

Infiltrabilité d'un sol ferrugineux tropical lessivé sous monoculture intensive de sorgho : modifications du système poral

B. OUATTARA*
M.P. SÉDOGO*
A. ASSA**
F. LOMPO*
K. OUATTARA***

Résumé

L'infiltrométrie de type Müntz a été utilisée pour caractériser les modifications du système poral d'un sol ferrugineux tropical lessivé du plateau central du Burkina soumis à différents modes de gestion de sa fertilité, sous monoculture de sorgho.

Les résultats montrent que les valeurs des paramètres caractéristiques de l'infiltration du sol (sorptivité capillaire et conductivité hydraulique) baissent avec la durée de mise en culture du sol, quelles que soient la nature et l'intensité des pratiques culturales. Ce phénomène est encore accentué sur les parcelles labourées sans apports organiques.

Toutefois, le labour à plat permet d'améliorer la sorptivité capillaire comparativement au non travail du sol. Les matières organiques quant à elles modifient d'autant plus favorablement le pouvoir de conduction hydraulique du sol qu'elles sont bien décomposées. Ces modifications semblent notamment porter sur la fraction texturale de la porosité du sol quelle que soit l'échelle de caractérisation de celle-ci. C'est en effet la porosité texturale qui explique, mieux que la composante structurale de l'espace poral du sol, les variations de la conductivité hydraulique du sol en saturé.

Mots-clés : infiltrométrie Müntz, conductivité hydraulique, sorptivité capillaire, porosité, labour, matières organiques, jachère, Burkina Faso.

Infiltrability of a leached ferruginous tropical soil under continuous and intensive sorghum cultivation - modification of the poral system

Abstract

Müntz infiltrometry was used to characterise tropical leached ferruginous soil in central plateau of Burkina, under different fertility management and continuous sorghum cultivation.

The results show that the values of soil infiltration parameters (capillary sorptivity and hydraulic conductivity) decrease according to the duration of soil cultivation, whatever the nature and intensity of cultural practices. This phenomenon is more marked in ploughed plots that have not received organic matter. However, moldboard ploughing, compared to no-tillage, brings an increase in capillary sorptivity.

Incorporations of organic matter affect positively soil hydraulic conductivity as much as they are well decayed. These modifications appear to concern mostly the textural fraction of soil porosity regardless of the characterization scale. This porosity system explains better the variations of hydraulic conductivity in saturated soil than the structural component of soil porosity.

Key words: Müntz infiltrometry, hydraulic conductivity, capillary sorptivity, porosity, ploughing, organic matter, fallow, Burkina Faso.

*INERA, Station de Kamboinsé, 01 B.P. 476, Ouagadougou 01, Burkina Faso

**FAST, Université Nationale de Côte d'Ivoire, B.P. 582, Abidjan

***INERA, Station de Saria, B.P. 10, Koudougou, Burkina Faso

Introduction

Les sols agricoles à sesquioxydes de fer des zones semi-arides de l'Afrique intertropicale présentent généralement des horizons de surface de texture sableuse à sablo-argileuse. Leur faible teneur en matières organiques (< 2 %) et la nette prédominance des argiles peu gonflantes (kaolinite) dans leur fraction argileuse font que ces sols sont naturellement sujets à l'encroûtement superficiel et au phénomène de la prise en masse lorsqu'ils sont secs (NICOU, 1975 ; HOOGMOED, 1994).

De l'ensemble de ces contraintes physico-chimiques, découle pour les sols cultivés, la double conséquence agronomique suivante :

- faible capacité de structuration de ces sols, ce qui leur donne une faible porosité (SARR, 1981 ; OUATTARA, 1994)

- modifications importantes des caractéristiques hydrodynamiques du sol qui diminuent sa capacité d'infiltration en faveur du ruissellement superficiel et de l'érosion hydrique (HOOGMOED et STROOSNIJDER, 1984 ; SOMÉ et OUATTARA, 1991).

Ainsi ces sols, peu favorables au stockage de l'eau, sont incapables d'offrir aux cultures pluviales un volant hydrique suffisant pour tamponner les effets néfastes des aléas climatiques. Pour éviter cela, différentes techniques culturales associant le travail du sol et la fertilisation organo-minérale sont couramment recommandées (LAL, 1986 ; SÉDOGO, 1993 ; OUATTARA *et al.*, 1994 ; SÉDOGO *et al.*, 1994), techniques qui devraient, entre autres, contribuer à améliorer les caractéristiques hydrodynamiques du sol.

Le présent article se propose de caractériser, par infiltrométrie, l'évolution temporelle du système poral d'un sol ferrugineux tropical soumis à une monoculture de sorgho en fonction de différentes techniques culturales et de différentes durées de culture.

Matériels et méthodes

Description des supports expérimentaux

L'étude a été menée dans la station de recherches agricoles de Saria, située sur le plateau central du Burkina Faso. Elle comporte trois types d'essais expérimentaux, d'âge de culture différent, associant le type de travail du sol à plusieurs doses de fumures minérales et de matières organiques de différentes sources. Le tableau I récapitule les doses des fumures apportées sur les différents essais ainsi que leurs âges de mise en culture.

Les labours sont réalisés au tracteur sur l'Essai Entretien de la Fertilité (EEF) et l'Essai Etude Comparative des amendements organiques (EEC) et aux boeufs sur l'Essai Etude physique des sols agricoles (EEP). La profondeur moyenne des labours est de 15 à 20 centimètres. Les apports de matière organique se font annuellement sur EEC et EEP et tous les deux ans sur EEF. Une jachère naturelle âgée de plus de trente ans, à peuplement monospécifique d'*Andropogon gayanus*, sert de témoin à l'étude. Selon leur état plus ou moins avancé de décomposition, les substrats organiques utilisés se classent comme suit : fumier, compost aérobie, compost anaérobie, paille.

Tableau I. Protocole expérimental des différents essais

	Durée de mise en culture (années)	Fumier (T/ha)	Engrais NPK (kg/ha)	Nombre de mesures
Essai entretien de la fertilité (EEF)	33			
Labour		0	0	10
Labour + fumier		40T/ha/2an	60-23-44	10
Labour + restitution paille		Restitution	37-23-14	10
Essai étude comparative des amendements organiques (EEC)	13			
Labour		0	60-30-30	10
Labour + paille		10T/ha/an	60-30-30	10
Labour + compost anaérobie		10T/ha/an	60-30-30	10
Labour + compost aérobie		10T/ha/an	60-30-30	10
Labour + fumier		10T/ha/an	60-30-30	10
Essai étude physique (EEP)	3			
Sans labour		0	37-23-14	8
Sans labour+fumier		10T/ha/an	37-23-14	8
Labour		0	37-23-14	8
Labour + fumier		10T/ha/an	37-23-14	8

Les sols

Les trois essais ont été réalisés sur un même type de sol ; ils sont localisés en bordure inférieure du bas de versant. Le sol est issu d'une roche granitique calco-alkaline, plus ou moins migmatisée. Il s'agit d'un sol ferrugineux tropical lessivé, à concrétions, induré. La profondeur de sol utile varie entre 0,6 et 1 m. De texture limono-sableuse à sablo-argileuse en surface (0 - 20 cm), la teneur en matière organique est inférieure à 1 %. Le complexe absorbant est pratiquement désaturé, avec un taux de saturation de 57 %.

Caractérisation du système poral du sol

Le système poral du sol a été quantifié selon le modèle défini par CHILDS (1969) et adopté par STENGEL (1979). Ce modèle est basé sur l'hypothèse selon laquelle la porosité globale du sol résulte de l'assemblage de deux types de pores d'origine différente : la porosité texturale ou « microporosité » et la porosité structurale.

La validité du modèle repose, *a priori*, sur la détermination de la porosité texturale en considérant que celle-ci résulte de l'assemblage intime des particules du sol (STENGEL, 1979). La fabrication de « gâteaux texturaux » selon le principe décrit par USDA (1954) permet d'accéder à cette fraction de la porosité du sol. Le gâteau est fabriqué à partir du tamisat de 2 mm de l'échantillon de sol. On confectionne une pâte, après malaxage de la terre saturée d'eau. Cette pâte, introduite dans une capsule est ensuite séchée à l'air, puis à l'étuve à 105° C.

La détermination de la densité (D_t) du gâteau ainsi obtenu, s'effectue selon le principe de la poussée d'Archimède dans un liquide non mouillant tel que le pétrole. La porosité texturale (n_t) rapportée à l'échantillon naturel est donnée par la formule :

$$n_t(\%) = 100 D_a \left(\frac{1}{D_t} - \frac{1}{D_r} \right)$$

où D_r est la densité réelle du sol déterminée par picnométrie à eau.

La détermination de la porosité globale (n) est obtenue à partir des mesures, *in situ*, de la densité apparente (D_a) du sol à l'aide du densitomètre à membrane. La porosité totale du sol s'établit selon la formule suivante :

$$n(\%) = 100 \left(1 - \frac{D_a}{D_r} \right)$$

La porosité structurale, notée (n_s), générée par l'action combinée des facteurs externes (climatique, mécanique et biologique), est obtenue par la différence entre la porosité totale et la porosité texturale du sol :

$$n_s(\%) = n - n_t = 100 \left(1 - \frac{D_a}{D_t} \right)$$

Mesure de l'infiltration, *in situ*

Les essais d'infiltration ont été réalisés, pendant la saison sèche, à l'aide du dispositif de type Müntz (double anneau ayant respectivement 57 et 32 cm de diamètre) en maintenant une charge d'eau constante de 4 cm à la surface du sol. Le système d'apport d'eau est assuré par un fût gradué muni de robinet (AUDRY et HUMBEL, 1973). Les principaux paramètres de l'infiltration (sorptivité capillaire et conductivité hydraulique) sont déterminés à partir de l'équation de PHILIP (1969) :

$$I(t) = S \sqrt{t} + At$$

où I est la lame d'eau infiltrée en fonction du temps (t).

S est la sorptivité et A , un paramètre de gravité qui a la dimension d'une vitesse.

La recherche des paramètres S et A conduit à la recherche de corrélation linéaire entre I/\sqrt{t} et \sqrt{t} .

La conductivité hydraulique, quant à elle, est déduite de l'équation de Philip selon SMILES et KNIGHT (1976). L'application de la théorie d'écoulement des fluides dans les milieux poreux de Konzeny-Carman (HUBERT, 1978) permet de relier l'infiltrabilité des parcelles à leur système poral. L'équation est de la forme :

$$K_{SAT} = \frac{f^3}{(1-f)^2}$$

où f est la porosité du sol.

Résultats

Modifications du système poral du sol

Les différentes composantes de la porosité globale du sol mesurées dans les différents essais et les teneurs en carbone correspondantes sont résumées dans le tableau II. Il traduit l'évolution du système poral du sol liée aux apports de fumier (substrat organique le mieux décomposé).

Tableau II. Teneurs en carbone total (%) et composantes de la porosité (%) mesurées dans les différents essais, sur l'horizon 0 - 20 du sol.

	Jachère	EEP			EEC		EEF	
		SL	L	L+F	L	L+F	L	L+F
Carbone	0,39	0,38	0,38	0,49	0,28	0,43	0,25	0,70
Porosité totale	44,4	40,7±0,8	42,7±1,2	42,6±1,7	39,2±2,8	41,1±2,8	37,9±2,5	40,7±1,8
Porosité texturale	24,1	24,6±0,7	23,1±0,7	22,8±0,5	22,4±0,5	20,6±1,4	22,1±1,0	23,4±1,5
Porosité structurale	17,3	16,1±1,1	19,6±1,9	19,8±2,0	16,8±3,1	20,5±2,3	15,8±3,3	17,3±2,6

L = Labour SL = Sans Labour L+F = Labour + Fumier

L'examen du tableau II suggère les commentaires suivants :

- par rapport à la jachère, la mise en culture entraîne inexorablement une baisse de la porosité totale du sol, quelle que soit la dose de fumier qui y est incorporée. Cette baisse semble s'accroître avec la durée de mise en culture ;
- les labours contribuent toutefois à accroître la porosité structurale. Mais cette action baisse avec l'intensité du travail du sol, notamment en l'absence d'apport organique. Les apports de fumier entraînent un accroissement de la porosité structurale créée par les labours. Mais cette action s'amenuise, par la suite, avec l'intensité des labours d'enfouissement ;
- en l'absence d'apport de fumier, la teneur en carbone du sol baisse avec la durée de mise en culture. Toutefois, par rapport à la jachère, l'enfouissement de fumier entraîne un accroissement du taux de matière organique, proportionnellement aux doses d'apport.

Modifications des caractéristiques hydrodynamiques du sol

Les paramètres hydrodynamiques de l'infiltration sur les différents sites étudiés sont résumés dans le tableau III. De l'examen de ce tableau, il ressort que les pratiques culturales affectent, de façon générale, aussi bien la sorptivité capillaire (S) que la conductivité hydraulique à saturation (K_{sat}) des parcelles. L'amélioration de l'infiltration des parcelles induite par les substrats organiques est fonction de leur nature. Elle est d'autant plus prononcée que le substrat est bien décomposé. Le labour à plat améliore notablement la sorptivité dont les valeurs sont doublées sur les parcelles labourées comparativement aux parcelles sans labour ; elles sont mêmes supérieures à celles mesurées sous jachère naturelle.

La parcelle en jachère présente la plus forte conductivité hydraulique. Cette dernière diminue fortement dans les sols labourés sans apport organique.

Tableau III. Paramètres d'infiltration des parcelles étudiées

Traitements	S(mm/ \sqrt{mn})	K _{sat} (mm/mn)	Θ_f (cm ³ /100 cm ³)
<u>Jachère</u> (témoin)	4,815	2,930	30
<u>Essai EEP</u>			
Sans labour	2,423	1,273	29
Sans labour + Fumier	2,283	1,450	30
Labour	5,292	0,860	28
Labour + Fumier	6,764	1,594	30
<u>Essai EEC</u>			
Labour	2,632	0,405	28
Labour + Paille	2,667	0,805	29
Labour + Compost anaérobie	2,900	0,940	29
Labour + Compost aérobie	2,212	1,037	26
Labour + Fumier	4,133	1,670	28
<u>Essai EEF</u>			
Labour	2,160	0,677	27
Labour + Paille	2,163	0,456	26
Labour + Fumier	2,518	1,182	28

Θ_f : teneur en eau finale du sol

Par ailleurs, en considérant les parcelles à enfouissement de fumier sur les trois essais de la station, il apparaît que leur infiltrabilité diminue à mesure que la durée de mise en culture augmente, malgré des apports souvent massifs de fumier (figure 1).

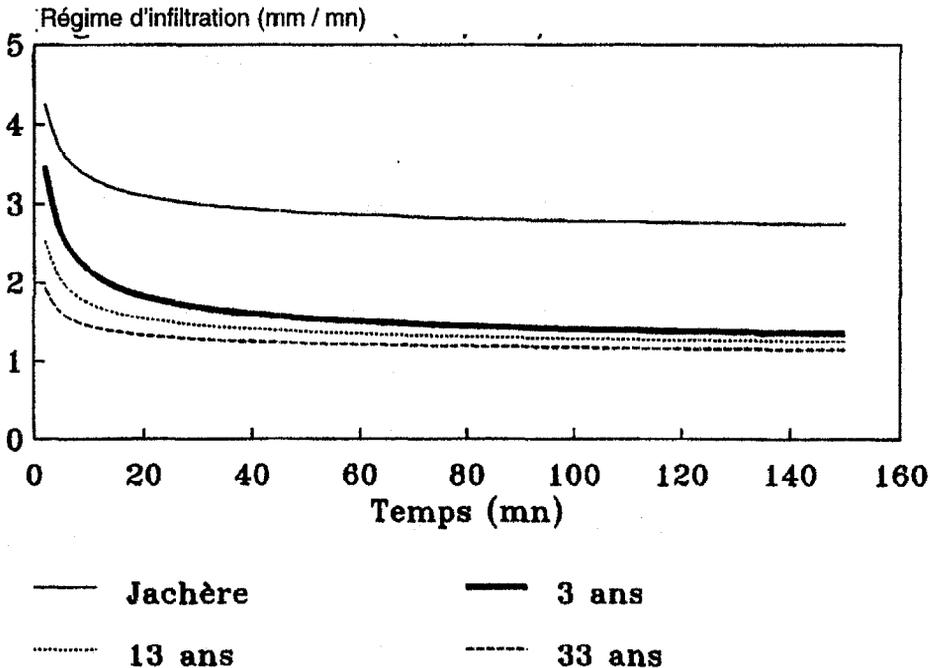


Figure 1. Effets de la durée de mise en culture sur le régime d'infiltration pour les parcelles labourées et fumées

En tentant alors de relier l'infiltrabilité des parcelles à leur système poral quantifié par densitométrie, *in situ*. (figures 2 et 3), il ressort que les meilleurs ajustements statistiques sont obtenus avec uniquement la porosité texturale.

Sur EEF, l'équation est la suivante :

$$K_{sat} = 0,006 \frac{nt^3}{(1-nt)^2} + 0,018$$

avec $r^2 = 0,67$.

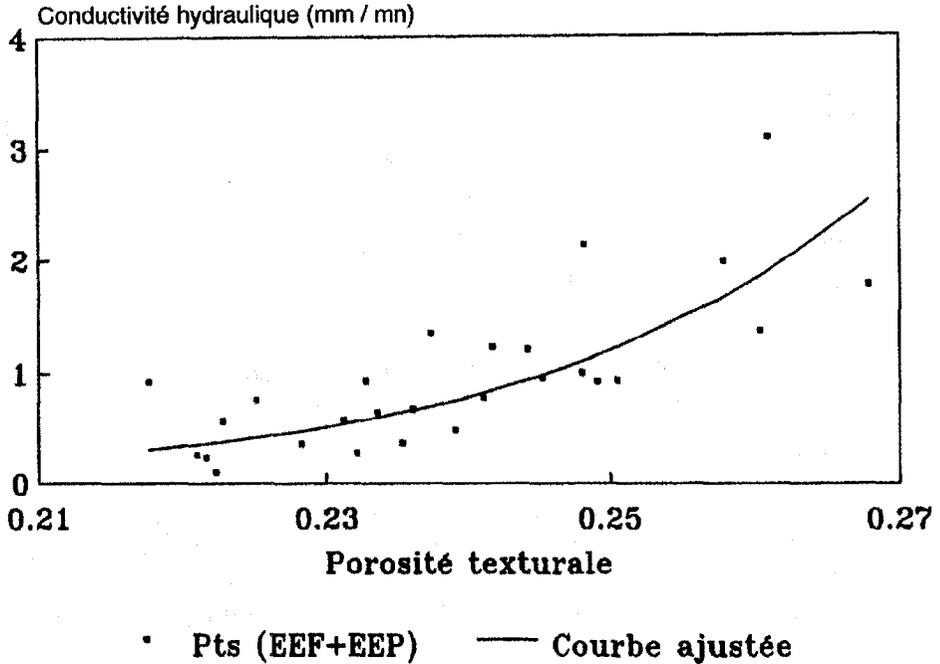


Figure 2. Ajustement entre la conductivité hydraulique et la porosité texturale (données des essais EEF et EEP)

En y ajoutant les données de EEP l'équation reste sensiblement la même :

$$K_{sat} = 0,006 \frac{nt^3}{(1-nt)^2} + 0,019$$

mais r^2 chute à 0,58.

Un autre ajustement du même type a été obtenu à partir des données de porosité texturale obtenues à l'aide du porosimètre au mercure. Mais le lien est plus lâche, r^2 étant de 0,31 (OUATTARA, 1994).

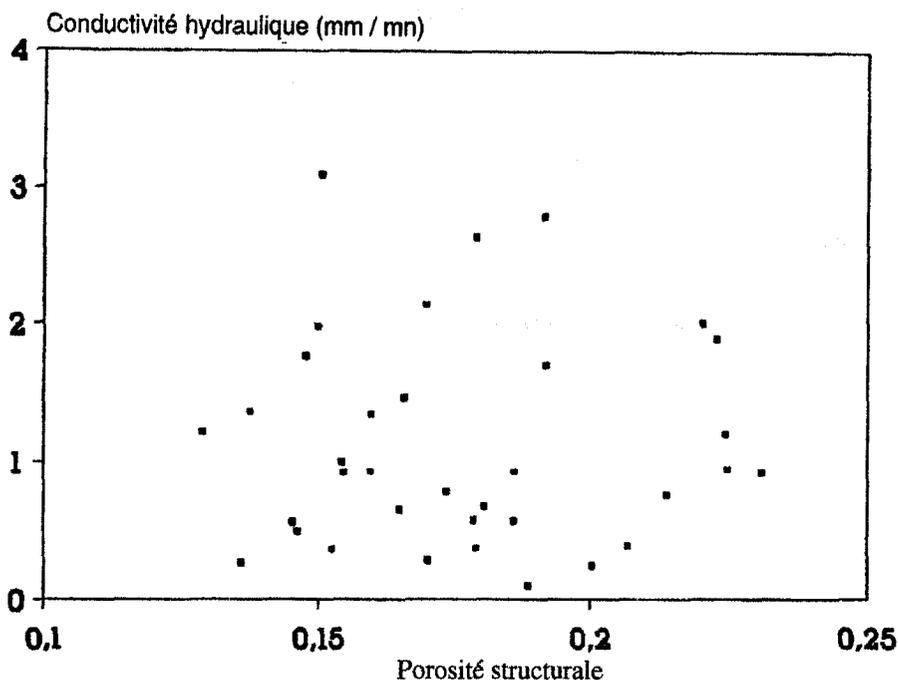


Figure 3. Relation entre la conductivité hydraulique et la porosité structurale (données des essais EEF et EEP)

Discussion

La démarche méthodologique adoptée au cours de cette étude, repose sur l'hypothèse selon laquelle, l'espace poral du sol se compose de deux types de porosité d'origines différentes : la porosité texturale et la porosité structurale. C'est principalement au niveau de cette dernière, assimilée à la macroporosité, que se fait le contrôle de l'état physique des sols cultivés (STENGEL, 1979 et 1990 ; COULON, 1988). En effet, la porosité texturale est supposée constante pour des sols de composition granulométrique identique.

Les résultats issus de l'analyse du système poral du sol, *in situ*, montrent cependant que chacun des types de porosité est susceptible de se modifier, selon la nature et l'intensité des pratiques culturales. Les premières années de labour favorisent l'augmentation de la macroporosité dans les horizons du sol travaillé et cette augmentation est renforcée en présence du fumier. Cet effet, à court terme, des labours d'enfouissement a été mis en évidence par SARR (1981) et OUATTARA *et al.*, (1994) dans les sols tropicaux à squelette sableux. Inversement, la porosité texturale diminue car le labour d'enfouissement entraînerait une diminution des teneurs en carbone de la fraction fine du sol (OUATTARA, 1994), responsable de la micro-agrégation de ces sols sableux pauvres en argiles gonflantes.

La baisse, à long terme, de la porosité totale et de l'infiltrabilité du sol, malgré une amélioration notable de son statut organique, peut résulter de causes diverses dont :

- la diminution de la qualité des matières organiques; il s'agit essentiellement de la baisse irréversible des teneurs en polysaccharides dès la mise en culture des sols (SÉDOGO, 1993). Celles-ci jouent un rôle déterminant dans l'agrégation des sols ;
- les phénomènes de compaction lors des travaux de préparation du sol (OUATTARA, *op cit*) ;

- la désagrégation mécanique de la structure originelle du sol liée aux brassages perpétuels des horizons de surface.

Dans ces conditions, l'enfouissement des matières organiques affecterait d'autant plus favorablement la porosité texturale du sol que la pratique du labour est menée de façon plus intensive. L'ensemble de ces modifications du système poral du sol conditionne largement, toutes choses étant égales par ailleurs, ses propriétés hydrodynamiques. Ainsi, l'effet résiduel des labours d'enfouissement se manifeste par une augmentation notable de la sorptivité capillaire du sol, surtout lors des premières années de labour. VAUCLIN et CHOPART (1992) expliquent ce phénomène par la création, due à l'effet résiduel du labour, d'un nombre plus élevé de pores fonctionnels de taille réduite (20 - 30 µm de diamètre).

En revanche, en l'absence de fumier, le labour affiche un pouvoir de conduction plus faible, mais la différence avec l'effet labour + fumier s'amenuise avec la durée de culture. FRANZEN *et al.*, (1985) ont également observé ce phénomène au Nigéria. Il peut être lié à la baisse de la porosité totale du sol induite par le labour sans enfouissement de fumier.

Au regard des difficultés que pose l'estimation de la conductivité hydraulique (VAUCLIN et CHOPART, *op cit*), il n'a nullement été question de quantifier en absolu ce paramètre de l'infiltration mais plutôt de calculer une grandeur représentative qui puisse être reliée au système poral du sol. En effet, la conductivité hydraulique à saturation, représentant la composante gravitaire de l'écoulement de l'eau, devrait être corrélée à l'intensité du réseau des gros pores du sol (HUBERT, 1978 ; COULON, 1988). Or, comme nous l'avons vu, les différents ajustements statistiques n'ont réellement été satisfaisants qu'avec la porosité texturale

Ces résultats confirment l'importance des modifications qui affectent la porosité texturale de ces sols lorsqu'ils sont mis en culture. Pourtant, l'essai EEP avait mis en évidence le rôle du labour dans la création d'une macroporosité qui, théoriquement, devrait être corrélée avec la conductivité hydraulique. Cela n'est malheureusement pas le cas. Aussi serait-on tenté de dire que, plus que la quantification globale de la porosité, c'est la complexité de la géométrie de l'espace poral du sol qui jouerait un rôle déterminant dans l'infiltrabilité des parcelles. C'est pourquoi, certains auteurs comme HUBERT (1978) et PELLERIN (1980), accordent une importance particulière à l'estimation du facteur de tortuosité des pores. En effet, un système poral, composé majoritairement de pores en « forme d'encrier », aura un pouvoir de conduction hydraulique plus faible que celui qu'on est en droit d'attendre.

Le bon comportement de la parcelle sous jachère vis-à-vis de son pouvoir de conduction hydraulique est lié à la forte porosité texturale (CIRAD, 1992 ; OUATTARA, 1994) et à l'activité faunique de l'horizon de surface. Mais, il ne faudrait pas perdre de vue le rôle déterminant joué par les états de surface du sol dans le fonctionnement hydrodynamique de ces parcelles (CASENAVE et VALENTIN, 1989 ; ZOUGMORÉ, 1990 ; HOOGMOED, 1994). Or, la technique de l'infiltrométrie de type Müntz, utilisée ici, ne permet pas de prendre en compte le rôle de ces états de surface sur l'infiltrabilité du sol.

Cependant, la méthode Müntz, grâce à sa simplicité et à sa mise en oeuvre facile, permet une bonne estimation de l'évolution du système poral d'un sol soumis à différentes pratiques culturales.

Conclusion

Les résultats obtenus mettent en évidence l'intérêt de l'infiltrométrie Müntz pour caractériser, *in situ*, les modifications du système poral du sol. Utilisée sur des traitements agronomiques de différents modes de gestion de la fertilité d'un sol ferrugineux tropical, cette technique a permis de mettre en évidence l'effet bénéfique, à court terme, du labour sur l'infiltrabilité du sol (amélioration de la sorptivité capillaire et de la conductivité hydraulique). Toutefois, la conductivité hydraulique n'est favorablement modifiée qu'en présence de matière organique, lorsque celle-ci est notamment bien décomposée. Mais à long terme, et par rapport à la jachère, les parcelles labourées chaque année pendant une longue période, subissent une diminution progressive de leur pouvoir de conduction hydraulique, consécutivement à la baisse de leur système poral. Ces modifications s'opèrent irréversiblement malgré des apports bisannuels de 40 T/ha de fumier et semblent privilégier la porosité texturale du sol.

Les mesures de l'infiltration, *in situ*, reflètent ces modifications de l'espace poral du sol. Il est cependant évident que les données concernant les paramètres hydrodynamiques de l'infiltration obtenues à partir de l'infiltrométrie de type Müntz, bien que cohérentes dans leur ensemble, sont entachées de quelques insuffisances. Cela tient à la méthode elle-même qui ne permet pas de caractériser finement les macropores du sol et n'autorise qu'une utilisation assez limitée de l'équation de Philip. Cependant, cette méthodologie Müntz, telle qu'elle a été utilisée, c'est-à-dire de manière comparative, est suffisante pour mettre en évidence les modifications du système poral d'un sol lorsqu'il est soumis à différentes pratiques culturales.

Références bibliographiques

- AUDRY P., HUMBEL F.X., 1973. Perméabilité Müntz. In : Bulletin du groupe de travail sur la dynamique actuelle des sols, 8: 50-57.
- CASENAVE A., VALENTIN C., 1989. Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. Edit. ORSTOM, 230 p.
- CIRAD., 1992. Mécanismes d'agrégation des sols tropicaux pauvres en argiles gonflantes. Rapport final Projet CEE/STD2, Contrat TS2A-0146F (TT), 156 p.
- CHILDS E C., 1969. An introduction to the physical basis of soil water phenomena. Éd. J. Wiley Sons, p. 92-96.
- 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 de Doct., Université d'Orléans, 242 p.
- FRANZEN H., LAL R., EHLERS W., 1985. Physical properties of a tropical alfisol and maize performance as influenced by tillage, mulching and vehicular traffic. In Reduced Tillage-rational in sustained production. 10th conference of ISTRO, Univ. of Guelph, Ontario, 8-12th, July.
- HOOGMOED W B., 1994. Soil crusting and sealing in agriculture. Multigr. Doc. prepared for FAO. (Soil Tillage Département, Agricultural University Diedenweg, 20, 6703 GW Wageningen, The Netherlands), 44 p.
- HOOGMOED W B., STROOSNIJDER L., 1984. Crust formation on sandy soil in the Sahel. I. Rainfall and infiltration. Soil & Tillage Res. 4, 5-23.
- HUBERT A., 1978. Relation entre la conductivité hydraulique et la structure des milieux poreux (Étude bibliographique), Ann. Agron., 29(5): 475-498.
- LAL R., 1986. No-tillage and surface tillage systems to alleviate soil-related constraints in the tropics. In: M.A. Sprague and G.B. Triplett (Eds) Notillage and surface-tillage agriculture. Wiley & Sons, p. 261- 317.
- NICOU R., 1975. Le problème de la prise en masse à la dessiccation des sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche. Agron. Trop. XXX (4): 325-343.
- OUATTARA B., 1994. Contribution à l'étude de l'évolution des propriétés physiques d'un sol ferrugineux tropical sous culture : pratiques culturales et états structuraux du sol. Thèse Doct. Ingén. Univ. Nation. de Côte d'Ivoire, 168 p.

- OUATTARA B., SÉDOGO M P., LOMPO F., 1994.** Effets de quatre types de substrats organiques sur le système poral d'un sol ferrugineux tropical sous culture de sorgho. *Sci. et Tech.*, 1993-94; 21 (1) : 60-77.
- PELLERIN F M., 1980.** La porosimétrie au mercure appliquée à l'étude géotechnique des sols et des roches. *Bull. Liaison. Laboratoire des Ponts et Chaussées*, 106, 105-116.
- PHILIP J R., 1969.** The theory of infiltration. *Advances in hydrosociences*, 5: 215-305. Academic pres., New York.
- SARR P L., 1981.** Analyse des effets induits par l'intensification des cultures sur quelques caractéristiques physico-chimiques d'un sol ferrugineux tropical du Sénégal (Nioro du Rip.), Thèse doct. 3^e cycle, Agron. Pédol., USTL/ENSA, (Montpellier), 100p.
- SÉDOGO M P., 1993.** Évolution des sols ferrugineux lessivés sous culture : incidence des modes de gestion sur la fertilité. Thèse Doct. ès-sciences (Sciences du sol), Univ. Nat. de Côte d'Ivoire, 332 p.
- SÉDOGO M P., LOMPO F., OUATTARA B., 1994.** Le carbone et l'azote dans les différentes fractions granulométriques d'un sol ferrugineux tropical: effets de quatre types d'amendements organiques. *Sci et Tech* 1993-1994 ; 21 (1) : 114-24.
- SMILES D E., KNIGHT J H., 1976.** A note of a use of the Philip infiltration équation. *Austr. Journ. Soil Res.*, 14, 103-108.
- SOMÉ L., OUATTARA B., 1991.** Effet du ruissellement et de l'érosion sur le bilan hydrique et les rendements du sorgho à Saria (Burkina Faso), *Agron. Afr.*, 3 (1), 5-15.
- 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 (1), 27-51.
- STENGEL P., 1990.** Caractérisation de l'état structural du sol. Objectifs et méthodes. In : *Structure du sol et son évolution.* (Laon), Edit. INRA (les colloques de l'INRA, N°53, 15-36.)
- USDA / United States salinity Laboratory Staff, 1954.** Diagnostic and improvement of saline and alkali soils. Ed. L.A. Richards, U.S. Dept Agric. Handbook, n° 60.
- VAUCLIN M., CHOPART J L., 1992.** L'infiltrométrie multidisques pour la détermination, in situ, des caractéristiques de la surface d'un sol gravillonnaire de Côte d'Ivoire. *Agron. Trop.*, 46 (4), 3-11.
- ZOUGMORÉ R B., 1991.** Contribution à l'étude du ruissellement et de l'érosion à la parcelle ; influence des paramètres principaux : précipitations, rugosité du sol, états de surface, humidité du sol en surface. Mémoire de fin d'études, ISN / IDR, Univ. de Ouagadougou, 89 p.