats des analyses physiques et chimiques sont présentés dans le tableau I.

Obtention des croûtes

DESCRIPTION DES ÉCHANTILLONS

Les agrégats de 3-4 mm sont disposés dans des cylindres de 14 cm de diamètre et des boîtes de Kubiena. La couche d'agrégats est de 3 cm et repose sur 1 cm de sable grossier pour permettre le drainage de l'eau infiltrée (fig. 1). Dans un cas, on a utilisé des agrégats séchés à l'air, dans l'autre, ils ont été réhumectés sous vide jusqu'à saturation, avec de l'eau permutee.

TABLEAU I
Caractéristiques du matériau de sol
Characteristics of the soil material

GRANULOMETRIE en % du poids					C.E.C. meq/100 g	M.O. %	pH	CaCO ₃ %
< 2 µm	2-20 µm	20-50 µm	50-200 µm	200-2000 µm				
19,6	26,1	46,5	6,2	1,6	10,1	1,97	6,2	0,3

SIMULATION DE PLUIE

Le simulateur de pluie utilisé est formé d'un réservoir à niveau constant (FARRES, 1987), avec des capillaires en silicone à la densité de 5,6 par dm². Les gouttes formées tombent de 6 m sur les échantillons en passant à travers un fin grillage qui permet une bonne répartition dans l'espace des gouttes et une distribution de taille de gouttes proche de celle des pluies naturelles (GOVERS *et al.*, 1987). L'intensité de la pluie est de 20 mm/h, et son énergie cinétique est d'environ 80 % de celle d'une pluie naturelle de même intensité. Les cylindres et les boîtes destinées à la confection des lames minces sont placés en même temps sous le simulateur et retirés à différents stades d'évolution morphologique. La durée maximale de la pluie est de 90 min, les cylindres et les boîtes sont prélevés après 5, 10, 20, 40

et 90 min de pluie pour les agrégats initialement secs, soit respectivement 1,7, 3,4, 7, 14 et 30 mm de lame d'eau, et seulement après 40 et 90 min pour les agrégats réhumectés.

Analyse de la structure des croûtes et de la désagrégation

OBSERVATIONS DE SURFACE

La surface des échantillons a été examinée avec une loupe binoculaire après séchage afin de décrire l'évolution structurale et la diminution de rugosité de la surface.

LAMES MINCES

Les croûtes formées dans les boîtes de Kubiena ont été séchées à l'air, puis à 40 °C pendant 24 h. Elles ont ensuite été imprégnées avec une résine polyester diluée à 30 % par du styrène.

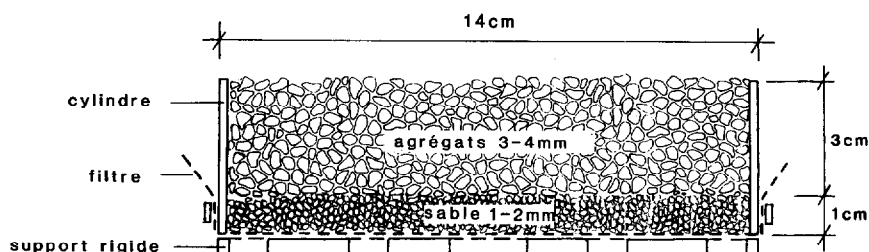


FIG. 1. — Schéma d'un anneau rempli avec les agrégats.
Schematic representation of a ring filled with the aggregates.

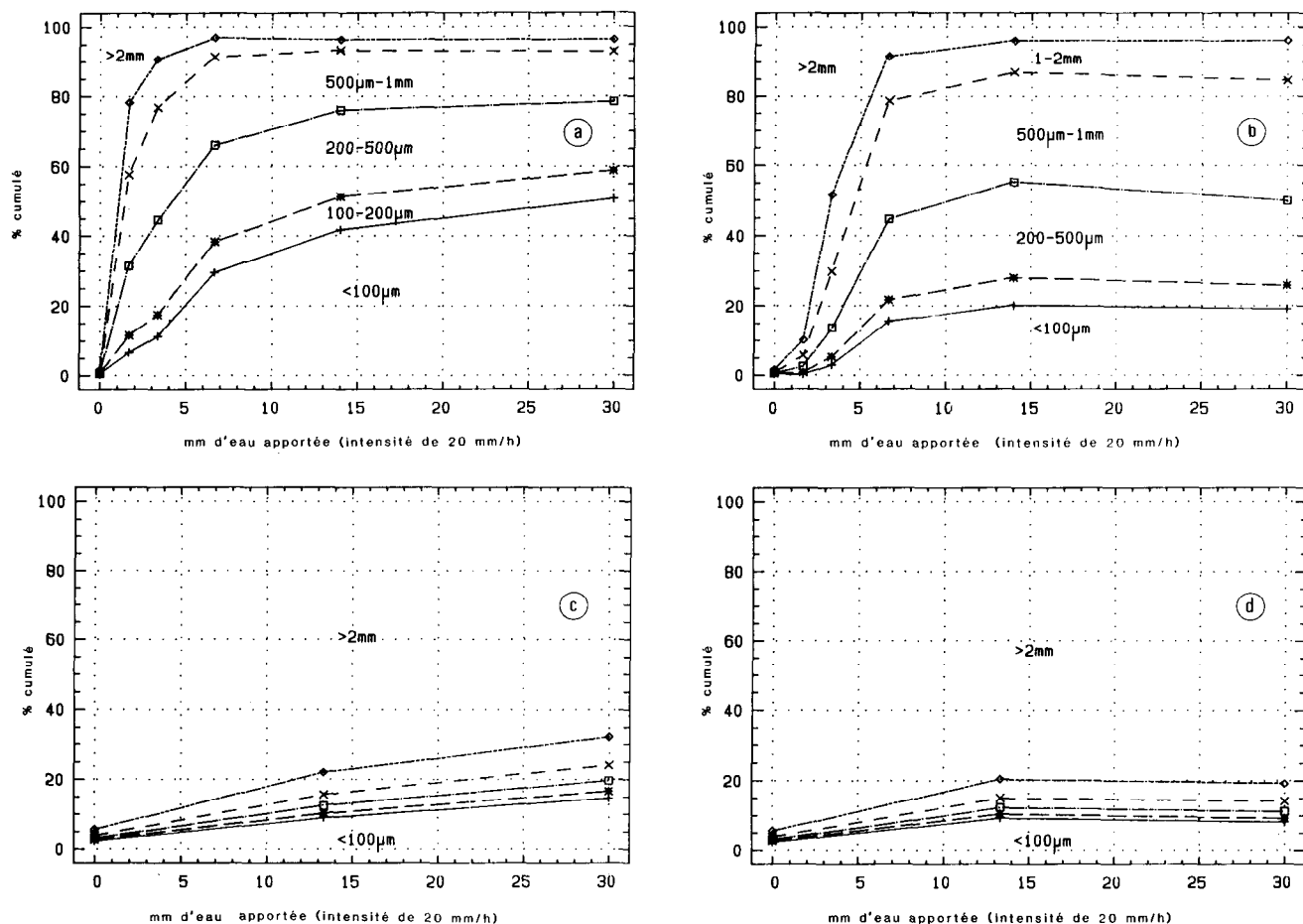


FIG. 2. — Distribution de la taille des particules produites avec des agrégats initialement secs : dans la croûte (a) et sous la croûte (b), et des agrégats initialement réhumectés sous vide : dans la croûte (c) et sous la croûte (d).
Size distribution of produced particles with initial air-dried aggregates : (a) inside crust and (b) under crust, and with initial prewetted aggregates, (c) inside crust and (d) under crust.

ANALYSE DE LA TAILLE DES PARTICULES

A chaque stade de développement des croûtes dans les cylindres, des échantillons sont prélevés dans la croûte et dans la couche sous-jacente, afin de décrire l'évolution de la distribution de la taille des particules. 5 répétitions sont faites pour chaque mesure. La méthode utilisée est celle décrite par LE BISSONNAIS (1988). Elle consiste en un tamisage à 0,1 mm après immersion dans l'éthanol, puis séchage à 105 °C du refus et tamisage à sec de celui-ci à 0,2, 0,5, 1 et 2 mm. Cette procédure permet d'obtenir une distribution de la taille des particules en 6 classes. On considère que les particules inférieures à 2 mm résultent d'une désagrégation, alors que celles supérieures à cette taille correspondent aux agrégats résiduels. Lors de chaque prélè-

PLANCHE 1. — Observations à la loupe binoculaire de la surface des croûtes et de leur structure en lame mince : agrégats initialement secs.

a et d : état initial

b et e : après 1,7 mm de pluie (5 min)

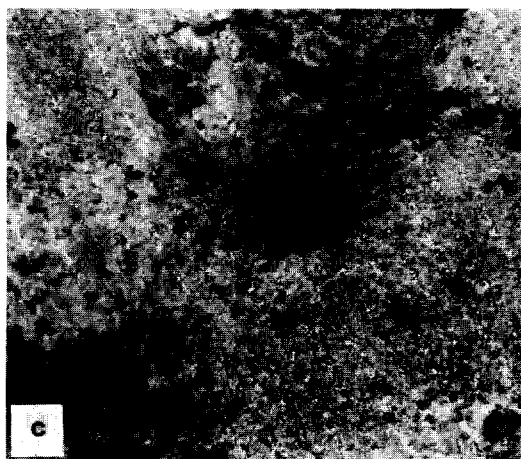
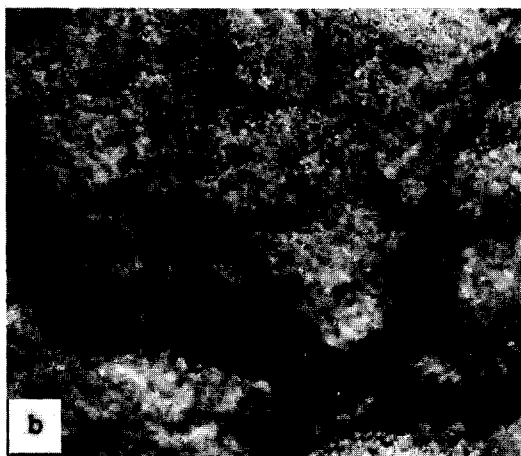
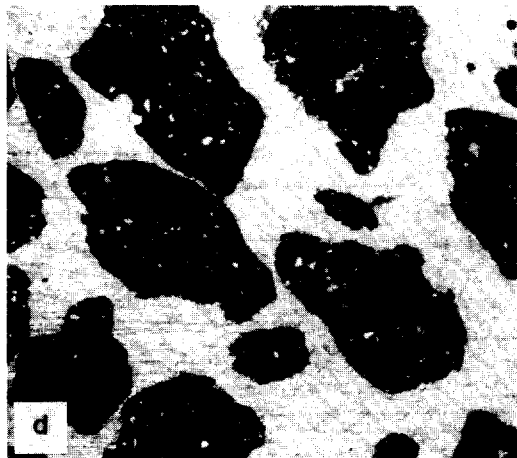
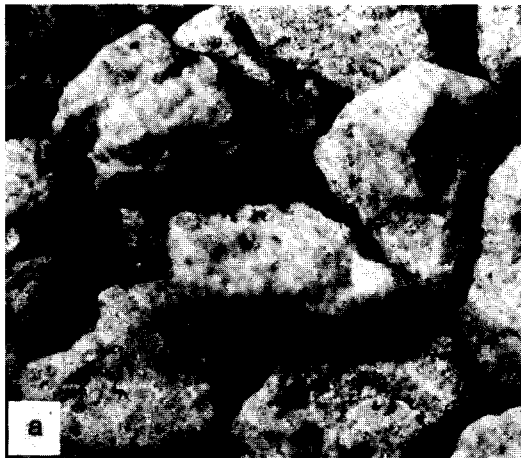
c et f : après 30 mm de pluie (90 min)

Binocular observations of the crust surface and their structure from thin sections : initially air-dried aggregates :

a and d : initial aggregates

b and e : after 1,7 mm rain (5 mn)

c and f : after 30 mm rain (90 mn)



0 10 mm

vement, on détermine les teneurs en eau de la croûte (0-5 mm) et de la couche sous-jacente (5-20 mm).

RÉSULTATS

Description de la surface des croûtes

L'observation de la surface des croûtes montre une évolution rapide avec les agrégats initialement secs (planche 1). 5 min après le début de la pluie, les agrégats de surface sont déjà très divisés (planche 1.b), bien qu'ils n'aient reçu que 1,7 mm d'eau. La division se fait sur place et sans déplacement des particules produites. Un excès d'eau en surface apparaît après avoir apporté entre 7 et 14 mm d'eau. Après 30 mm, la surface devient lisse et le taux de particules fines augmente (planche 1.c).

Avec les agrégats initialement saturés, 14 mm de lame d'eau sont nécessaires pour que l'on puisse noter une évolution de la surface (planche 2). Les agrégats restent individualisés mais apparaissent émoussés. De plus, les pores interagrégats sont partiellement colmatés par de fines particules. A la fin de l'expérience (90 min, 30 mm), la morphologie de surface est analogue au stade précédent (planche 2.c). On observe cependant un colmatage interstitiel plus important. Il n'y a pas d'excès d'eau en surface.

Description des lames minces

Avec les agrégats secs, la réhumectation affecte les 2 premières couches d'agrégats après 1,7 mm de pluie : un réseau de fissures apparaît, et les agrégats sont partiellement soudés (planche 1.f). Après 7 mm de pluie, la microfissuration affecte tous les agrégats, mais la croûte n'est pas encore continue (planche 1.g). Elle le devient après 14 mm de pluie et son épaisseur est d'environ 5 mm. Il s'agit encore d'une croûte structurale sans séparation des particules élémentaires. Après 30 mm, on observe un début de disjonction des particules élémentaires et leur dépôt dans les microdépressions (planche 1.f).

Dans le cas des agrégats saturés, les agrégats sont toujours distincts après des apports de 14 et 30 mm d'eau (planche 2.e et f). On observe des ponts entre les agrégats, formés essentiellement de grains de limon.

Taille des particules mobilisées

La figure 2.a donne l'évolution de la quantité de particules produites et la distribution de taille de ces particules au niveau de la croûte pour les agrégats initialement secs. Le taux de particules supérieures à 2 mm diminue très vite au cours de la première phase et les particules résultantes sont comprises entre 200 μ m et 1 mm. Durant les étapes suivantes, cette classe de taille

diminue au profit de la classe inférieure à 100 μ m. Sous la croûte, l'évolution ne débute qu'après 7 mm de pluie (fig. 2.b) et la distribution est analogue à celle de la croûte après 3,4 mm, mais ensuite on n'observe pas d'augmentation pour la classe la plus fine.

Avec les agrégats saturés, l'évolution de la taille des particules est beaucoup plus limitée (fig. 2.c). Le taux de particules supérieures à 2 mm reste supérieur à 75 % durant toute la durée de la pluie. La seule évolution significative est une légère augmentation de la classe < 100 μ m. Sous la croûte, l'évolution est encore plus limitée (fig. 2.d).

Evolution de la teneur en eau

La figure 3 montre que la teneur en eau des agrégats initialement secs, augmente rapidement jusqu'à 38 g/100 g. Pour les agrégats saturés sous vide, la teneur en eau, d'environ 30 g/100 g, n'évolue quasiment pas durant toute l'expérience.

DISCUSSION ET CONCLUSION

La formation des croûtes à partir d'agrégats initialement secs

On peut distinguer plusieurs étapes :

- La première correspond à l'humectation des agrégats de la surface (1,7 mm). Ces agrégats sont microfissurés par éclatement partiel (LE BISSONNAIS, 1988) (planche 1.b et f), et la taille des particules produites est intermédiaire (70 % entre 0,2 et 2 mm) (fig. 2.a). On peut comparer cette taille à celle de la maille du réseau de fissures qui est du même ordre de grandeur (planche 1.f). Ces agrégats sont partiellement soudés, mais il reste une forte porosité entre eux, et les particules ne sont pas déplacées. L'eau continue à s'infiltrer par capillarité et écoulement gravitaire.

- Durant la seconde étape (entre 1,7 et 7 mm), la couche supérieure d'agrégats est saturée, mais il n'y a pas encore d'excès d'eau en surface (planche 1.b et c). Les particules produites durant l'étape précédente sont dépla-

PLANCHE 2. — Observations à la loupe binoculaire de la surface des croûtes et de leur structure en lame mince : agrégats initialement saturés d'eau

a et d : état initial

b et e : après 14 mm de pluie (40 min)

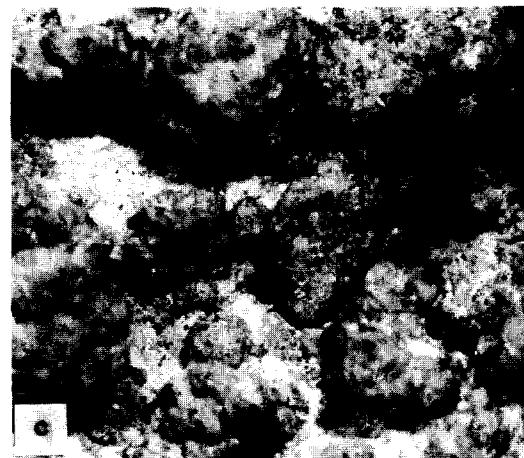
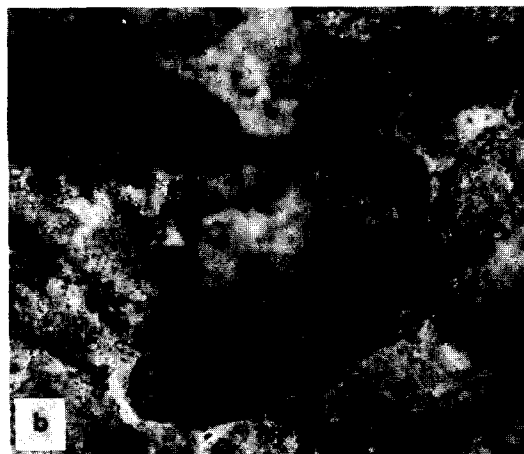
c et f : après 30 mm de pluie (90 min)

Binocular observations of the crust surface and their structure from thin sections : initially prewetted aggregates

a and d : initial aggregates

b and e : after 14 mm rain (40 mn)

c and f : after 30 mm rain (90 mn)



0 10 mm

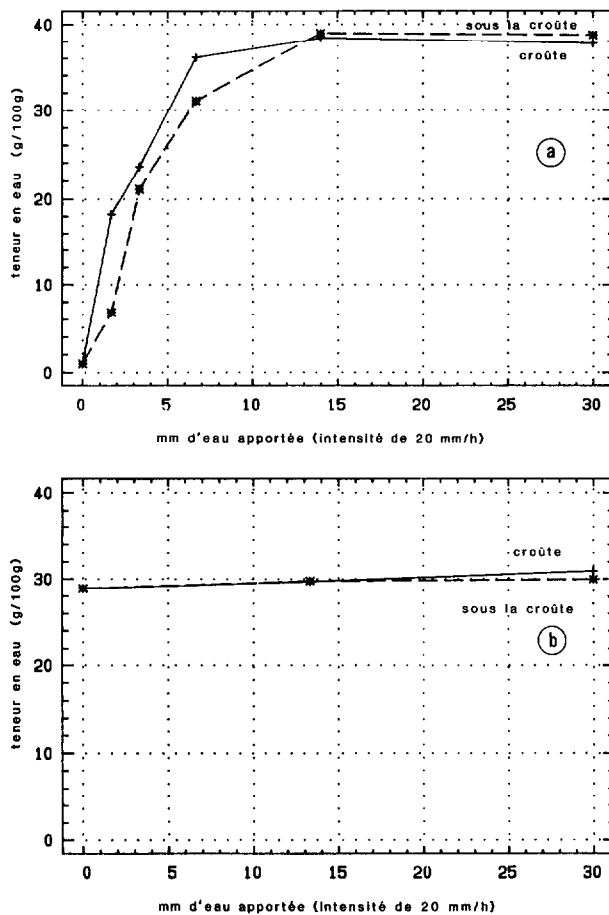


FIG. 3. — Evolution de la teneur en eau durant l'expérience avec des agrégats initialement secs (a) et des agrégats initialement réhumectés sous vide (b).

Water content changes during the experiment with initially air-dried aggregates (a) and initially prewetted aggregates (b).

cées par les gouttes de pluie et colmatent progressivement la porosité interagrégats (planche 1.f et g). Environ 60 % des particules restent entre 0,2 et 2 mm (fig. 2.a). Cependant la classe $< 100 \mu\text{m}$ augmente (30 % après 7 mm). Ces particules forment une croûte structurale. Sous cette croûte, les agrégats sont progressivement réhumectés entre 1,7 et 3,4 mm (fig. 3.a), la distribution de la taille des particules est, après 7 mm de pluie, analogue à celle de la surface après 3,4 mm (fig. 2.a et b), indiquant que tous les agrégats sont microfissurés par éclatement partiel.

La 3^e étape commence avec l'apparition d'un excès d'eau en surface après 7 mm de pluie. Le déplacement et la désagrégation mécanique des particules résultant de la microfissuration initiale ferment la surface (planche 1.c), et l'infiltrabilité devient inférieure à

l'intensité de la pluie. Durant cette étape, il ne reste plus d'agrégats supérieurs à 1 mm, et la classe de taille inférieure à $100 \mu\text{m}$ continue d'augmenter (fig. 2.a). A la fin de l'expérimentation (30 mm), une croûte de dépôt apparaît dans les microdépressions. Elle est due à la mise en suspension et à la dispersion des particules dans la lame d'eau superficielle. La croûte atteint une épaisseur de 5 mm et la rugosité est très faible : $< 2 \text{ mm}$ (planche 1.d et f).

Sous la croûte, la taille des particules n'est pas modifiée par rapport au stade 7 mm (fig. 2.b). Cette zone n'est pas affectée par l'impact des gouttes de pluie, et les agrégats ne sont donc plus modifiés au cours de cette étape grâce à la protection par la croûte. Leur seule évolution a été la microfissuration (planche 1.g).

La teneur en eau, qui évolue de manière analogue dans les couches superficielles et sous-jacentes, atteint sa valeur maximale (38 g/100 g) pour une hauteur de pluie comprise entre 7 et 14 mm (fig. 3.a). Cette valeur est sensiblement plus élevée que celle correspondant au cas des agrégats réhumectés sous vide. Après 30 mm de pluie, la différence de teneur en eau, qui est de l'ordre de 9 g/100 g, peut être attribuée au volume de microfissures.

Formation de la croûte à partir d'agrégats initialement saturés

Il est plus difficile de distinguer différentes étapes dans la formation de la croûte, du fait de l'évolution très lente durant l'expérimentation. Les agrégats ne sont pas détruits, et la rugosité ne diminue pas (planche 2). Les lames minces montrent que des particules sont accumulées entre les agrégats, juste en dessous de la première couche (planche 2.f). La taille de ces particules, dont la quantité augmente au cours de la pluie, est inférieure à $100 \mu\text{m}$ (fig. 2.c). Les autres classes de particules entre $100 \mu\text{m}$ et 2 mm, sont quasiment inexistantes. Le faible pourcentage de particules de 1 à 2 mm de diamètre résulte de l'abrasion des plus petits agrégats initiaux. La teneur en eau n'évolue que très peu durant toute l'expérience (fig. 3.b).

Au stade final, la surface ne présente pas une morphologie de croûte, la porosité interagrégat reste en partie ouverte (planche 2.c). Les particules accumulées entre les agrégats semblent avoir une teneur en limon plus élevée que celle des agrégats initiaux (planche 2.f). Cette très faible évolution structurale des agrégats au cours de l'expérience est cohérente avec la stabilité de leur teneur en eau (fig. 3.b).

Dynamique de formation des croûtes et risque d'érosion

L'évolution observée est en accord avec les résultats de l'analyse des différents mécanismes élémentaires de

la désagrégation par l'eau (LE BISSONNAIS, 1988). Les deux situations de cette expérience correspondent à la combinaison des trois mécanismes : éclatement, microfissuration et désagrégation mécanique pour les agrégats initialement secs, et à la seule désagrégation mécanique pour ceux initialement saturés.

Ces résultats montrent que le développement des croûtes est très largement dépendant de l'état hydrique initial des agrégats. Néanmoins, la faible évolution des agrégats initialement saturés est liée à la fois au fait qu'ils sont saturés au début de la pluie et que cette saturation a été réalisée sous vide. Si la réhumectation avait eu lieu à l'air, une microfissuration, dont l'importance est liée à la vitesse de réhumectation, se serait produite au cours de cette étape préalable. Les deux évolutions structurales, au cours de la pluie, auraient alors été proches (LE BISSONNAIS, 1988). La procédure expérimentale adoptée nous a permis de mettre en évidence le rôle propre de l'état hydrique et des conditions de réhumectation. Ceci permet également d'expliquer l'apparente divergence de nos résultats avec ceux de COUSEN et FARRÉS (1984) : dans le cas de l'expérimentation réalisée par ces auteurs, la diminution de stabilité structurale avec l'augmentation de l'humidité des agrégats est probablement liée à une désagrégation croissante lors de la phase d'humectation des agrégats, réalisée à l'air.

Des évolutions structurales très différentes, pour le même matériau et dans les mêmes conditions de pluie, ont donc été enregistrées. Les comportements hydrodynamiques qui résultent de cette évolution sont eux aussi très différents. Avec les agrégats initialement secs, la fermeture de la surface est rapide et des conditions favorables au ruissellement apparaissent après seulement quelques millimètres de pluie. En revanche, dans le cas des agrégats préalablement saturés, l'infiltrabilité reste toujours supérieure à l'intensité de la pluie (20 mm/h). Dans les conditions structurales d'un lit de semence, ces différences seront moins marquées en raison d'une distribution initiale de taille d'agrégat moins monodi-

mensionnelle. Néanmoins, la quantité et la taille des particules mobilisables par la lame d'eau dans le cas d'un ruissellement en nappe sont très différentes suivant l'état hydrique initial, du fait de l'intervention de mécanismes de désagrégation différents.

Ces résultats montrent que, pour un sol donné, le risque d'érosion dépend largement des conditions hydriques et structurales initiales, du fait à la fois de différences dans la cinétique de fermeture de la surface du sol et des différences dans la distribution de la taille des particules produites et susceptibles d'être mobilisées par le ruissellement.

Par conséquent, il paraît difficile de définir l'érodibilité des sols, la sensibilité d'un matériau vis-à-vis de l'érosion n'étant pas un caractère permanent. On ne peut, en effet, la caractériser que par référence à des scénarios climatiques et culturels particuliers. A la notion très générale, et donc forcément imprécise d'érodibilité, il semble préférable de substituer une caractérisation de la sensibilité des matériaux vis-à-vis de chacun des différents processus qui conduisent à l'apparition de l'érosion, et ceci en tenant compte dans chaque cas des interactions qui existent entre les paramètres conjoncturels (états hydrique et structural, type de pluie...) et permanents (matériau de surface, profil du sol...). Il semble nécessaire pour cela d'arriver à établir un modèle général de l'érosion hydrique ; les résultats présentés ici pourraient en constituer l'un des maillons.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Messieurs P. COURTEMANCHE, Ch. LE LAY et B. RENAUX (SESCPF, INRA Orléans) pour leur aide lors de la réalisation des expériences.

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 17 octobre 1989.

BIBLIOGRAPHIE

- AL-DURRAH (M.), BRADFORD (J.-M.), 1982. — The mechanism of raindrop splash on soil surfaces. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46 : 1086-1090.
- BOIFFIN (J.), 1984. — La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Thèse Docteur Ingénieur, Paris INA-PG, 320 p.
- BOIFFIN (J.), BRESSON (L.M.), 1987. — Dynamique de formation des croûtes superficielles : apport de l'analyse microscopique. In : Micromorphologie des sols. Actes de la VII^e Réunion Internationale de Micromorphologie des sols, Paris, juillet 1985. Fedoroff N., Bresson L.M. et Courty M.A. éd., AFES : 393-399.
- BOIFFIN (J.), MONNIER (G.), 1985. — Infiltration rate as affected by soil surface crusting caused by rainfall. In : Assessment of soil surface sealing and crusting. Callebaut, Gabriels, De Boodt Eds., Proc. of the Symposium held in Gent, Belgium : 210-217.
- BOLLINE (A.), 1982. — Etude et prévision de l'érosion des sols limoneux cultivés en moyenne Belgique. Thèse université de Liège. 356 p.
- CHEN (Y.), TARCHITZKY (J.T.), BROUWER (J.), MORIN (J.), BENIN (A.), 1980. — Scanning electron microscope observations of soil crusts and their formation. *Soil Sci.* : 130, 49-55.
- COUSEN (S.M.), FARRES (P.J.), 1984. — The role of moisture content in the stability of soil aggregates from a temperate silty soil to raindrop impact. *Catena*, 11 : 313-320.
- DE PLOEY (J.), POESEN (J.), 1985. — Aggregates stability, runoff generation and interrill erosion. In : Geomorphology and soils. Richards K.S., Arnett R.R., Ellis S. Eds., Allen and Unwin Pub. : 99-120.
- ELLISON (W.D.), 1945. — Some effects of raindrops and surface flow on soil erosion and infiltration. *Trans. Am. Geophys. Union*, 26 : 415-429.
- FARRES (P.J.), 1987. — The dynamics of rainsplash erosion and the role of soil aggregate stability. *Catena*, 14 : 119-130.
- GHADIRI (H.), PAYNE (D.), 1986. — The risk of leaving the soil surface unprotected against falling rain. *Soil and Tillage research*, 8 : 119-130.
- GOVERS (G.), EVERAERT (W.), POESEN (J.), RAUWS (G.), DE PLOEY (J.), 1987. — Susceptibilité à l'érosion par rigole d'un sol limoneux : Essais dans le grand canal de Caen. *Bull. du Centre de géomorphologie de Caen — CNRS*, n° 333 : 83-106.
- LE BISSONNAIS (Y.), 1988. — Analyse des mécanismes de désagrégation et de la mobilisation des particules de terre sous l'action des pluies. Thèse Doc. Univ. Orléans, 225 p.
- MCINTYRE (D.S.), 1958. — Soil splash and the formation of surface crusts by raindrop impact. *Soil Science*, 85 : 261-266.
- NORTON (L.D.), 1987. — Micromorphological study of surface seals developed under simulated rainfall. *Geoderma*, 40 : 127-140.
- ONOFIOK (O.), SINGER (M.J.), 1984. — Scanning electron microscope studies of surface crusts formed by simulated rainfall. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48 : 1137-1143.
- SAVAT (J.), POESEN (J.), 1981. — Detachment and transportation of loose sediments by raindrop splash. Part I. The calculation of absolute data on detachability and transportability. *Catena*, 8 : 1-18.
- TREVISAN (D.), 1986. — Comportement hydrique et susceptibilité à l'érosion de sols limoneux cultivés. Thèse 3^e cycle, Univ. Orléans, 242 p.
- VALENTIN (C.), 1981. — Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de région subdésertique. Thèse 3^e cycle, Université Paris 7, 213 p.