HAL
open science

Modification de l'espace poral des croûtes de surface sous l'action des pluies et conséquences sur l'infiltrabilité

J.C. Fiès, A.M. Castelao-Gegunde

To cite this version:

J.C. Fiès, A.M. Castelao-Gegunde. Modification de l'espace poral des croûtes de surface sous l'action des pluies et conséquences sur l'infiltrabilité. Agronomie, 1996, 16 (6), pp.367-379. hal-02699113

HAL Id: hal-02699113

https://hal.inrae.fr/hal-02699113v1

Submitted on 1 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

agronomie (1996) 16, 367-379
© Elsevier/INRA

agronomie: agriculture and environment

Modification de l'espace poral des croûtes de surface sous l'action des pluies et conséquences sur l'infiltrabilité

JC Fiès [1]*, AM Castelao-Gegunde [2]

[1] *Unité de science du sol d'Avignon, Inra, site Agroparc, F-84914 Avignon cedex 9, France;*
[2] *Departamento de Produccion Vexetal, Facultad de Veterinaria, Augas Férreas s/n, E-27002 Lugo, Espagne*

(Reçu le 29 décembre 1995 ; accepté le 5 juin 1996)

Résumé — Les croûtes de surface des sols cultivés voient leur porosité et leur infiltrabilité évoluer avec les pluies. L'objectif de ce travail est d'analyser leur porosité à différents états hydriques en utilisant les notions d'espace poral textural et structural. Les croûtes sont réalisées en appliquant à un sol limono-argileux gonflant des pluies d'énergie cinétique totale *KE* allant de 70 à 340 J m^{-2}. Leur porosité est caractérisée par i) densimétrie à sec et à l'état humide à la pression $h = -0{,}1$ m, ii) rétention en eau pour h allant de $-0{,}1$ à -10 m, iii) porosimétrie au mercure à l'état sec. L'infiltrabilité est mesurée par la méthode de la tache saturée. La masse volumique de la croûte (g cm^{-3}) croît avec *KE*, de 1,58 à 1,70 à sec, de 1,35 à 1,42 pour $h = -0{,}1$ m, les valeurs maximales s'approchant des valeurs limites données par la masse volumique texturale. La porosimétrie et la rétention en eau montrent conjointement que seul le volume des pores structuraux s'abaisse, de 60 % au total quand *KE* augmente, l'infiltrabilité se réduisant d'un facteur 10. L'équation de Kozeny permet de relier cette variation à celle de la porosité structurale des croûtes et souligne que la géométrie de l'espace poral structural varie avec son état hydrique.

croûte / masse volumique / porosimétrie au mercure / infiltrabilité / énergie cinétique

Summary — Variation of crust pore space under rain and consequences on infiltrability. *Both porosity and infiltrability of crusted topsoils decrease under repeated rainfall. The aim of this work was to analyse crust porosity in the dry and wet states using the distinction of pore space between textural and structural porosity. Crusts were obtained by subjecting a swelling silty-clay soil to simulated rainfall with total kinetic energy* KE *ranging from 70–340 J* m^{-2}. *Crust porosity was determined by three methods: densimetry in the dry state and at a pressure head of* h = *–0.1 m, water retention with* h *ranging from –0.1 to –10 m and mercury porosimetry at dry state. Infiltrability was measured by the drip water method. Crust bulk density (g* cm^{-3}*) increased with* KE, *from 1.58 to 1.70 in the dry state and from 1.35 to 1.42 for* h = *–0.1 m, the greatest values approaching the textural bulk density boundary values. Both mercury porosimetry and water retention methods showed that the structural pore volume was reduced, on the whole by 60%, when* KE *increased. Meanwhile, infiltrability was found to be reduced by a factor of 10. Kozeny's equation was used to link infiltrability variation to crust structural porosity and it was pointed out that dry and wet structural pore spaces are different.*

soil crust / bulk density / infiltrability / mercury porosimetry / kinetic energy

* Correspondance et tirés à part

INTRODUCTION

L'évolution des caractéristiques physiques de la surface des sols cultivés se produit sous l'action des pluies à une échelle de temps généralement courte et peut avoir des conséquences irréversibles. Ainsi en sol battant, les risques majeurs liés à la formation d'une croûte superficielle ont-ils bien été identifiés tant au niveau agronomique (Boiffin et Monnier, 1985 ; Souty et Rode, 1994) qu'au niveau environnemental (Sharpley et al, 1994). Les principaux mécanismes intervenant lors de la formation des croûtes ainsi que les facteurs modulant le type de croûte et sa cinétique de développement sous pluie ont été largement étudiés (Valentin et Bresson, 1992).

La manière dont se produit l'évolution des propriétés des croûtes a fait l'objet de travaux récents. La plupart d'entre eux considèrent que le phénomène le plus important est l'encombrement (ou le blocage) des pores grossiers par des particules élémentaires ou par des fragments. Roth et Eggert (1994) proposent un schéma reliant l'évolution de la croûte et le niveau de son infiltrabilité, dans lequel interviennent une vitesse de dégradation (rapide ou lente), ainsi qu'une granulométrie (grossière ou fine) des fragments terreux produits. Le Bissonnais et Bruand (1995) caractérisent les croûtes par la distribution de taille de leurs particules et fragments terreux constitutifs. Ils montrent que cette distribution est aussi sous la dépendance des conditions hydriques initiales du sol. Ils concluent que l'analyse de la stabilité des agrégats de sols pourrait permettre de prévoir la distribution des constituants des croûtes formées sur ces sols. Par ailleurs, Ewing et Gupta (1994) soulignent que l'on a peut être négligé l'hypothèse d'un fermeture des pores par déformation et coalescence des fragments (Bresson et Boiffin, 1990) ou sous l'effet d'impact des gouttes (Römkens et al, 1990). Ils modélisent sur un système poreux en réseau les deux phénomènes de fermeture et d'encombrement des pores ainsi que les conséquences sur la conductivité hydraulique.

Il apparaît que dans son ensemble cette analyse des mécanismes de l'évolution des croûtes manque d'une quantification des caractéristiques porales et de leur évolution temporelle. Il est vrai que les croûtes sont le plus souvent caractérisées par la seule mesure de la masse volumique totale, ce qui ne permet pas d'analyser leur porosité. De plus, cette mesure concerne presque toujours le sol à l'état sec. Des essais ont cependant montré qu'il était possible de quantifier l'espace poral de croûtes de sol à l'état humide (Fiès et Panini, 1995). Une telle quantification apporterait des données applicables dans des domaines variés, comme les risques d'apparition du ruissellement ou encore les conditions d'hypoxie pour les semences (Richard et Guérif, 1988).

L'objectif de ce travail est de montrer que l'analyse de l'espace poral des croûtes au cours de leur évolution est possible et apporte une connaissance alternative et complémentaire de celle de la distribution de leurs différents éléments constitutifs. Cette analyse est basée sur la distinction entre un espace poral textural, qui a son origine dans l'arrangement des constituants élémentaires du sol (Monnier et al, 1973) et un espace poral structural qui, dans le cas des croûtes formées par éclatement, est dû à l'accumulation des fragments terreux (Le Bissonnais et al, 1989). Elle est conduite ici sur un même type de croûte, formé après différentes séquences de pluies. A différents états hydriques, l'espace poral structural est quantifié par trois méthodes différentes. La pertinence du paramètre espace poral structural sera mise en évidence en étudiant sa variation par rapport à celle de l'infiltrabilité mesurée sur les croûtes.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Sol

Le sol provient de la couche 0–0,1 m d'une parcelle cultivée de basse terrasse de Durance (Poirson). C'est un Calcaric Fluvisol (classification FAO) contenant 350 g kg^{-1} de CO_3Ca. Sans décarbonatation, sa texture est celle d'un limon argileux. La fraction 0–2 µm représente 283 g kg^{-1} et la fraction 2–50 µm atteint 600 g kg^{-1}. Le taux de carbone organique est de 9,7 g kg^{-1}. La capacité d'échange de 85 meq kg^{-1} est saturée en Ca^{2+}. La masse volumique de solide du sol est de 2,756 ± 0,012 g cm^{-3}.

Ce sol a été choisi car il s'encroûte sous l'action des pluies naturelles et présente une capacité marquée de gonflement et de retrait en fonction des conditions hydriques. Ce sol nous a donc permis d'introduire le facteur de variation de l'espace poral avec l'état hydrique qui n'est généralement pas pris en compte dans l'étude des croûtes. La sensibilité de ce sol à l'action des pluies, malgré un taux d'argile moyen, peut s'expliquer par le fait que la fraction inférieure à 2 µm contiendrait moins de 50 % de phyllites, compte tenu de sa faible capacité d'échange (Souty, 1978).

Traitements

Le sol, préparé sous forme d'agrégats initiaux de 2 à 3 mm de diamètre, obtenus par broyage, est soumis à des pluies artificielles dont le dispositif est décrit dans Fiès et Panini (1995). Une masse de 400 g de sol est disposée dans un cylindre de 0,04 m^2 de section, sur une couche de sable saturée en eau et maintenue à une pression h de –0,4 m. Le sol est initialement sec afin de favoriser le phénomène d'éclatement à l'humectation (Le Bissonnais et Bruand, 1995). Afin de limiter la séparation des particules élémentaires et la formation de dépôt par sédimentation, les croûtes sont obtenues sous une succession de pluies dont la durée a été modulée pour éviter un excès d'eau superficiel. Le dispositif de pluie fournit des gouttes de 5,8 mm de diamètre. Des pluies d'intensité réglée entre 15 et 30 mm h^{-1} ont été utilisées, leur intensité est mesurée au début et à la fin de chaque pluie. La hauteur de chute, réglable de 200 à 360 cm, est maintenue constante pendant la formation d'une croûte. En se basant sur les données empiriques d'Epema et Riezebos (1983), nous avons pu déduire de la hauteur de chute la vitesse de la goutte à l'arrivée au sol et calculer l'énergie cinétique e (J m^{-2} mm^{-1}) par millimètre de pluie. Chaque croûte est alors caractérisée par l'énergie cinétique totale reçue KE (J m^{-2}), telle que :

$$KE = i \times e \times I_p \times t \qquad [1]$$

où I_p (mm s^{-1}) est l'intensité de la pluie et t (s) sa durée, i étant le nombre de pluies.

Les croûtes réalisées correspondent à 16 valeurs de KE comprises entre 70 et 340 J m^{-2}, sans répétition. La hauteur de chute de 200 cm est utilisée de 70 à 90 J m^{-2}. Ceci afin que, à même KE, les gouttes soient plus nombreuses et leur action pour former une croûte mieux répartie en surface. Pour atteindre 70 J m^{-2} ce nombre est de 3,2 gouttes cm^{-2} et aurait été de 2,5 avec la hauteur de chute de 360 cm.

Les croûtes obtenues correspondent à la transformation de plus de 90 % de la surface de 0,04 m^2 soumise à la pluie. L'épaisseur des croûtes est de l'ordre de 2 à 3 mm. La base des croûtes enrobe partiellement des agrégats encore identifiables. Pour réaliser les mesures qui sont décrites ci après, les croûtes sont découpées selon des carrés de 1,5 cm de côté environ et débarrassées au mieux des agrégats engagés à leur base. Elles ont ensuite été séchées à l'air, puis jusqu'à 105 °C pour définir l'état sec, ou humectées et amenées à différents équilibres de pression h.

Densimétrie à l'état sec et humide

Une première estimation du volume structural peut être obtenue en appliquant à la croûte l'analyse de l'espace poral proposée par Stengel (1979) pour une couche de sol. Ainsi, à l'état sec, le volume structural de la croûte V^s (cm^3 g^{-1}) est donné par la relation :

$$V^s = (1/\rho^c) - (1/\rho^t) \qquad [2]$$

dans laquelle ρ^c est la masse volumique de la croûte (g cm^{-3}), ρ^t est la masse volumique texturale (g cm^{-3}). Cette relation exprime que, pour une masse de 1 g de croûte, le volume structural est obtenu par différence entre le volume ρ^c encombré par la croûte et le volume textural $1/\rho^t$. Ce dernier représente la somme du volume des particules élémentaires et du volume de pores résultant de leur arrangement. La détermination de la masse volumique de la croûte et de la masse volumique texturale est réalisée avec la méthode densimétrique au pétrole de Monnier et al (1973). Ces auteurs ont en particulier montré que la valeur de ρ^t est donnée par la mesure de la masse volumique d'agrégats de 2 à 3 mm de diamètre. Pour le calcul de V^s, la masse et le volume de la croûte et des agrégats sont définis après séchage à 105 °C.

À l'état humide, la masse de la croûte et des agrégats est encore définie à 105 °C, mais le calcul du volume structural utilise le volume des échantillons humides portés à un même équilibre de potentiel, défini par la pression h (m). La masse volumique de la croûte est $\rho^c_{(h)}$. En particulier, la notion de masse volumique texturale doit être étendue à la masse volumique $\rho^t_{(h)}$ mesurée sur agrégats initiaux humectés (Stengel, 1979), portés à l'équilibre de potentiel h. Pour le calcul du volume structural $V^s_{(h)}$, la relation [2] devient alors :

$$V^s_{(h)} = (1/\rho^c_{(h)}) - (1/\rho^t_{(h)}) \qquad [3]$$

Puisque nous donnerons aux fragments constitutifs de la croûte la valeur de ρ^t ou de $\rho^t_{(h)}$ pour appliquer les équations [2] et [3], il sera nécessaire de vérifier que l'espace poral textural de ces fragments puisse être considéré comme indépendant de l'énergie cinétique reçue.

Remarquons que la méthode densimétrique (Monnier et al, 1973) comporte un ressuyage sur du papier Joseph pour éliminer l'excès de pétrole saturant la croûte. Ce ressuyage risque de vider les pores structuraux les plus grossiers, qui seront alors soustraits à la mesure de volume. La réalisation des mesures sur les échantillons à l'état humide est décrite au paragraphe suivant.

Rétention en eau

Les teneurs en eau mesurées à différentes pressions h fournissent une seconde possibilité de caractériser l'espace poral structural. En effet, si nous faisons l'hypothèse que la teneur en eau mesurée sur agrégats initiaux est identique à la teneur en eau propre au fragments terreux constituant la croûte, à même pression h, le volume d'eau retenu par les pores structuraux, $V^{sw}_{(h)}$ (cm3 g^{-1}), peut être calculé avec la relation :

$$V^{sw}_{(h)} = (W^c_{(h)} - W^t_{(h)})/\rho^w \qquad [4]$$

où, à une valeur de h donnée, l'eau retenue dans la croûte est $W^c_{(h)}$ (g g^{-1}) et l'eau retenue dans l'espace poral textural mesurée sur agrégats initiaux est $W^t_{(h)}$ (g g^{-1}). La masse volumique de l'eau ρ^w (g cm^{-3}) est considérée ici égale à l'unité. Dans l'équation [4], $V^{sw}_{(h)}$ représente le volume structural total si la croûte est totalement saturée à la pression h considérée. Quand la croûte n'est plus saturée, $V^{sw}_{(h)}$ représente le volume des pores structuraux qui assurent encore une rétention en eau.

Les mesures sont réalisées à des valeurs de h inférieures à zéro, afin de permettre la manipulation des échantillons. Ainsi, les échantillons initialement secs à l'air sont d'abord humectés à la pression de –0,4 m puis à pression nulle. Partant de $h = 0$, ils sont ensuite mis directement en équilibre avec les pressions de –0,1 et –0,5 m en utilisant une table de succion et avec les pressions de –1 ; –2 ; –5 et –10 m sur des plaques de Richards. Il s'agit donc d'équilibres obtenus en désorption.

Pour la densimétrie et la rétention en eau, les résultats obtenus correspondent pour l'état sec et les états humides à la moyenne de cinq mesures sur croûtes et agrégats. Pour les croûtes à l'état humide, les déterminations de masse volumique et de rétention en eau ont été réalisées sur sept croûtes différentes correspondant à 69, 77, 84, 99, 110, 210, et 341 J m^{-2}.

Porosimétrie au mercure

Sur les échantillons secs, le volume des pores peut être enfin directement mesuré par injection de mercure. La pression d'injection P (Pa) est appliquée par paliers et automatiquement accrue après que le volume injecté n'augmente plus. La courbe cumulative d'entrée de mercure, constituée de 87 points de mesure, est exprimée en fonction du diamètre D (µm) calculé avec l'équation :

$$D = 4 \times 10^6\ \Gamma \times l \cos \theta / P \qquad [5]$$

dans laquelle le mercure a une tension superficielle Γ de 0,484 N m^{-1} et un angle θ de raccordement de 130° (Fiès et Bruand, 1990). La gamme des diamètres d'accès D va de 300 µm jusqu'à la limite de 0,006 µm, le volume des pores plus petits que cette limite n'étant pas mesuré. Le volume total mesuré correspond donc au mercure introduit entre ces deux valeurs extrêmes de D. La valeur de D la plus élevée est fixée par la pression initiale que le mercure exerce en enveloppant l'échantillon. En conséquence les pores supérieurs à 300 µm seront initialement remplis de mercure et ne seront pas pris en compte dans la mesure de volume.

Le volume structural V^{sm} (cm^3 g^{-1}) mesuré en porosimétrie au mercure est obtenu avec la relation :

$$V^{sm} = V^{Tm} - V^{tm} \qquad [6]$$

où V^{Tm} est le volume total de mercure entré dans la croûte (cm^3 g^{-1}) et V^{tm} est le volume de mercure occupant les pores texturaux (cm^3 g^{-1}), jusqu'à la limite de 0,006 µm.

Il n'y a pas eu de répétition des mesures porosimétriques.

Infiltrométrie

L'infiltrabilité I est mesurée peu après la pluie, sur le sol humide, la pression h imposée à la base du dispositif étant conservée. La méthode est celle de la tache saturée (Boiffin et Monnier, 1985), où un capillaire en verre relié à une alimentation à charge contrôlée permet d'apporter l'eau par goutte à goutte. Pour un débit suffisant Q, il se forme à la surface du sol une tache d'aire S formée par une mince lame d'eau d'extension à peu près circulaire. Le régime permanent est atteint quand l'extension de la tache se stabilise, ce qui se produit en moins de 15 minutes (Shani et al, 1987). L'apport d'eau se fait dans des conditions respectant l'état de surface car la hauteur de chute des gouttes est de l'ordre du centimètre et il n'y a pas d'éclatement des fragments terreux, le sol étant initialement humide. Dans ces conditions, Boiffin et Monnier (1985) ont montré que la relation entre Q (cm^3 s^{-1}) et S (cm^2) pouvait empiriquement s'écrire, pour i mesures sur la même surface encroûtée :

$$I = 10^{-2} \times Q_{(i)} / S_{(i)} \qquad [7]$$

La valeur de I (m s^{-1}) est obtenue en calculant la pente de la relation linéaire entre les couples $Q_{(i)}$ et $S_{(i)}$ et sera appelée infiltrabilité de la croûte. La mesure est conduite en maintenant le goutte à goutte à un point fixe. Les limites d'extension des taches sont dessinées sur un feuillet de plexiglass maintenu au dessus du sol par trois points de contact. Les valeurs des surfaces obtenues après photocopie des dessins et pesées, varient de 10 à 250 cm^2. Les débits sont mesurés lors de prélèvements encadrant l'obtention d'une tache stabilisée et varient de 2 10^{-3} à 4 10^{-2} cm^3 s^{-1}.

La mesure de l'infiltrabilité a été réalisée pour 11 croûtes.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Masse volumique de la croûte

Les mesures densimétriques montrent que, sur les croûtes, les valeurs des masses volumiques varient pour ρ^c de 1,57 à 1,70 g cm^{-3} et pour $\rho^c_{(h)}$ de 1,35 à 1,40 g cm^{-3} avec h = –0,1 m, l'écart type sur cinq mesures étant de 0,006 g cm^{-3} en moyenne. Les valeurs obtenues sur agrégats sont présentées au tableau I. En particulier, la valeur de ρ^t est représentative des masse volumiques texturales mesurées sur sols à texture de limon argileux (Monnier et al, 1973).

Tableau I. Caractéristiques texturales du sol de limon argileux.

Object étudié	*Condition*	*Méthode*	*Caractéristique mesurée*	σ	*n*
Agrégat	État sec	Densimétrie	$\rho^t = 1{,}773$	0,012	16
Agrégat	$h = -0{,}1$ m	Densimétrie	$\rho^t_{(h)} = 1{,}531$	0,014	5
Agrégat	État sec	Porosimétrie	$V^{tm} = 0{,}151$	0,008	6
Croûte	État sec	Porosimétrie	$V_{(D)} = 0{,}156$	0,008	6

ρ^t; $\rho^t_{(h)}$ = masse volumique texturale (g cm^{-3}) mesurée à sec ou à la pression h, V^{tm}; $V_{(D)}$ = volume de mercure (cm^3 g^{-1}) entré dans les pores texturaux jusqu'à 0,006 µm.

La valeur de la masse volumique de la croûte tend à augmenter régulièrement avec l'énergie cinétique reçue (fig 1), qu'elle soit mesurée à l'état sec ou à l'état humide (h = –0,1 m). Dans chaque cas, la masse volumique de la croûte reste inférieure à la masse volumique texturale mesurée sur agrégats pour les deux mêmes états hydriques (tableau I). Mais la valeur la plus élevée obtenue sur croûte s'approche à 95 % environ de celle obtenue sur agrégat. Dans le calcul d'un modèle d'estimation de la masse volumique de la croûte ρ en fonction de KE, nous avons choisi la forme exponentielle donnée par l'équation 8 :

$$\rho = \rho^{ini} + (\rho^{lim} - \rho^{ini}) \times [1 - \exp(-\alpha \times KE)] \quad [8]$$

Dans cette équation, nous avons d'abord considéré que seuls la valeur initiale ρ^{ini} de la masse volumique de la croûte et le coefficient α (m^2 J^{-1}) sont des paramètres d'ajustement. Nous avons par ailleurs supposé que la valeur asymptotique ρ^{lim} vers laquelle tend la masse volumique de l'échantillon lorsque l'énergie cinétique croît indéfiniment était égale à la masse volumique texturale de l'échantillon. Pour les croûtes à l'état sec, on a donc $\rho^{lim} = \rho^t$, et, dans le cas des croûtes à l'état humide, on a alors $\rho^{lim} = \rho^t_{(h)}$.

Les résultats du calcul d'estimation des paramètres de l'équation [8] sont présentés au tableau II. Le coefficient r^2 montre que la relation choisie explique 80 % environ de la variation de la masse volumique de la croûte. Pour les valeurs des paramètres d'ajustement, on constate que le coefficient est un peu plus élevé lorsque l'ajustement au modèle est effectué sur les échantillons à l'état sec (tableau II). Ceci est dû notamment au fait que, lors du dessèchement

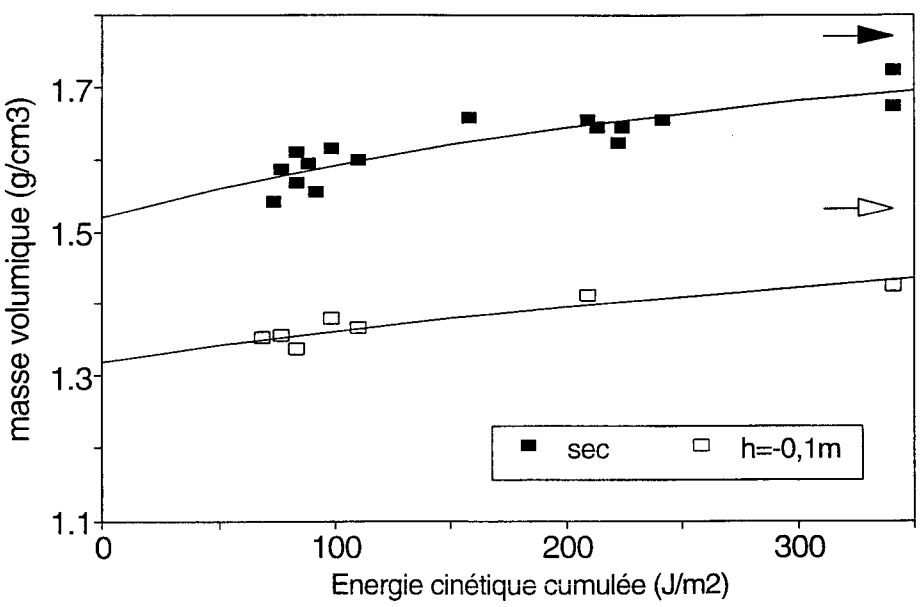

Fig 1. Évolution de la masse volumique de la croûte, mesurée à l'état sec ou à l'humidité définie à la pression h, sous l'effet de l'énergie cinétique des pluies. Les ajustements sont obtenus avec une loi exponentielle (éq [8]). La limite de l'accroissement de la masse volumique, marquée par les flèches, correspond à la masse volumique texturale.

Tableau II. Valeurs des paramètres de la relation exponentielle (éq [8]) exprimant la masse volumique de la croûte à l'état sec ou humide, en fonction de l'énergie cinétique *KE* (J m^{-2}).

État hydrique de la croûte	*Paramètres*				
	mesuré : ρ^{lim} *(g cm^{-3})*	*ajusté :* ρ^{ini} *(g cm^{-3})*	*ajusté :* α *(m^{2}J^{-1})*	r^2	n
Sec	$\rho^{lim} = \rho^t = 1{,}773$	1,520	3,34 x 10^{-3}	0,78	6
$h = -0{,}1$ m	$\rho^{lim} = \rho^t_{(h)} = 1{,}531$	1,320	2,22 x 10^{-3}	0,86	7

ρ^{lim} = limite supérieure de la masse volumique de la croûte; ρ^t ; $\rho^t_{(h)}$ = masse volumique texturale mesurée à sec ou à la pression *h*, constantes d'ajustement = α ; ρ^{ini} masse volumique initiale de la croûte.

des échantillons, on observe un accroissement systématique de la masse volumique. Dans ce cas, la courbe ajustée pour ces états secs est nécessairement située au dessus de celle ajustée pour les échantillons humides. Par ailleurs, l'accroissement de masse volumique à la dessiccation est d'autant plus important que la masse volumique initiale de l'échantillon est élevée, ce qui contribue encore à augmenter la valeur de α. Ainsi, l'accroissement de la masse volumique à la dessiccation est de 17 % sur les croûtes les moins denses et atteint 25 % sur les plus denses. Ce comportement rejoint celui observé par Curmi (1988) entre motte tassée ou non tassée.

Plus généralement, l'accroissement de la masse volumique des croûtes sous l'action de compactage par les pluies avait déjà été mis en évidence entre autre par Bedaiwy et Rolston (1993). L'utilisation de la référence texturale permet ici d'indiquer la limite de cette tendance pour une croûte structurale d'un sol donné. Nous avons d'ailleurs ensuite recherché la valeur de ρ^{lim} fournie directement par l'ajustement à la relation [8] quand cette valeur n'est pas définie a priori. Sans améliorer la qualité de l'ajustement, nous avons ainsi obtenu les valeurs de 1,85 pour l'état sec et 1,44 pour l'état humide. Ces valeurs ajustées restent proches des valeurs texturales de 1,77 et 1,53 mesurées pour les états sec et humide (tableau I).

Volume structural des croûtes à l'état sec

Pour le calcul du volume structural des croûtes, la valeur de V^{tm} qui intervient dans l'équation 6 pour représenter le volume des pores texturaux occupés par le mercure, a été mesurée sur les agrégats initiaux. Lors de la mesure, l'empilement des agrégats crée un espace poral dont le volume correspond au mercure injecté par des pores tels que $D \geq 25$ µm (Fiès et Bruand, 1990). La valeur de V^{tm} (tableau I) a donc été obtenue en déduisant du volume total injecté dans les agrégats le volume fictif créé par leur empilement.

D'autre part, dans un système poreux formé de fragments, les espaces structural et textural peuvent se confondre au moins en partie lors d'un tassement (Cousin et al, 1994). Avant de calculer le volume structural, nous avons vérifié que l'espace textural reste distinct de l'espace structural et indépendant de *KE,* dans les croûtes étudiées. Pour cela, nous avons comparé les courbes porosimétriques obtenues sur croûte après les avoir translatées (fig 2). L'indépendance entre les deux espaces poraux peut alors être vérifiée en contrôlant que les courbes cumulatives obtenues sur croûte coïncident seulement dans la gamme des pores texturaux. Nous avons d'abord imposé la coïncidence des seules valeurs de V^{Tm} avec la plus grande, soit V^{Tm}_{max}, pour pouvoir ensuite observer jusqu'à quelle valeur de *D* il y a coïncidence des courbes. Pour comparer *i* courbes, cela revient à translater chaque valeur $V^{Tm}_{(i)}$ d'une valeur constante $a_{(i)}$ telle que :

$$V^{Tm}_{max} = V^{Tm}_{(i)} + a_{(i)} \qquad [9]$$

Chacun des points de la courbe cumulative *i* est ensuite translaté de la valeur $a_{(i)}$ correspondante.

Les courbes obtenues coïncident jusqu'à une valeur commune de *D* voisine de 3 µm (fig 2). Le léger décalage observé pour les courbes corres-

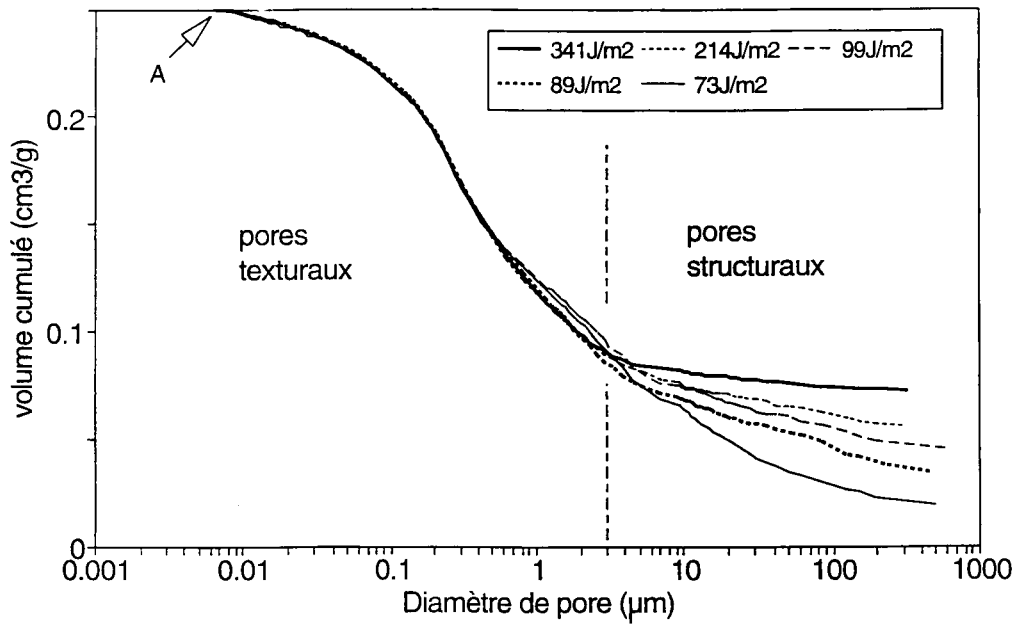

Fig 2. Courbes cumulatives d'entrée de mercure obtenues sur croûtes formées avec les énergies cinétiques de pluie indiquées en paramètre. Les courbes ont été translatées pour être confondues en A. Ceci met en évidence la permanence des pores texturaux propres au sol de limon argileux et la réduction des pores structuraux, quand l'énergie cinétique des pluies s'accroît.

pondant à 73 et 99 J m^{-2} indiquerait la présence de pores structuraux occlus dans l'espace textural (Cousin et al, 1994).

Le volume de mercure $V_{(D)}$ occupant sur les croûtes des pores égaux ou inférieurs à la valeur commune de D est très voisin du volume V^{tm} défini sur les agrégats initiaux (tableau I). Le domaine de coïncidence des courbes correspond donc essentiellement au seul espace textural. Cet espace textural apparaît donc indépendant de la valeur de *KE*. Seul l'espace structural est affecté par l'action des gouttes de pluie. Ce résultat valide l'utilisation des équations [2], [3], [4] et [6], toutes basées sur la constance de l'espace poral textural.

Les valeurs de V^{sm} et V^{s} (éqs [6], [2]) se situent entre 0,03 et 0,09 cm^3 g^{-1} et plus de la moitié des valeurs de V^{sm} s'accordent à celles de V^{s} à ± 0,005 cm^3 g^{-1}. La corrélation entre les deux types d'estimation est assez étroite, comme le montre le tableau III. Les valeurs de la pente et de l'ordonnée suggèrent que les pores structuraux grossiers ont plus de chance d'être mesurés en porosimétrie, mais qu'ils échappent à la mesure porosimétrique comme à la mesure volumétrique dans les croûtes les moins denses, où ces pores pourraient atteindre des dimensions importantes. L'écart maximal observé en faveur de V^{sm} est un peu supérieur à 0,01 cm^3 g^{-1}. Cette comparaison suggère que les deux méthodes sont voisines et que la porosimétrie permet de mesurer des volumes liés à des pores un peu plus grossiers. Dans les deux cas, le volume structural risque d'être d'autant plus sous-estimé que la masse volumique est faible et que la croûte risque alors de présenter des pores grossiers.

Volume structural des croûtes à l'état humide

Pour comparer les volumes structuraux obtenus d'une part avec la méthode de rétention en eau et d'autre part avec la méthode de densimétrie, il est d'abord nécessaire d'étudier le taux de satu-

Tableau III. Comparaison des valeurs du volume structural des croûtes fournies par les différentes méthodes utilisées, à l'état sec et à l'état humide.

État de la croûte	*Méthodes comparées*	*Régressions*	r^2	n
Sec	Porosimétrie et densimétrie	$V^{sm} = 0{,}809 \times V^{s} + 0{,}013$	0,89	15
$h = -0{,}1$ m	Rétention en eau et densimétrie	$V^{sw}_{(h)} = 0{,}879 \times V^{s}_{(h)} + 0{,}027$	0,74	7

Volume structural (cm^3 g^{-1}) = V^{sm}, V^{s} (éqs [6], [2]); $V^{sw}_{(h)}$, $V^{s}_{(h)}$ (éqs [4], [3]).

ration des croûtes et agrégats humides, puisque leur teneur en eau détermine le volume structural quand il est calculé avec l'équation [4]. Dans l'intervalle $-0,1$ m $\leq h \leq -10$ m, les agrégats initiaux ne sont pas saturés en eau, mais leur taux de saturation est égal à 87,6 ± 0,6 %. Nous avons donc admis que les agrégats présentent une teneur en air piégé sensiblement constante et nous avons aussi admis qu'il en était de même pour les fragments terreux constituant les croûtes.

Sur les croûtes, quand $h = -0,1$ m, la moyenne du taux de saturation en eau est de 94 % mais s'élève à 108 % si l'on déduit du volume poral total un volume d'air piégé dans les fragments terreux égal à celui mesuré sur les agrégats. Malgré cette imprécision, nous avons alors considéré les croûtes comme étant saturées. Comme le taux de saturation s'abaisse ensuite avec h, nous avons limité le calcul du volume structural total avec l'équation [4] à la seule condition de pression $h = -0,1$ m. Le calcul de la corrélation entre $V^s_{(h)}$ (éq [3]) et $V^{sw}_{(h)}$ (éq [4]), fournit dans ce cas une valeur de r^2 de 0,74 (tableau III). Les deux modes d'évaluation du volume structural à l'état humide présentent donc une correspondance encore étroite. Nous avons par ailleurs vérifié que pour les échantillons correspondant aux équilibres allant de -1 m, à -10 m, la valeur de r^2 décroît, passant de 0,5 à 0,2. Ceci peut s'interpréter par le fait que la corrélation porte alors sur des objets différents, l'un ($V^s_{(h)}$) correspondant bien à un volume structural total, l'autre ($V^{sw}_{(h)}$) prenant la signification d'une mesure des seuls pores structuraux retenant de l'eau pour $h < -0,1$ m.

Enfin, pour $h = -0,1$ m, les valeurs fournies par l'équation [4] sont les plus fortes, la moyenne des valeurs étant de 0,092 cm^3 g pour $V^{sw}_{(h)}$ et de 0,073 cm^3 g^{-1} pour $V^s_{(h)}$. Cet écart s'explique peut être par le protocole suivi pour les mesures d'humidité et de volume. L'échantillon d'abord placé dans une boîte à tare pour définir sa masse humide, en est extrait pour la mesure de volume et enfin remis dans la même boîte pour définir sa masse sèche. L'eau contenue dans l'échantillon pourrait alors s'être déposée aux points de contact entre l'échantillon et la boîte avant la mesure de volume. Cela ne cause pas d'erreur sur la mesure de teneur en eau, la boîte étant conservée fermée entre les manipulations mais peut entraîner la sous estimation de volume mesuré et en définitive celle du volume massique $1/\rho^c_{(h)}$. Il s'ensuit que le volume structural $V^s_{(h)}$ (éq [3]) pourrait être sous-estimé.

En considérant maintenant la propriété de rétention en eau des croûtes, l'évolution du volume d'eau retenu par les pores structuraux $V^{sw}_{(h)}$ (éq [4]) à différentes valeurs de h permet de préciser l'évolution du volume structural avec l'énergie cinétique reçue par la croûte. D'après les lois de la capillarité en effet, les pores qui retiennent l'eau ont des diamètres d'autant plus élevé que h est proche de zéro. La distribution des points (fig 3) suggère que la décroissance du volume structural sous l'effet de KE est surtout visible

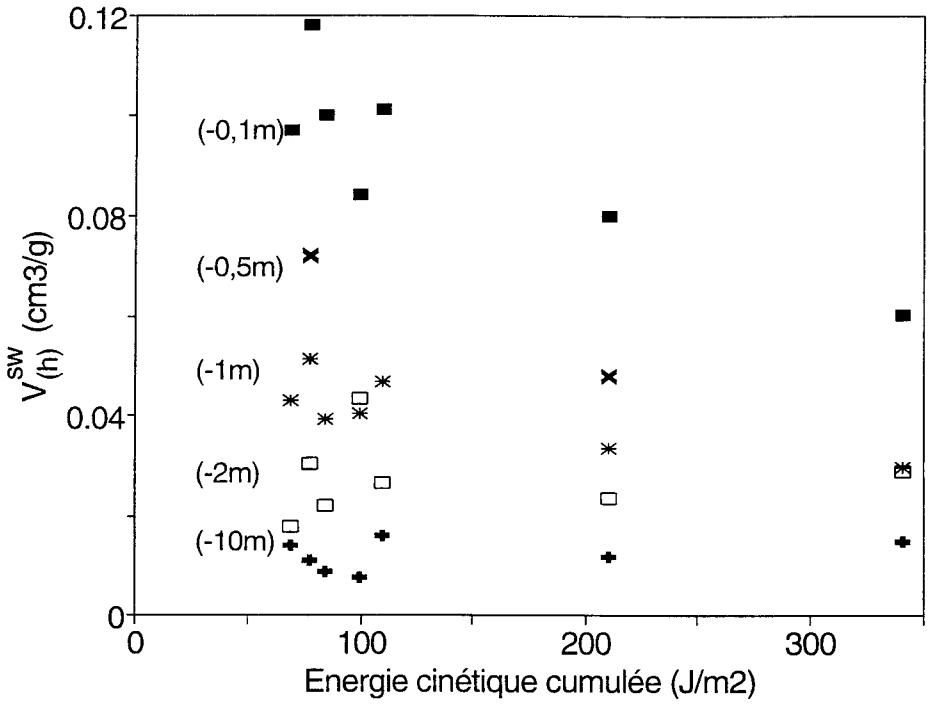

Fig 3. Évolution du volume des pores structuraux (éq [4]) retenant l'eau à la pression h indiquée en paramètre, en fonction de l'énergie cinétique des pluies reçue par les croûtes.

pour $h \geq -2$ m. Ainsi, l'action des pluies affecte, semble-t-il, les pores structuraux les plus grossiers. Pour $h \leq -2$ m, la relative constance de $V^{sw}{}_{(h)}$ indique qu'il n'y a plus d'effet sensible de la pluie. Mais le fait que les valeurs de $V^{sw}{}_{(h)}$ ne soient pas nulles montre ici encore la persistance d'un espace poral structural jusque dans les croûtes formées avec le maximum de l'énergie cinétique apportée dans nos essais.

Tassement des croûtes et infiltrabilité

Pour l'ensemble des mesures d'infiltrabilité, une relation linéaire entre débit du goutte à goutte et surface de la tache (éq [7]) a bien été observée (fig 4), le coefficient de détermination restant compris entre 0,95 et 0,99 pour un nombre moyen de quatre répétitions. On peut constater qu'à même valeur de débit la surface nécessaire au transfert de l'eau augmente avec *KE* (fig 4).

Pour vérifier tout d'abord que le volume structural que nous avons mesuré est une variable traduisant l'effet de tassement par les pluies, nous avons utilisé à nouveau une relation exponentielle :

$$\hat{V} = V^{ini} - (V^{ini} - V^{lim}) \times [1 - \exp(-\alpha \times KE)] \quad [10]$$

où le volume structural estimé $\hat{V}$ est calculé en fonction de *KE* (J m^{-2}) avec trois paramètres : le volume structural initial V^{ini}, sa valeur limite V^{lim} et un coefficient α. Les résultats du calcul de l'estimation de ces trois paramètres sont présentés au tableau IV. D'une manière générale, la relation 10 permet de prévoir de 60 à 90 % des valeurs observées du volume structural, la prévision des valeurs fournies par la porosimétrie s'avérant la moins bonne (r^2 = 0,62). Ces résultats montrent que le volume structural est bien une fonction décroissante de *KE*.

L'examen des valeurs obtenues pour les paramètres montre que ce sont surtout les valeurs de V^{ini} qui varient en fonction de l'état hydrique. Elles sont plus élevées pour l'état humide, le volume structural humide étant supérieur à celui mesuré à sec, à même valeur de *KE*. Ainsi entre les états sec et humide, l'accroissement du volume structural d'un même échantillon de croûte relativement à son volume structural sec est, de l'ordre de 20 % quand le volume structural humide est obtenu par densimétrie (éq [3]), de l'ordre de 50 % quand il est obtenu par rétention en eau (éq [4]). Ce résultat est dû au fait que nos conditions de mesure permettent un gonflement des échantillons de croûte sans contrainte. Dans le cas contraire, l'espace poral structural aurait diminué sous le seul effet du gonflement des fragments constitutifs.

Par ailleurs, les valeurs obtenues pour V^{lim}, qui devraient être voisines de zéro, sont généralement faibles, en particulier dans le cas des ajustements utilisant les valeurs de V^{sm} et $V^{sw}{}_{(h)}$ (tableau IV).

En ce qui concerne maintenant l'infiltrabilité, les valeurs obtenues pour *I* passent de 9 10^{-6} à 3 10^{-7} m s^{-1} ce qui représente une réduction par un facteur 10, quand le volume structural est réduit d'un facteur 2,5 environ. Pour mettre en évidence l'influence du volume poral structural sur l'infitrabilité des croûtes, nous avons choisi d'utiliser l'équation de Kozeny (1927). Dans cette relation l'espace poral est exprimé en termes de porosité. En posant que la porosité structurale *n* est la composante principale de l'écoulement

Tableau IV. Valeurs des paramètres de la relation exponentielle (éq [10]) exprimant le volume structural de la croûte à l'état sec ou humide en fonction de l'énergie cinétique *KE* (J m^{-2}).

État hydrique de la croûte	*Méthode d'obtention du volume structural*	*Paramètres ajusté : V^{lim} (cm^3 g^{-1})*	*ajusté : V^{ini} (cm^3 g^{-1})*	*ajusté : α (m^{2}J^{-1})*	r^2	n
Sec	Densimétrie (éq [2])	0,01	0,098	5 x 10^{-3}	0,78	6
Sec	Porosimétrie (éq [6])	0,3 x 10^{-6}	0,084	3 x 10^{-3}	0,62	6
h = –0,1 m	Densimétrie (éq [3])	0,03	0,119	6 x 10^{-3}	0,91	7
h = –0,1 m	Rétention en eau (éq [4])	0,1 x 10^{-3}	0,119	2 x 10^{-3}	0,75	7

Constantes d'ajustement = α ; V^{lim} volume structural limite ; V^{ini} volume structural initial.

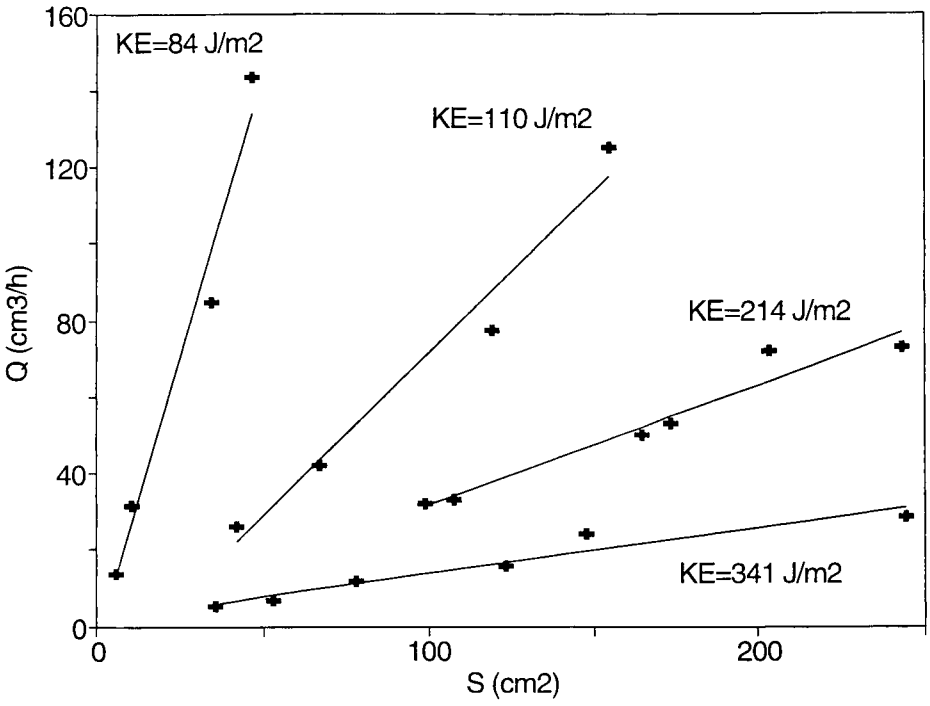

Fig 4. Infiltrométrie goutte à goutte. Exemples des relations linéaires (éq [7]) obtenues entre le débit du goutteur et la surface de la tache saturée, pour des croûtes formées sous différentes pluies. La pente se réduit quand l'énergie cinétique des pluies *KE* augmente.

(Coulon, 1988) et en admettant que *I* est voisin d'une conductivité à saturation, cette équation s'écrit :

$$I = a \times [n^3 / (1 - n)^2] + b \qquad [11]$$

La porosité structurale s'obtient par le produit du volume structural de la croûte ($cm^3\ g^{-1}$) par sa masse volumique ($g\ cm^{-3}$). Pour les croûtes à l'état sec, nous avons posé que $n = n^s$, porosité structurale calculée avec l'ensemble regroupé des valeurs de V^s et V^{sm} (éqs [2], [6]). À l'état humide, nous avons $n = n^s_{(h)}$, porosité calculée avec $V^s_{(h)}$ et $V^{sw}_{(h)}$ pour $h = -0{,}1$ m (éqs [3], [4]). Dans l'équation [11], le coefficient *a* intègre des caractéristiques de forme et de surface de l'espace poral. L'ordonnée à l'origine *b* représente la limite vers laquelle tend *I* quand la porosité structurale tend vers zéro.

La représentation graphique de *I* en fonction du terme $n^3 / (1-n)^2$ (fig 5) montre que l'équation de Kozeny rend assez bien compte de la relation entre infiltrabilité et porosité structurale. Cependant, la relation obtenue pour l'état sec est distincte de celle obtenue pour l'état humide. Les coefficients de la relation [11] (tableau V) diffèrent selon l'état hydrique. Ce résultat est bien en accord avec le fait qu'il s'agit d'un sol dont le volume augmente avec l'état hydrique, où la porosité structurale est plus forte quand elle est mesurée à l'état humide. On peut supposer alors que les caractéristiques de l'espace poral structural sont modifiées avec la teneur en eau.

Cependant, la corrélation est plus élevée à l'état sec ($r^2 = 0{,}73$) qu'à l'état humide ($r^2 = 0{,}39$). Il semble que, dans leur relation avec *I*, les valeurs de $V^{sw}_{(h)}$ présentent une plus grande dispersion que celles de $V^s_{(h)}$ (fig 5). En effet, en ne tenant compte que des valeurs de $V^s_{(h)}$ pour le calcul des porosité structurales, nous avons obtenu avec l'équation [11] une corrélation élevée ($r^2 = 0{,}78$). Au contraire, l'utilisation des seules valeurs de $V^{sw}_{(h)}$ dans le calcul des porosités structurales conduit à une corrélation faible ($r^2 = 0{,}33$).

Ces résultats suggèrent qu'une relation entre *I* et *n* établie avec des mesures de porosité structurale à l'état sec pourra être plus précise. Mais ils permettent d'avancer que, en dehors du cas des sols peu ou non gonflants, les paramètres de la relation varieront avec la capacité de retrait du sol et, en premier lieu, sa teneur en argile. De ce point de vue, une relation établie avec une porosité structurale mesurée à l'état humide aura un caractère plus généralisable, dans la mesure où l'on peut admettre que la valeur de la porosité structurale est aussi un indicateur de la continuité des pores dans la croûte.

CONCLUSION

Ce travail montre que l'action des gouttes de pluie à l'origine d'une croûte structurale ne modifie pas l'espace poral textural. C'est l'espace

Tableau V. Relation entre l'infiltrabilité I (m s^{-1}) et la porosité structurale des croûtes à l'état sec ou humide. Ajustement à la relation de Kozeny (éq [11]).

Etat de la croûte	*Relation obtenue*		r^2	n
Sec	$I = 3{,}8\ 10^{-3}\ (n^s)^3/(1-n^s)^2$	$+0{,}1\ 10^{-7}$	0,73	18
$h = -0{,}1$ m	$I = 1{,}6\ 10^{-3}\ (n^s_{(h)})^3/(1-n^s_{(h)})^2$	$+3{,}6\ 10^{-7}$	0,39	112

n^s = porosité structurale calculée avec V^s, V^{sm} (éqs [2], [6]) et ρ^c, $n^s_{(h)}$ = porosité structurale calculée avec $V^s_{(h)}$, $V^{sw}_{(h)}$ (éqs [3], [4]) et $\rho^c_{(h)}$.

poral structural qui subit un tassement. En ce sens le schéma d'évolution des croûtes, par tassement de fragments jusqu'à obtention de la masse volumique texturale, proposé par Boiffin et Monnier (1985) est conforté. Cependant cette évolution des croûtes en sol cultivé ne saurait s'appliquer quand la séparation des constituants se produit, comme dans les croûtes de dépôt, et n'est propre qu'aux croûtes structurales. Ainsi, le comportement du sol limono-argileux utilisé ici est intermédiaire entre ceux des sols limoneux et argilo-limoneux, car la croûte obtenue présente des pores structuraux à la fois interconnectés et saturés pour assurer le transfert de l'eau sous pluie (Fiès et Panini, 1995).

La caractérisation de l'espace poral de la croûte à des états hydriques très contrastés et par des méthodes indépendantes, aboutit à des résultats très cohérents, tant pour l'ordre de grandeur du volume structural que pour l'évolution de ce volume avec l'énergie cinétique des pluies et sa relation avec l'infiltrabilité. Toutefois cette caractérisation a été facilitée par le fait que les croûtes obtenues présentaient une limite claire entre espace textural et structural, ce qui n'est pas toujours le cas (Cousin et al, 1994).

Bien que cette étude ait montré l'intérêt d'une quantification de la porosité structurale pour étudier ses conséquences sur l'infiltrabilité, il ne faut pas perdre de vue que les méthodes utilisées (densimétrie, porosimétrie et rétention en eau) risquent toujours de sous-estimer la porosité structurale et ceci d'autant plus qu'elle est composée de pores de grandes taille et qu'elle joue un rôle prépondérant sur l'infiltrabilité. À cet égard, les croûtes de sol constituent un milieu

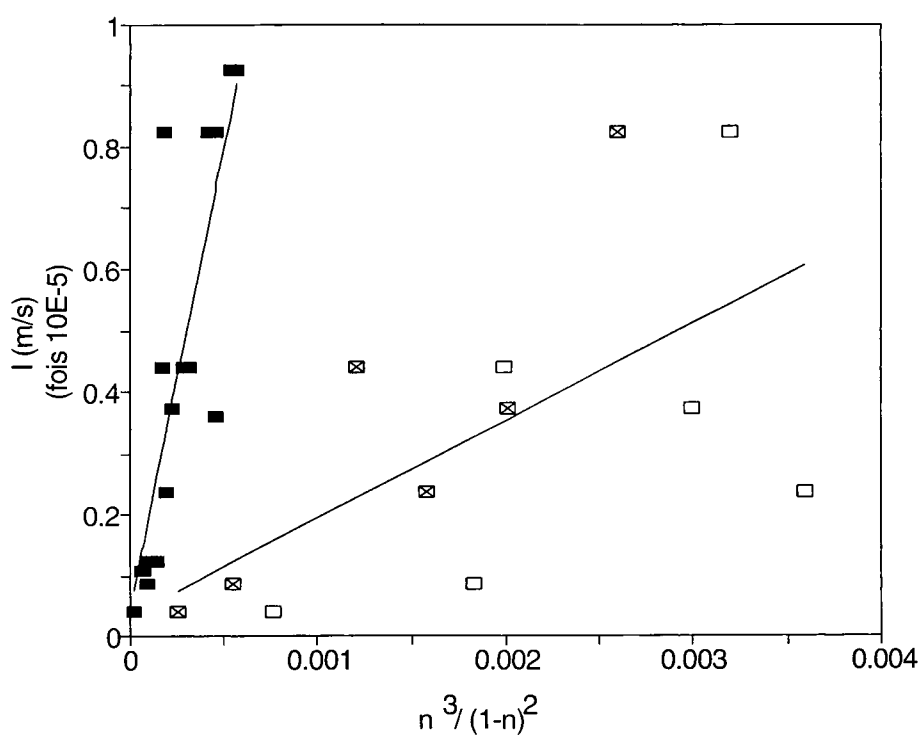

Fig 5. Mise en évidence du rôle de l'espace poral structural des croûtes sur leur infiltrabilité, en utilisant la relation de Kozeny (éq [11]). Le terme n représente la porosité structurale. Carré plein = n calculé pour l'état sec avec V^s, V^{sm} (éqs [2], [6]) et ρ^c. Carré vide = n calculé pour $h = -0{,}1$ m avec $V^s_{(h)}$ (éq [3]) et $\rho^c_{(h)}$. Carré coché = n calculé pour $h = -0{,}1$ m avec $V^{sw}_{(h)}$ (éq [4]) et $\rho^c_{(h)}$.

poreux difficile à caractériser car les méthodes doivent être adaptées à l'échelle de l'organisation des croûtes. Il semble que l'analyse d'image et la radiographie de sections (Bresson et al, 1996) puissent constituer des méthodes de quantification de l'espace poral des croûtes prometteuses, limitées toutefois à l'état sec.

La méthode de la tache saturée, pratiquée sur sol humide, apparaît un moyen efficace et peu perturbateur du système mesuré, de suivre l'évolution des propriétés hydrodynamiques de la croûte au travers d'un test d'infiltrabilité. Les résultats obtenus soulignent la nécessité de prendre en compte l'évolution de l'état physique de la croûte avec la pluie pour la compréhension du comportement hydraulique d'une surface de sol.

L'espace poral du sol et des croûtes reste le plus souvent quantifié de manière satisfaisante et relativement facilement à l'état sec. Cependant il faut noter qu'une relation établie sur cette base avec un fonctionnement hydrique ne peut être considérée comme causale dès lors que la géométrie du système varie avec son état hydrique.

REMERCIEMENTS

L'ensemble des expériences et mesures a été réalisé avec la collaboration de C Jeandet.

RÉFÉRENCES

Bedaiwy MN, Rolston DE (1993) Soil surface densification under simulated high intensity rainfall. *Soil Tech* 6, 365-376

Boiffin J, Monnier G (1985) Infiltration rate as affected by soil surface crusting caused by rainfall. In : *Assessment of Soil Surface Crusting. Proc Symposium ISSS AISS IBG Ghent 1985* (F Callebaut, D Gabriels, M De Boodt, eds), State University of Ghent, Gand, Belgique, 210-217

Bresson LM, Boiffin J (1990) Morphological characterisation of soil crust development stages on an experimental field. *Geoderma* 47, 301-325

Bresson LM, Moran CJ, Assouline S (1996) Méthode d'analyse quantitative de la densité par radiographie X. Application au modèle d'infiltration des croûtes de battance de Mualem et Assouline : résultats préliminaires. In : *Actes des 5es Journées nationales de l'étude des sols AFES Rennes (F) 1996* (C Walter, C Cheverry, eds), Ensa-Inra Rennes, 237-239

Coulon E (1988) Conséquences du tassement sur l'organisation de l'espace poral des sols sableux. Contribution à la connaissance des mécanismes de compactage. Thèse, université d'Orléans, 183 p

Curmi P (1988) Structure, espace poral du sol et fonctionnement hydrique. Analyse de quelques cas concrets. *Sci Sol* 26, 203-214

Cousin I, Le Lay C, Bruand A (1994) Évolution de la porosité et formation de pores structuraux reliques dans un sol argilo-limoneux soumis à un compactage. *C R Acad Sci Ser II* 319, 797-804

Epema GF, Riezebos HT (1983) Fall velocity of waterdrops at different heights as a factor influencing erosivity of simulated rain. In : *Rainfall Simulation, Runoff and Soil Erosion. Catena Supplement 4* (de Ploey, ed), Braunschweig, 1-16.

Ewing RP, Gupta SC (1994) Pore-scale network modeling of compaction and filtration during surface sealing. *Soil Sci Soc Am J* 58, 712-720

Fiès JC, Bruand A (1990) Textural porosity analysis of a silty clay soil using pore volume balance estimation, mercury porosimetry and quantified backscattered electron scanning image (BESI). *Geoderma* 47, 209-219

Fiès JC, Panini T (1995) Infiltrabilité et caractéristiques physiques de croûtes formées sur massifs d'agrégats initialement secs ou humides soumis à des pluies simulées. *agronomie* 15, 205-220

Kozeny J (1927) Über kapillare Leitung des Wassers IM Boden (Aufstieg, Versickerung und Anwendung auf die Bewässerung). *S B Akad Wiss Wien* 136a, 271-306

Le Bissonnais Y, Bruand A, Jamagne M (1989) Laboratory experimental study of soil crusting : Relation between aggregate breakdown mechanisms and crust structure. *Catena* 16, 377-392

Le Bissonnais Y, Bruand A (1995) Relationship between aggregate breakdown, crust structure and interrill erosion. In : *Sealing, Crusting and Hardsetting Soils : Productivity and Conservation. Proc 2nd Symposium ISSCHS (Aus) 1994* (HB So, GD Smith, SR Raine, BM Schafer, RJ Loch, eds), University of Queensland, Brisbane, Australie, 133-138

Monnier G, Stengel P, Fiès JC (1973) Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol. *Ann Agron* 24, 533-545

Richard G, Guérif J (1988) Modélisation des transferts gazeux dans le lit de semence : application au diagnostic des conditions d'hypoxie des semences de betterave sucrière (*Beta vulgaris* L) pendant la germination. II. Résultats des simulations. *agronomie* 8, 639-646

Römkens MJM, Prasad SN, Whisler FD (1990) Surface sealing and infiltration. In : *Process Studies in Hillslope Hydrology* (MG Anderson, TP Burt, eds), John Willey and Sons, Chichester, Royaume-Uni, 127-172

Roth CH, Eggert T (1994) Mechanisms of aggregate breakdown involved in surface sealing, runoff generation and sediment concentration on loess soil. *Soil Tillage Res* 32, 253-268

Shani U, Hanks RJ, Bresler E, Oliveira CAS (1987) Field method for estimating hydraulic conductivity and matric potential-water content relations. *Soil Sci Soc Am J* 51, 298-302

Sharpley AN, Chapra SC, Wedepohl R, Sims JT, Daniel TC, Reddy KR (1994) Managing agricultural phosphorus for protection of surface waters : issues and options. *J Environ Qual* 23, 437-451

Souty N (1978) Première contribution à l'étude des propriétés physiques et mécaniques particulières de sols calcaires. *Ann Agron* 29, 421-438

Souty N, Rode C (1994) La levée des plantules au champ : un problème de mécanique ? *Sécheresse* 5, 13-22

Stengel P (1979) Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol in situ. *Ann Agron* 30, 27-51

Valentin C, Bresson LM (1992) Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils. *Geoderma* 55, 225-245