

La modélisation de la porosité des horizons gravillonnaires à partir des lois d'assemblage

R. POSS

Pédologue O.R.S.T.O.M., Centre O.R.S.T.O.M. de Lomé, B.P. 375, Lomé, Togo

RÉSUMÉ

Dans certains sols ferrallitiques caractérisés par une relative constance de la porosité « hors éléments grossiers », l'application des lois d'assemblage définies à partir de mélanges de billes de verre est réalisable. Il est alors possible d'estimer la porosité du matériau, donc sa capacité de rétention, en ne connaissant que la teneur pondérale en éléments grossiers et les caractéristiques hydriques de la terre fine. Il apparaît en outre que dans ce cas les éléments grossiers interviennent peu sur la porosité « hors éléments grossiers » tant que leur teneur pondérale n'excède pas 65 %.

MOTS-CLÉS : Sols ferrallitiques — Modélisation — Porosité — Éléments grossiers.

ABSTRACT

THE MODELISATION OF POROSITY IN GRAVELY HORIZONS BASED ON THE LAWS OF ASSEMBLAGE

In some ferrallitic soils characterized by a rather constant porosity "exclusive of coarse fragments", it is possible to apply the laws of assemblage which are defined from the mixture of glass balls. Then, the porosity of the material and therefore its water-holding capacity can be evaluated from the percentage of coarse fragments and the hydrous characteristics of fine earth. Moreover, it seems that coarse fragments have little influence on the porosity "exclusive of coarse fragments" as long as their percentage does not exceed 65 %.

KEY WORDS : Ferrallitic soils — Modelisation — Porosity — Coarse fragments.

INTRODUCTION

Dans la zone soudanienne, l'individualisation des sesquioxydes métalliques conduit très généralement à la formation d'horizons gravillonnaires à moyenne profondeur. Leur comportement hydrique, principal facteur intervenant dans toute mise en valeur, pose des problèmes de détermination liés en premier lieu à l'importance du travail de terrain nécessaire pour préciser leur porosité. C'est pourquoi nous avons cherché, en partant de résultats obtenus lors de l'étude du comportement de quelques sols (POSS et VALENTIN, à paraître), à définir la porosité des horizons gravillonnaires en utilisant quelques données simples. Il a été fait appel aux lois d'assemblage définies, à partir de mélanges de billes de verre de deux diamètres différents, par FIES, HENIN et

MONNIER (1972) pour étudier la porosité texturale. C'est l'application de ces lois à l'étude de la porosité totale des horizons gravillonnaires qui a été tentée dans le cas de quelques horizons particuliers.

1. LES HORIZONS ET LA MÉTHODE D'ÉTUDE

Les horizons étudiés proviennent du centre et du nord de la Côte d'Ivoire. Ils ont été choisis dans des profils ferrallitiques rouges développés sur schistes (classés faiblement à moyennement désaturés, remaniés et parfois indurés) afin d'étudier un matériau relativement homogène dont la fraction argileuse est dominée par la kaolinite.

La détermination de la composition volumique des horizons s'est effectuée en deux phases successives. Dans un premier temps, sur le terrain, un densi-

tomètre à membrane de trois litres avec limiteur de pression a été utilisé, afin de déterminer le volume apparent de 4 à 6 échantillons par horizon. Ensuite, au laboratoire, le poids des éléments grossiers de ces échantillons a été déterminé après tamisage, lavage aux ultra-sons et séchage à 105 °C; leur volume par déplacement de pétrole après imprégnation au pétrole sous vide et ressuyage.

La porosité matricielle des éléments grossiers (porosité interstitielle des éléments grossiers séparés de la terre fine et des débris végétaux) a été déterminée en mesurant le volume nécessaire pour combler les vides entre les gravillons, ceux-ci étant préalablement saturés en pétrole et tassés artificiellement (le tassement obtenu est constant quelles que soient

l'intensité et la durée des vibrations). Les mesures ont été réalisées sur chaque échantillon des profils E, F et H, soit 6 répétitions par horizon.

La séparation des éléments grossiers a fait apparaître une grande différence de dimension entre la terre fine (moins de 2 mm) et les gravillons, dont la plupart sont de taille comprise entre 1 et 3 cm.

Les résultats, obtenus sur environ 90 échantillons, ont été regroupés par horizon dans le tableau I : la porosité « hors éléments grossiers » (HUMBEL, 1974) reste comprise entre 40 et 50 %, sauf dans le profil C où l'abondance des éléments grossiers crée une porosité d'assemblage plus importante.

Au sein d'un horizon, la dispersion des résultats de porosité « hors éléments grossiers » est générale-

TABLEAU I

Moyennes par horizon des porosités et des taux d'éléments grossiers

Profil	n° de l'horizon	Profondeur (cm)	Notation ABC	% EG/Horizon		Densité apparente "hors EG"	Porosité "hors EG"	Porosité totale	Porosité matricielle des EG
				masse	volume				
A	2	12-25	A	38,6	25,0	1,31	45,2	33,2	-
	3	25-60	AB	48,8	40,6	1,45	41,2	24,9	-
	4	60-80	B	36,6	23,1	1,40	47,0	36,2	-
	5	80-190	BC	2,2	1,4	1,54	42,2	41,6	-
B	2	15-40	AB	55,2	41,2	1,39	46,7	27,4	-
	3	40-75	B	53,7	42,8	1,41	47,0	27,1	-
C	2	11-25	AB	72,8	51,7	0,98	61,6	29,7	-
	3	25-85	B	74,9	56,6	0,98	62,3	26,5	-
	4	85-150	BC	40,0	28,9	1,28	52,8	37,0	-
E	1	0-12	A	61,5	47,1	1,33	47,2	26,9	36,5
	2	12-37	AB	62,8	46,6	1,36	45,8	25,5	38,0
	3	37-75	B	58,4	47,8	1,41	40,3	22,5	38,7
	4	75-150	(B)C	39,3	29,8	1,48	42,0	28,8	39,9
F	1	0-20	A	37,1	25,5	1,42	44,0	31,7	35,3
	2	20-55	AB	66,3	48,8	1,34	48,9	24,3	40,4
	3	50-80	B	59,1	44,9	1,52	43,2	24,3	45,3
H	1	0-15	A	64,4	46,9	1,30	46,2	23,0	38,0

ment inférieure à trois points par rapport à la moyenne. Cette moyenne se situe, pour les horizons étudiés, entre les valeurs de porosité des sols ferrallitiques de forêt (50 à 60 %) et celles des sols ferrugineux tropicaux (30 à 40 %). Cette variabilité limitée, déjà notée sur les sols ferrallitiques du Cameroun (HUMBEL, 1976), s'explique certainement ici par des pédoclimats et des activités biologiques comparables s'exerçant sur des matériaux à faible contraste minéralogique.

2. LE MODÈLE

La modélisation de la porosité des horizons gravillonnaires fait appel successivement à deux lois d'assemblage correspondant, l'une à l'introduction d'éléments grossiers de forme quelconque dans un matériau constitué uniquement de terre fine (phase solide+air), l'autre à l'évacuation de la terre fine entre les éléments grossiers lorsqu'ils parviennent au contact (fig. 1).

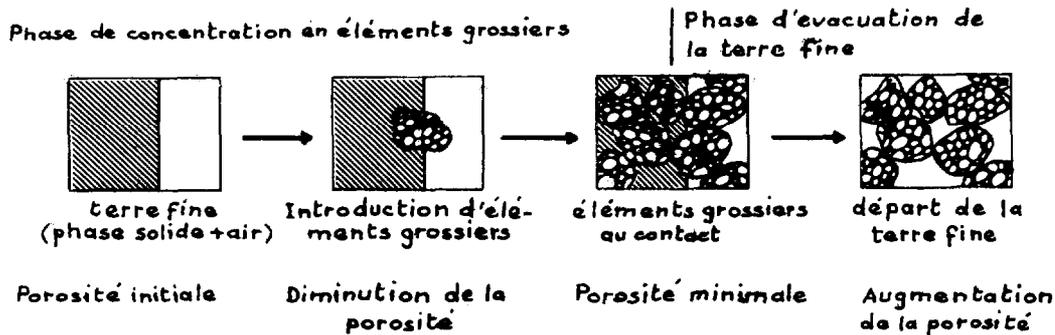


FIG. 1. — Schéma du modèle utilisé

2.1. Phase de concentration en éléments grossiers

(loi d'interaction simple)

Dans un milieu occupé par de la terre fine, si un élément grossier est introduit, le volume réel de cet élément grossier remplace un volume apparent de terre fine. Un volume considéré comme non poreux remplace donc un volume égal qui était constitué de phase solide et d'air.

La formulation mathématique s'effectue en raisonnant sur un volume unitaire. Soient :

. La teneur volumique réelle en phase solide de la terre fine (sa limite est b_0 en l'absence d'éléments grossiers, ce qui correspond donc à une porosité de $1 - b_0$);

. B la teneur volumique réelle en éléments grossiers (la limite étant B_0 lorsqu'ils arrivent au contact);

. P la porosité du matériau.

L'introduction d'un volume B d'éléments grossiers provoque l'expulsion d'un volume b' de phase solide de la terre fine occupant un volume apparent égal : $b' \times \frac{1}{b_0} = B$.

La phase solide de la terre fine restante est donc :

$$b = b_0 - b' = b_0 (1 - B).$$

Et la porosité :

$$P = 1 - B - b = 1 - B - b_0 (1 - B) = (1 - b_0) (1 - B). \quad (1)$$

La limite théorique de cette loi correspond au contact entre les éléments grossiers :

$$P_1 = (1 - b_0) (1 - B_0).$$

2.2. Phase d'évacuation de la terre fine

(loi d'interaction perturbée)

Les éléments grossiers étant au contact, l'évacuation de la terre fine s'accompagne d'une augmen-

tation de porosité. Mais la terre fine comprise entre les éléments grossiers perturbe leur arrangement, ce qui diminue en fait leur nombre par unité de volume. Nous considérerons que la quantité B' d'éléments grossiers éliminés est proportionnelle à la quantité b d'éléments fins restant dans le mélange.

$$B' = B_0 - B = b \times \Delta \quad \text{d'où} \quad B = B_0 - b \times \Delta.$$

La porosité est donc donnée par la relation :

$$P = 1 - B - b = 1 - B_0 - b (1 - \Delta). \quad (2)$$

La porosité minimale du mélange correspond à la valeur de porosité commune aux relations (1) et (2) :

$$P_1 = 1 - B_0 - b (1 - \Delta) = (1 - B) (1 - b_0). \quad (3)$$

$$P_1 = \frac{(1 - b_0) (1 - B_0)}{1 - b_0 \times \Delta}.$$

Cette porosité est donc supérieure à la porosité limite définie par la première loi.

3. VALIDITÉ DU MODÈLE

L'application du modèle aux horizons considérés est rendue possible *a priori* par la relative constance de la porosité « hors éléments grossiers » et par l'importante différence de dimension entre les particules de terre fine et les éléments grossiers. Toutefois il convient de noter que ce modèle ne prend pas en compte la porosité propre des éléments grossiers, généralement comprise entre 10 et 20 % dans le cas étudié, qui n'est pas négligeable dans les horizons fortement gravillonnaires.

3.1. Phase de concentration en éléments grossiers

Pour les horizons dont le taux d'éléments grossiers est inférieur à 65 % en masse, la porosité et la teneur volumique en éléments grossiers ont été représentés sur la figure 2.

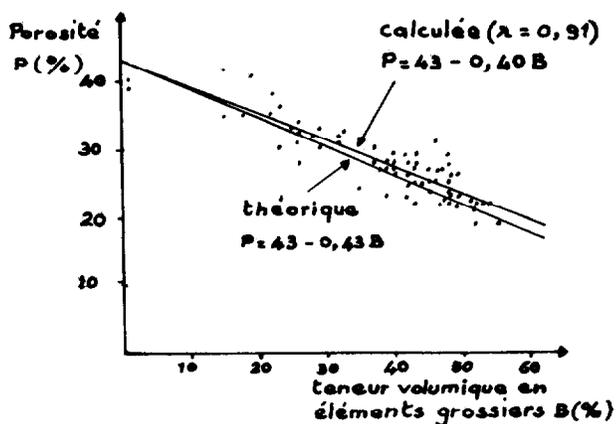


FIG. 2. — Relation entre porosité et teneur en éléments grossiers (teneurs pondérales en EG < 65 %)

Ces deux variables sont liées (avec un coefficient de corrélation de 0,91) par la relation : $P = 43,2 - 0,403 B$.

Le modèle, caractérisé par la relation (1) :

$$P = (1 - b_0) - (1 - b_0) B$$

s'applique donc, en prenant pour b_0 la valeur 0,57, ce qui correspond bien aux valeurs de porosité « hors éléments grossiers » ($1 - b_0$) de 40 à 50 % qui ont été mesurées (cf. tabl. I).

3.2. Phase d'évacuation de la terre fine

L'étude, sur les horizons les plus fortement gravillonnaires (plus de 65 % d'éléments grossiers en masse), de la liaison entre la porosité de l'horizon et la teneur en terre fine (fig. 3) fait apparaître une faible corrélation (coefficient de 0,42).

Le modèle, caractérisé par la relation (2) :

$$P = 1 - B_0 - b(1 - \Delta).$$

s'applique donc mal à cette phase, ce qui semble principalement lié à la conjonction de trois facteurs :

— un coefficient de perturbation Δ variable suivant les horizons, mais qui n'est pas nul (modèle d'interaction simple) comme le prouve la figure 5;

— une porosité matricielle des éléments grossiers ($1 - B_0$) variable selon les horizons en fonction de la distribution granulométrique des éléments grossiers (cf. tabl. I);

— une indétermination sur la teneur en terre fine. La séparation de la terre fine par tamisage

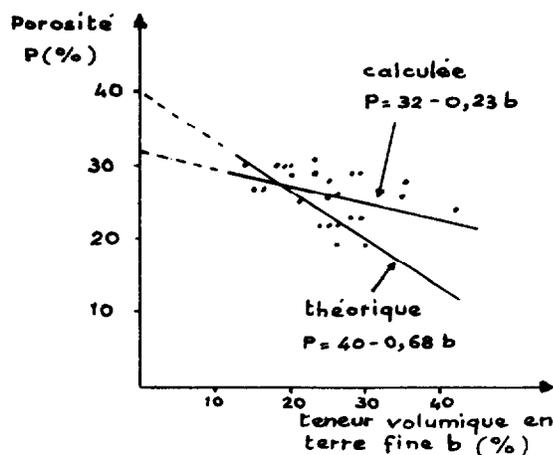


FIG. 3. — Relation entre porosité et teneur en terre fine (fortes teneurs en EG)

provoque en effet la destruction de certains éléments grossiers qui sont alors comptabilisés en terre fine.

Les valeurs mesurées ne peuvent donc être approchées que très grossièrement par un modèle dont les paramètres sont :

$$B_0 = 0,60.$$

$$\Delta = 0,32.$$

Ce modèle correspond à la valeur moyenne de la porosité matricielle des éléments grossiers ($1 - B_0$) déterminée sur les profils E, F et H (cf. tabl. I), qui est également la valeur résultant de l'extrapolation de la figure 4. La valeur minimale de porosité totale observée sur l'ensemble des horizons (21 %) permet ensuite de calculer le coefficient de perturbation à l'aide de la relation (3) et de la valeur B_0 .

4. REPRÉSENTATION GRAPHIQUE ET APPLICATION PRATIQUE

Les teneurs volumiques en terre fine et en éléments grossiers étant rarement calculées en raison des difficultés liées à leur détermination, il est plus aisé d'utiliser les teneurs pondérales.

Soient :

- P_{tf} la porosité de la terre fine;
- d_{rtf} la densité réelle de la terre fine;
- d_{aEG} la densité apparente des éléments grossiers;
- c la teneur pondérale en éléments grossiers.

La valeur de c est donnée par la relation :

$$c = \frac{B d_{aEG}}{B d_{aEG} + b d_{rtf}}$$

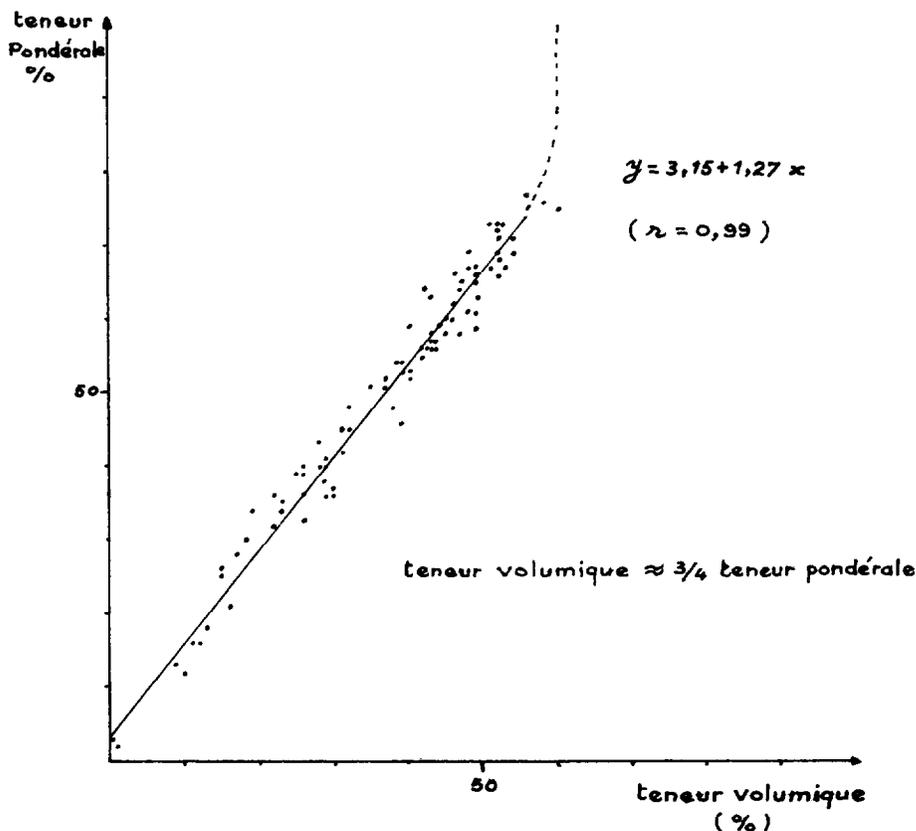


FIG. 4. — Relation entre teneurs volumiques et pondérales en éléments grossiers

C'est la densité apparente des éléments grossiers qui est utilisée puisque leur porosité n'est pas prise en compte par le modèle.

Les relations entre la porosité et la teneur pondérale en éléments grossiers sont alors données par les relations suivantes :

Phase de concentration en éléments grossiers

$$P = \frac{(1 - c)(1 - b_0)}{1 - c \left(1 - \frac{b_0}{\frac{d_{aEG}}{d_{rtf}}} \right)} = \frac{(1 - c) P_{tf}}{1 - c \left(1 - \frac{1 - P_{tf}}{\frac{d_{aEG}}{d_{rtf}}} \right)}$$

Phase d'évacuation de la matrice

$$P = 1 - B_0 \frac{c \left(1 - \frac{d_{aEG}}{d_{rtf}} \right) + \frac{d_{aEG}}{d_{rtf}}}{c \left(1 - \Delta \frac{d_{aEG}}{d_{rtf}} \right) + \Delta \frac{d_{aEG}}{d_{rtf}}}$$

Ces relations se représentent graphiquement (fig. 5) par deux branches d'hyperbole. La portion d'hyperbole correspondant à $\Delta = 0$ représente le cas où la matrice ne perturbe pas l'arrangement des éléments grossiers dans la phase d'évacuation (modèle d'interaction simple).

L'utilisation de ce modèle pour les horizons dont les teneurs pondérales en éléments grossiers sont inférieures à 65 % permet de calculer la porosité, donc les possibilités de rétention hydrique, lorsque celles de la terre fine sont connues. Or il est fréquent, particulièrement dans le cas de sols rouges ferrallitiques, que la porosité de la terre fine varie peu entre les horizons gravillonnaires et les horizons sans éléments grossiers qui les surmontent le plus souvent et dans lesquels la détermination de la porosité est facile à réaliser.

De plus, dans les sols étudiés, la densité apparente des éléments grossiers et la densité réelle de la terre fine étaient très voisines (de l'ordre de 2,5).

Enfin le calcul montre qu'il est possible d'approcher la branche d'hyperbole à moins de 2 % de porosité

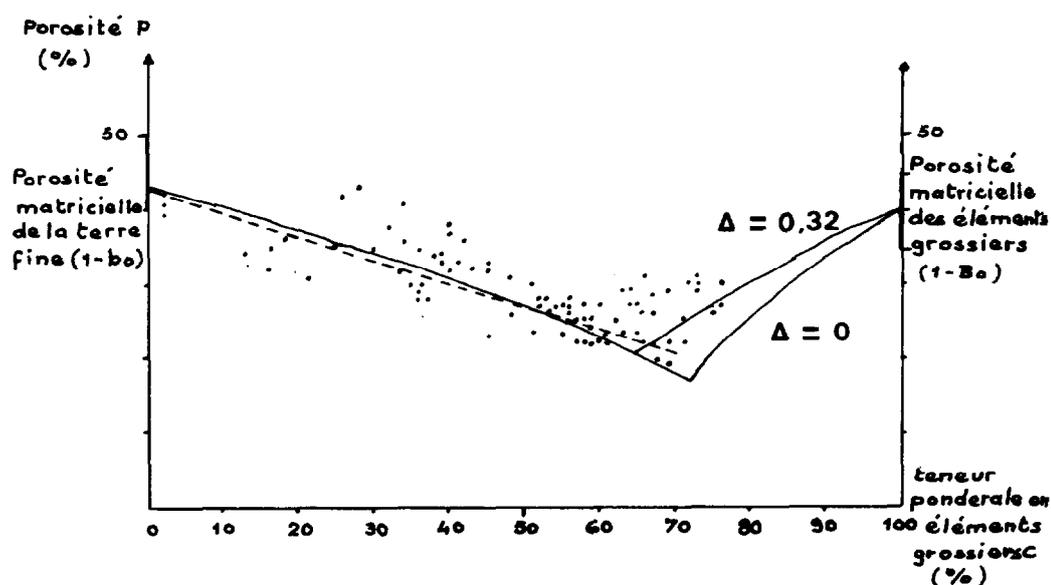


Fig. 5. — Relation entre porosité et teneur pondérale en éléments grossiers

dans la gamme habituellement utilisée, par la droite (fig. 5) coupant l'hyperbole aux points $c = 0$ et $c = 0,5$, d'équation :

$$P = P_{tf} - \frac{P_{tf}(1 - P_{tf})}{1 - 0,5 P_{tf}} \times c$$

Par exemple, dans un sol dont la porosité de la terre fine est de 50 %, la teneur pondérale en éléments grossiers de 45 %, la porosité peut être estimée à :

$$P = 0,5 - \frac{0,5 \times 0,5 \times 0,45}{1 - 0,5 \times 0,5} = 0,35 \text{ soit } 35 \%$$

Si, pour la terre fine, la teneur en eau utile est de 25 % (déterminée sur un horizon analogue non gravillonnaire), l'eau utile de l'horizon gravillonnaire peut être estimée à :

$$Q = \frac{P \times 0,25}{P_{tf}} = \frac{0,35 \times 0,25}{0,50} = 0,175 \text{ soit } 17,5 \%$$

Cela correspond à une lame d'eau de 175 mm par mètre de sol (la porosité des éléments grossiers étant toujours négligée).

Pour les horizons fortement gravillonnaires (plus de 65 % en masse, 50 % en volume), la formule précédente n'est plus applicable. Elle conduirait à sous-estimer la porosité de l'horizon.

CONCLUSION

Le modèle d'interaction simple s'applique bien aux sols étudiés tant que la teneur pondérale en éléments grossiers ne dépasse pas 65 %. Au-delà,

le modèle d'interaction perturbée rend compte de l'allure des phénomènes, mais il reste trop éloigné des valeurs observées pour être numériquement utilisable.

Il en résulte que les éléments grossiers interviennent peu sur la porosité de la terre fine si leur concentration n'est pas suffisante pour qu'ils forment l'ossature de l'horizon. Ils peuvent être considérés comme une charge n'intervenant pas dans la création de la porosité. Les facteurs physiques et biologiques créateurs de porosité se développent donc indépendamment de cette charge en éléments grossiers.

La porosité de la terre fine variant peu, c'est la teneur en éléments grossiers qui intervient principalement pour déterminer la porosité de l'horizon. Celle-ci peut être évaluée à l'aide d'une formule mathématique simple faisant intervenir la teneur pondérale en éléments grossiers; cette formule peut s'appliquer dans les cas où la porosité de la terre fine est relativement constante.

Cependant, il convient de souligner que ces résultats, valables pour les sols rouges étudiés, ne s'appliquent pas à tous les sols gravillonnaires de la zone soudanienne. En particulier, dans le cas des sols à horizons superficiels compacts, les éléments grossiers permettent le maintien d'une certaine porosité dans un matériau à faible stabilité structurale, conférant ainsi aux horizons gravillonnaires les propriétés physiques les plus favorables à l'enracinement des végétaux.

Manuscrit reçu au Service des Éditions de l'O.R.S.T.O.M.
le 13 juillet 1983

BIBLIOGRAPHIE

- FIES (J. C.), HENIN (S.) et MONNIER (G.), 1972. — Étude de quelques lois régissant la porosité de matériaux meubles. *Ann. Agron.*, vol. 23 (6) : 621-653.
- HUMBEL (F. X.), 1974. — La compacité de sols ferrallitiques du Cameroun : une zonalité dans ce milieu en relation avec la dessiccation saisonnière. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, vol. XII, n° 1 : 73-102.
- HUMBEL (F. X.), 1976. — L'espace poral des sols ferrallitiques du Cameroun. *Trav. Doc. O.R.S.T.O.M.* n° 54, (Paris), 310 p.
- POSS (R.) et VALENTIN (Ch.), à paraître. — Structure et fonctionnement d'un système eau-sol-végétation : une toposéquence ferrallitique de savane (Katiola, Côte-d'Ivoire).
- Les analyses ont été mises au point et réalisées au laboratoire O.R.S.T.O.M. d'Adiopodoumé (Côte-d'Ivoire) sous la direction de MM. GOUZY et TOPART.