HAL open science

Densité texturale de sols naturels. I. - Méthode de mesure

Jean-Claude Fies, Pierre Stengel, Michel Bourlet, Jacques Horoyan, Claude Jeandet

To cite this version:

Jean-Claude Fies, Pierre Stengel, Michel Bourlet, Jacques Horoyan, Claude Jeandet. Densité texturale de sols naturels. I. - Méthode de mesure. Agronomie, 1981, 1 (8), pp.651-658. hal-00884307

HAL Id: hal-00884307

https://hal.science/hal-00884307

Submitted on 11 May 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, 1981, 1 (8), 651-658.

Densité texturale de sols naturels. I. - Méthode de mesure

Jean-Claude FIES & Pierre STENGEL

avec la collaboration technique de Michel BOURLET, Jacques HOROYAN & Claude JEANDET

I.N.R.A., Station de Science du Sol, Centre de recherches d'Avignon, F 84140 Montfavet.

RÉSUMÉ

Densité texturale, Structure sol, Texture sol, Porosité sol, Granulométrie, Assemblage sol.

La conséquence de l'arrangement des constituants du sol est quantifiée par une valeur de densité appelée densité texturale.
Des échantillons de sols naturels sont choisis afin d'établir des relations entre leur composition granulométrique et leur densité texturale, à l'état sec.
Cette dernière est appréciée sur échantillons remaniés et non remaniés.
Il est montré qu'une mesure de densité sur des échantillons de volume suffisamment petit représente la meilleure approximation de leur densité texturale. De l'étude des limites propres à la méthode de mesure, il ressort que le choix du volume sur lequel est effectué la mesure de densité dépend de la granulométrie des constituants de l'échantillon.

SUMMARY

Textural bulk density, Soil structure, Soil texture, Soil porosity, Particle size distribution, Soil fabric.

Textural soil bulk density. I. - Measurement

The textural soil bulk density is assumed here to be the result of the elementary fabric of soils components.
Natural soils samples are taken in order to study the relationships between particle size distribution and textural bulk density values for dry soils.
These values are measured on natural and remoulded samples.
The use of the smallest volume for bulk density measurement appears to be the better way to approximate the textural bulk density.
The study of the boundary conditions for volume measurement points out that the smallest volume value depends on particle size distribution of the sample.

I. INTRODUCTION

L'utilisation de l'analyse des systèmes de porosité dans la caractérisation de l'état physique du sol a mis en évidence l'intérêt opérationnel d'une distinction entre espace poral d'origine structurale et espace poral d'origine texturale (STENGEL, 1979).

En effet, c'est au niveau de la porosité structurale que le contrôle de l'état physique du sol reste principalement envisageable. Cependant, la porosité structurale n'est connue que par la différence entre porosités totale et texturale relatives à un même volume de sol. Le contrôle de la porosité structurale exige en particulier une détermination de la porosité texturale.

En pratique, cette détermination a été rendue possible par la mise au point d'une méthode d'évaluation de la porosité texturale. Cette variable, rappelons-le, caractérise la part de l'espace poral total qui relève du mode d'assemblage des constituants du sol (MONNIER *et al.*, 1973).

Considérons le massif poreux résultant par exemple de l'encombrement d'un volume donné par des grains de sable. Le calcul de la porosité de ce massif, basé sur la connaissance de la densité de solide du sable, du volume encombré par l'empilement des grains et du poids du massif, permet de quantifier globalement l'ensemble des espaces poraux résultant des assemblages variés réalisés entre grains. L'expérience montre qu'en définissant les conditions de mise en place des grains dans le volume de mesure, on obtient une reproductibilité satisfaisante de la valeur de porosité.

Cette valeur de porosité est bien une conséquence de l'arrangement des constituants. Mais il n'y a pas, *a priori*, de relation univoque entre arrangement et porosité, différentes associations de constituants pouvant conduire à une même valeur de porosité.

C'est en standardisant les modes opératoires, en utilisant des mélanges de constituants définis par leur nature, leur forme, leur distribution dimensionnelle, que l'on a pu, lors d'études conduites au laboratoire, préciser *a posteriori* les relations pouvant exister entre porosité et assemblage.

Ainsi, dans le cas de particules appartenant aux classes granulométriques des limons ou des sables, ces études ont permis de relier la porosité des massifs réalisés aux caractéristiques de taille, de forme, de distribution dimensionnelle des constituants, en explicitant les conséquences de ces caractéristiques sur les interactions stériques entre particu-

les (YERAZUNIS *et al.*, 1962 ; STAPLE, 1975 ; CHRETIEN, 1971 ; FIES, 1978).

Cependant, cette dépendance n'est pas absolue et peut être modulée par les modalités de mise en place des différents constituants, en particulier l'énergie apportée pour permettre un arrangement plus serré ou plus lâche des particules.

Dans le cadre plus général des matériaux présentant une phase argileuse — il s'agit d'une fraction 0-2 μm constituée de phyllites — les études ont principalement porté sur des mélanges argile-squelette préparés à une teneur en eau voisine de la limite de liquidité, puis soumis à une dessiccation.

Dans ces conditions expérimentales, on a pu relier la porosité texturale d'un mélange à un assemblage équivalent, dans lequel la phase argileuse enrobe les grains du squelette (FIES, 1971). Cependant, les caractéristiques qualitatives et quantitatives de l'espace poral ne sont plus ici en relation directe avec les caractéristiques de forme ou de taille des constituants mais dépendent des déformations, consécutives à une dessiccation ou à une réhumectation de la phase argileuse, modulées par la présence des particules du squelette (FIES, 1978).

Par ailleurs, en soumettant de tels systèmes à un compactage dynamique, il apparaît possible de modifier l'arrangement réciproque des phases argile et squelette, en fonction de l'énergie mise en jeu et de l'état d'hydratation du système (FAURE & FIES, 1972).

Ici encore, une valeur de porosité texturale peut être définie, pour un matériau de constitution donnée, en fonction de l'énergie appliquée au système, qu'il s'agisse d'une histoire hydrique entraînant des contraintes liées à la déformation de la phase argileuse ou de l'application d'une contrainte mécanique.

D'une manière générale, la notion de porosité texturale fait donc intervenir le terme de constitution au sens large, englobant non seulement la distribution dimensionnelle et la forme, mais également la nature des constituants. Par ailleurs, cette notion ne peut être définie indépendamment d'un certain contexte énergétique correspondant, par exemple, au potentiel hydrique du système, à la variation de potentiel subie au cours d'une histoire hydrique, à l'équivalent en pression des énergies mécaniques appliquées, etc...

On doit maintenant s'interroger sur la signification de la notion de porosité texturale dans le cas des matériaux naturels. *A priori,* peuvent en effet intervenir les processus de mise en place des constituants (pédogenèse) et ceux liés à l'existence de gradients hydriques. Ceci peut rendre difficile ou impossible la mise en évidence d'une dépendance entre constitution physique et porosité, compte tenu des niveaux d'énergie, *a priori* variés, auquel un même système peut être soumis dans les conditions naturelles.

Cependant, dans ce domaine, un certain nombre d'éléments importants ont été récemment dégagés.

Il en est ainsi de la mise en évidence de la constance dans le temps de la porosité texturale d'un sol de limon loessique du Bassin parisien, mesurée à un même état d'hydratation. Cette constance traduit, pour une constitution physique donnée, l'état d'équilibre des assemblages vis-à-vis du régime de contraintes subi périodiquement par le sol, en particulier lors des variations d'humidité (STENGEL, 1979).

Par ailleurs, l'étude de la variation des valeurs de porosité texturale en fonction de la teneur en argile, observée sur un matériau naturel, montre que le sens des variations et l'ordre de grandeur de la pente sont compatibles avec ceux obtenus sur des mélanges réalisés au laboratoire, la gamme des teneurs en argile considérées allant de 20 à 30 p. 100 (STENGEL, 1979).

Dans le domaine de la micromorphologie, une étude des organisations observées sur les lames minces, réalisées dans des matériaux à dominante sableuse, suggère qu'il existe une convergence marquée entre la morphologie des assemblages et la constitution granulométrique (BREWER, 1979 ; CHRETIEN, 1979).

Ces résultats concernent des domaines limités quant aux variables de constitution prises en compte. Ceci nous a conduits à rechercher dans quelle mesure la porosité textutale de matériaux naturels pouvait être mise en relation avec leur constitution, en particulier leur composition granulométrique.

Dans la démarche qui va être présentée, c'est la variable *densité texturale* qui est retenue. Cette variable est en effet, à la densité de solide près, une conséquence de l'organisation des constituants au même titre que la porosité texturale. Ce faisant, nous avons admis que les variations de densité de solide pouvaient être relativement faibles dans notre échantillonnage, en raison de la gamme de constitution retenue.

Dans ce premier article, la méthode de mesure de la densité texturale est décrite et discutée.

Ces résultats relatifs aux sols naturels seront discutés dans un second article.

II. CHOIX DES MATÉRIAUX NATURELS

Les caractéristiques pédologiques et les classes granulométriques des 21 matériaux retenus sont présentées au tableau 1. Elles proviennent en particulier d'une étude pédologique de la vallée du Rhône (BORNAND & GUYON, 1969).

Ces matériaux ont été choisis afin de disposer d'un ensemble très large de compositions granulométriques. Nous avons, par ailleurs, éliminé *a priori* des matériaux trop particuliers parce que trop riches en matières organiques $\left(100 \frac{\text{MO p. 100}}{\text{A p. 100}} > 10\right)$ ou en carbonates (CO_3Ca p. 100 > 30), ou encore ceux présentant des constituants de taille supérieure à 2 mm, en raison du problème de mesure que pose, nous le verrons, la détermination de la densité texturale de matériaux à constituants trop grossiers (MO = matière organique ; A = fraction 0-2 μm).

Sur le terrain, des volumes d'environ 1 000 cm^3 ont été prélevés. Les matériaux cohérents ont été abrités, après découpage, dans des boîtes métalliques. Les matériaux fragiles ont, avant d'être dégagés, été scellés à la paraffine dans des anneaux.

Les prélèvements ont été généralement effectués à une profondeur supérieure à 20 cm, afin de limiter d'éventuels effets de tassement, les zones de prélèvements n'ayant pu être choisies en dehors de parcelles cultivées.

L'ensemble de ces échantillons a ensuite été séché à l'atmosphère du laboratoire.

III. PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS REMANIÉS

Les échantillons sont malaxés à une teneur en eau voisine de 1,9 fois leur humidité équivalente. Après 12 h, la teneur en eau est ajustée empiriquement par élimination de l'eau

TABLEAU I

Sols et horizons prélevés
Soils and sampled horizons

Type génétique	Horizon étudié	Profondeur de prélèvement en cm	Type textural	Référence	Localisation
Sol brun saturé	(B) C	70-95	limon sableux	11	Vallée du Rhône* : région de Tain - Albon - St Sorlin - St Donat (Etude pédologique BORNAND-GUYON, 1969)
Sol brun lessivé	B_1	30-50	argile limono-sableuse	16	
Sol lessivé recalcarisé à pseudogley et concrétions ferriques	A (B)	38-45	limon sablo-argileux	55_1	
	B_1Fe	55-65	limono-argilo-sableux	55_2	
	B_2 g Fe	72-85	argile limono-sableuse	55_3	
Sol brun lessivé	B	55-75	limon argileux	75	
Sol brun sur argile pliocène acide	B_2C	45-55	argileux	116	
Sol brun calcaire sur lœss	(B)	50-70	limon sablo-argileux	118	
Sol brun lessivé	A_{11}	25-45	limon sablo-argileux	128	
Sol alluvial calcaire à pseudogley moyennement profond	A_1	45-55	limon sablo-argileux	129_1	
	(B) C g	68-78	argile limono-sableuse	129_2	
Sol brun modal	A (B)	35-50	sable argileux	131_1	
	(B) C_1	65-80	sable	131_2	
Sol brun modal	A (B)	30-50	sableux	145_1	
	B C_1	80-95	sableux	145_2	
Sol brun calcaire à tendance vertique	$(B)_v$	45-55	argileux	Vig.	Les Vignères - Avignon
Sol brun eutrophe	A p	20-25	limon argileux	St. Aub.	St. Aubin - Vendée
Sol lessivé dégradé hydromorphe	A p	10-20	limoneux	Sar.	Marçon (Sarthe)
Sol brun faiblement lessivé	A p	7-15	argile limoneuse	Boi.	Boigneville (Essonne)
Sol brun faiblement lessivé	B_2	65-70	argile limoneuse	HB.	Versailles
Sol lessivé peu hydromorphe, faiblement dégradé	A p	10-20	limon argileux	Rh.	Le Rheu - Bretagne

en excès ou apport d'eau, de manière à obtenir, par malaxage d'une dizaine de minutes, une pâte homogène.

Les échantillons sont alors desséchés selon l'un ou l'autre des processus suivants :

— *une histoire hydrique standard* (MONNIER & KHEYRABI, 1968) qui correspond à un ressuyage par le vide de la trompe à eau (5 h) suivi par un séchage à l'atmosphère du laboratoire, puis à l'étuve à 105 °C (fig. 1*a*) ;

— *une histoire hydrique modulée*, dérivée d'une méthode de détermination de la capacité au champ (FEODOROFF & BETREMIEUX, 1964). Le ressuyage (24 h) est ici provoqué par la mise en contact de la pâte initiale avec une quantité suffisante du même sol séché à l'air. Il est suivi du séchage à l'atmosphère puis à l'étuve (fig. 1*b*).

Chacune de ces préparations vise à éliminer l'espace poral d'origine structurale (fissures et cavités d'origine biologique) et à assurer l'homogénéité de la répartition des constituants dans l'éprouvette réalisée.

L'introduction de deux modes de préparation a été retenue afin de faire apparaître un effet de l'histoire hydrique sur l'organisation des constituants et définir une technique de réalisation d'échantillons de référence.

IV. ESTIMATION DE LA DENSITÉ TEXTURALE

A. Principe

D'une manière très générale, la densité mesurée d'un échantillon de sol naturel est d'autant plus élevée que le volume de cet échantillon est petit. Un exemple de cette relation est donné par la figure 2.

Le problème se pose évidemment de définir les critères permettant d'assimiler une densité mesurée à la densité texturale.

Un critère essentiel apparaît être le faible volume de l'échantillon. Plus celui-ci est petit, plus la probabilité

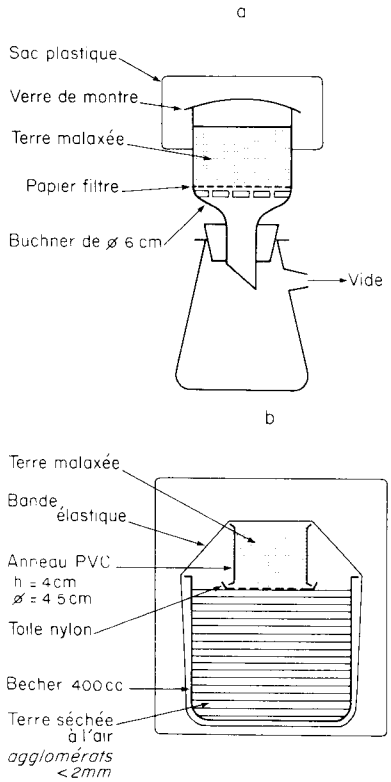

Figure 1

Préparation des échantillons remaniés.
a) dispositif de ressuyage standard,
b) dispositif de ressuyage modulé.

Preparation of remoulded samples.
a) standard desiccation,
b) modulated desiccation.

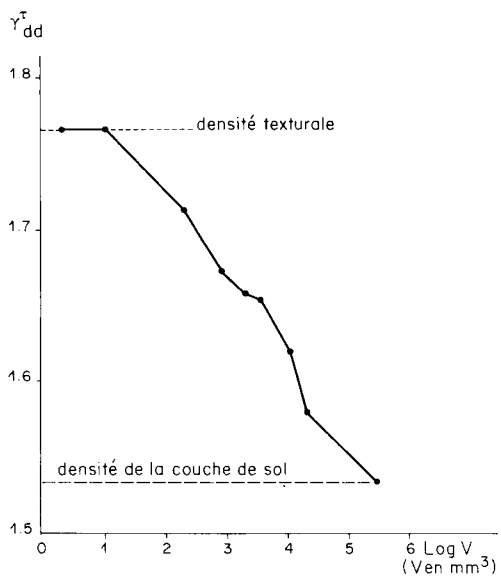

Figure 2

Variation de la densité en fonction du volume (V) des échantillons isolés par tamisage dans un sol limono-argileux.

Bulk density versus volume values (V) of sieve sampled peds from a silty-clayey soil.

d'éliminer de l'échantillon un espace poral grossier — lié à l'activité biologique ou à une fissuration selon une maille grossière — est grande. Cependant, il apparaît nécessaire que le plus petit volume mesuré présente encore une granulométrie qui reste représentative de celle de l'échantillon total. Si ce critère est difficile à mettre en pratique, il permet cependant de poser que le volume sur lequel porte la mesure doit, évidemment, être supérieur à celui du constituant le plus grossier présent dans l'échantillon.

Il apparaît donc raisonnable, dans la pratique, d'assimiler la densité mesurée sur des agglomérats terreux tamisés entre 2 et 3 mm, à la densité texturale. Il faut noter que dans ce cas, la mesure porte sur une prise d'environ 2 g, représentant environ une centaine d'agglomérats.

Cependant, pour des raisons techniques liées à la définition du volume des échantillons, on verra que l'on est conduit à réaliser la mesure de la densité sur des échantillons de dimension bien supérieure, dans le cas de constitutions granulométriques grossières. Par contre, pour des matériaux très argileux, on peut définir la densité texturale en prélevant des agglomérats dont la taille est voisine de 1 mm.

En l'absence d'une caractérisation morphologique de l'espace poral permettant d'attribuer sans ambiguité une fraction de cet espace à l'espace poral textural, la mesure de densité sur un volume suffisamment petit, dans le cadre des limites que l'on vient de dessiner, représente la meilleure approximation de la densité texturale.

B. Mesure du volume des échantillons et expression des résultats.

Le volume de chaque échantillon, naturel ou remanié, est déterminé après saturation dans le pétrole, jusqu'à taux constant, ressuyage de l'excès de pétrole et mesure de la poussée d'Archimède dans le même liquide (MONNIER *et al.*, 1973).

Les résultats sont exprimés en densité texturale, calculée après mesure du poids et du volume des échantillons secs.

On a par convention :

γ^{τ}_{dd} : densité texturale de l'échantillon naturel,

γ^{1}_{dd} : densité texturale de l'échantillon remanié.

C. Limites propres à la technique de mesure sur agglomérats

1. *Influence de la granulométrie*

Dans le cas des agglomérats, on a vu que la mesure de volume comprend une phase de ressuyage après imprégnation par le pétrole.

Cette phase cruciale définit la limite physique du volume qui va être soumis à la mesure. Ce ressuyage doit permettre en effet d'éliminer l'excès de pétrole présent à l'état de film autour des agglomérats sans toutefois vider les pores.

Les limites de cette technique ont été étudiées sur des échantillons remaniés, afin de réduire les causes de variation en travaillant sur des échantillons homogènes quant à la constitution et à la disposition relative des constituants pour toute la gamme des volumes mesurés.

En ce qui concerne les matériaux des classes granulométriques limoneuse à argileuse, un ressuyage sur papier filtre s'est révélé tout à fait adapté, la valeur de la densité pouvant être estimée à moins de 0,5 p. 100 près (MONNIER *et al.*, 1973).

Il a par ailleurs été démontré, sur des échantillons remaniés par malaxage et ayant subi une histoire hydrique standard, que la densité mesurée par la méthode au pétrole était bien indépendante du volume choisi pour la mesure et gardait une valeur constante propre à chaque type de matériaux. La figure 3 illustre les résultats obtenus sur ces échantillons pour des éléments dont la taille varie de 2 cm à

2 mm (SOUTY, comm. pers. ; FIES, 1978). Ceci montre en particulier que l'erreur systématique dans la mesure du volume des petits agglomérats, due à la formation de ménisques au niveau des pores (CURRIE, 1966), reste négligeable et qu'il est donc possible d'apprécier sans biais une densité texturale sur des agglomérats.

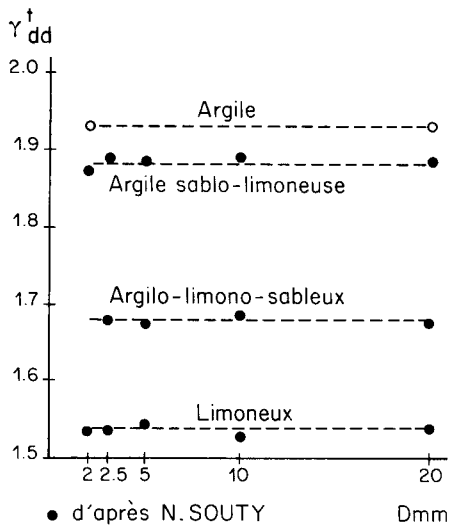

Figure 3

Indépendance de la densité texturale vis-à-vis du diamètre (D) des échantillons soumis à la mesure, dans le cas de matériaux remaniés riches en limon ou en argile.

Non dependency of textural bulk density upon the diameter of remoulded samples, in the case of silty or clayey materials.

Cependant, pour les classes granulométriques à faible teneur en argile ou à squelette à prédominance de sables grossiers, on constate un accroissement relatif de la densité quand diminue le volume de l'échantillon prélevé (tabl. 2). Ceci s'explique par un phénomène de vidange des pores, lors de la phase de ressuyage, conduisant à sous-évaluer le volume et donc à sur-évaluer la densité.

TABLEAU 2

Influence de la composition granulométrique sur la valeur de la densité texturale d'échantillons remaniés, estimée à l'échelle d'éléments motteux et d'agglomérats

The effect of particle size distribution on textural bulk density value of remoulded sample, measured on peds and soils aggregates

	Echantillons remaniés	
Classe granulométrique des échantillons	Mottes ($V \simeq 10$ cm^3) γ^t_{dd}	Prise de 2 g d'agglomérats 2-3 mm γ^t_{dd}
Argileux	2,027 ± 0,008	2,031 ± 0,006
Limon-argileux	1,833 ± 0,006	1,835 ± 0,005
Limon-argileux	1,725 ± 0,003	1,728 ± 0,007
Limon	1,628 ± 0,009	1,642 ± 0,006
Sableux	1,800 ± 0,009	1,868 ± 0,027
Sableux modèle	1,754 ± 0,015	2,004 ± 0,010

Nous avons cherché à réduire cette erreur en définissant la densité texturale sur des volumes supérieurs à ceux des agglomérats. Pour chercher à fixer un ordre de grandeur de la taille des échantillons à prendre en compte, une étude a été conduite sur un échantillon de granulométrie grossière par rapport aux matériaux que nous avons échantillonnés.

Il s'agit d'un sable tamisé entre 200 et 500 µm, malaxé en présence d'une solution diluée de gomme arabique. Ceci permet d'obtenir après séchage, un massif cohérent dans lequel il est possible de découper des échantillons de volumes variés.

Ainsi que le montre la figure 4, le choix de mottes d'une quinzaine de cm^3 permet encore une définition correcte de la densité texturale du massif.

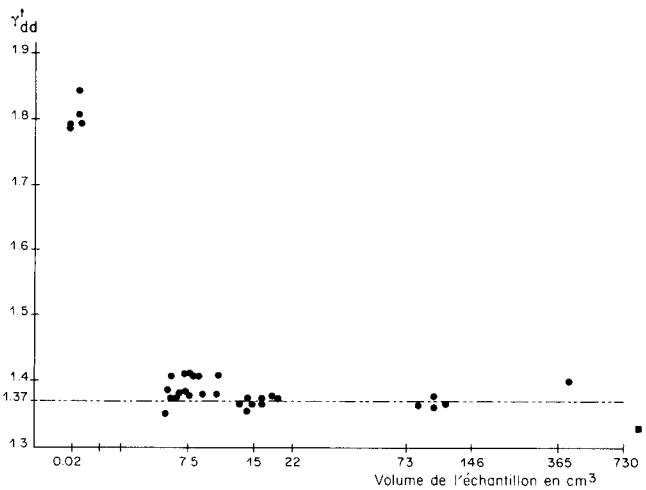

Figure 4

Détermination du domaine d'application de la technique de mesure de volume au pétrole, pour un matériau sableux (200-500 µm).
Le volume de 800 cm^3 est celui du moule de remplissage.
Un volume de 0,02 cm^3 correspond aux prises d'agglomérats tamisés entre 2 et 3 mm.
Limits to the use of the volume measurement technique in kerosene, for a sandy coarse material.
The mould volume value is 800 cm^3.
A value of 0.02 cm^3 is related to sample of aggregates 2-3 mm diameter.

En effet, la valeur palier observée pour des volumes variant de 400 à 10 cm^3 est très proche de celle calculée pour l'échantillon global (800 cm^3) après estimation du volume du moule. Cette dernière valeur représente cependant, par rapport à celle du palier, une sous-estimation de γ^t_{dd} car nous avons constaté un léger retrait périphérique du massif sableux consécutif au séchage.

Une telle mesure, indépendante de la technique au pétrole, permet néanmoins, en situant le niveau de la valeur de γ^t_{dd} du matériau considéré, de conférer au palier observé une signification de densité texturale.

2. *Mesure de la densité sur agglomérat individuel*

La mesure de densité sur agglomérats pris un à un peut être considérée comme un moyen d'aborder l'hétérogénéité du matériau.

Cependant, il est actuellement impossible de mesurer la granulométrie d'un échantillon dont le poids peut varier de 15 à 45 mg. Ensuite, l'expérience montre que, dans ce cas, la mesure de volume est entachée d'une variation dont l'amplitude représente 2 à 3 p. 100 en valeur relative.

Les résultats de mesures conduites sur un mélange de phyllites calciques inférieures à 2 µm (argile HB) et de

TABLEAU 3

Densité texturale d'agglomérats : comparaison entre valeurs obtenues sur agglomérats individuels et valeurs obtenues sur des prises de 2 g d'agglomérats (≃ 100 agglomérats)

Textural bulk density of soil aggregates : comparison between values obtained on aggregates taken singly and in numbers (2 g ≃ 100 aggregates)

Origine	Echantillon artificiel Argile HB 30 p. 100 et limon 2-10 µm		Echantillon naturel Classe granulométrique	
			Limon-argileux (Rh.)	Argile-limoneuse (Boi.)
Traitement	Histoire hydrique standard	Histoire hydrique modulée	Séchage à l'air	
Mesure	Agglomérats pris un à un			
Moyenne	1.777	1.788	1.820	1.880
Nombre	50	50	16	20
Ecart-type	0.021	0.022	0.094	0.094
Mesure	Prise de 2 g d'agglomérats			
Moyenne	1.735	1.734	1.740	1.850
Nombre	5	5	10	10
Ecart-type	0.006	0.002	0.021	0.008

limons 2-20 µm sont présentés au tableau 3. La teneur en argile du mélange (30 p. 100) et le choix du squelette très fin visent à réduire les erreurs inhérentes à l'épisode de ressuyage précédant la mesure de volume.

Par rapport aux mesures réalisées sur des prises de 2 g du même matériau, il apparaît tout d'abord que la mesure sur agglomérats individuels se traduit par un écart-type beaucoup plus élevé. Ceci peut avoir partiellement pour origine l'erreur indiquée au niveau de la mesure de volume. Par ailleurs, il est possible que ces variations traduisent une variation de la composition granulométrique des agglomérats. Pour un mélange argile HB-limon 2-10 µm (FIES, 1978), on a pu en effet obtenir la relation suivante entre la densité texturale du mélange (mesurée sur des prises de 2 g d'agglomérats) et la teneur (A) en argile dans le mélange, avec 12 répétitions :

$$\gamma_{dd'} = 0{,}012\,6\ A + 1{,}361\,6$$

$$25\ \text{p. } 100 < A < 40\ \text{p. } 100$$

$$n = 12$$

$$r = 0{,}999^{***}$$

Il suffirait alors que la teneur en argile des agglomérats varie entre 27 et 33 p. 100 pour rendre compte des variations observées de densité.

Une seconde remarque concerne le fait que la valeur de la moyenne obtenue sur les agglomérats individuels est supérieure à celle obtenue avec des prises de 2 g. Il convient tout d'abord de noter que l'ensemble des 50 agglomérats mesurés individuellement ne représente que l'équivalent d'une prise de 1 g et qu'il peut donc y avoir un certain biais lié à l'échantillonnage. Le sens des écarts obtenus pour les deux groupes d'agglomérats peut laisser penser qu'il s'agit d'une erreur systématique, l'évaporation du pétrole durant la mesure de volume n'étant sans doute pas négligeable devant le volume de l'échantillon lui-même. Une mesure a montré que, dans les conditions où nous avons opéré, cette évaporation entraîne une surestimation de la valeur de densité. Cependant, cette surestimation, inférieure à 1 p. 100 en valeur relative, est inférieure à celle observée. L'origine des écarts de densité entre agglomérats individuels et prise de 2 g ne peut donc être entièrement expliquée par une erreur systématique de mesure.

Des remarques du même ordre peuvent être faites en ce qui concerne les mesures réalisées sur échantillons naturels. En particulier, l'écart-type obtenu sur agglomérats individuels est encore supérieur à celui observé sur échantillon remanié.

Compte tenu de ces résultats, les valeurs de densité texturales qui seront utilisées par la suite représenteront toujours, quand elles seront réalisées au niveau des agglomérats, des résultats obtenus sur des prises de 2 g.

3. *Influence de l'hétérogénéité des matériaux naturels*

Au choix d'un volume de mesure adapté à la composition granulométrique de l'échantillon, vient s'ajouter, dans le cas des matériaux naturels, le problème de l'hétérogénéité propre à leur origine.

Un premier exemple nous a été fourni par un échantillon que nous avons dû éliminer de notre collection. De composition limono-argileuse, cet échantillon présentait en fait une disposition stratifiée des constituants, à l'échelle millimétrique, en zone à dominante sableuse et zone à dominante argilo-limoneuse. Il a été impossible ici de définir la densité texturale propre à chaque zone. On peut, par ailleurs, s'interroger sur la signification d'une mesure de densité et d'une analyse granulométrique globales d'un tel matériau.

Un autre cas d'hétérogénéité est présenté par les échantillons limoneux à argilo-limoneux. Sur des cassures de ces matériaux, nous avons pu observer, à une échelle centimétrique, des zones d'aspect plus massif que celui des surfaces environnantes, cet aspect étant lié à une moindre présence de pores tubulaires dans ces zones.

Nous avons tenté d'apprécier l'incidence de cette hétérogénéité sur la valeur de la densité. Pour 6 matériaux, les

densités texturales mesurées sur des prises d'agglomérats représentant un échantillon complet de chaque matériau ont été comparées aux densités mesurées sur des prises d'agglomérats choisis dans les zones jugées plus massives. Les résultats présentés sur la figure 5 montrent qu'en général, le mode d'échantillonnage n'induit pas de différence significative dans l'appréciation de la densité texturale d'un matériau (en terme de porosité les écarts restent inférieurs à 2 p. 100 en valeur absolue) à l'exception toutefois de l'échantillon 118. L'accord global observé pour 5 des 6 échantillons peut s'interpréter en disant que la méthode de mesure de volume au pétrole est « autocorrectrice » en ce sens que, dans les agglomérats « tout venant », les pores grossiers encore présents se vident au cours du ressuyage. Il faut remarquer cependant qu'il est difficile de juger de la réalisation effective de l'échantillonnage des agglomérats « massifs », ce caractère n'étant apprécié que sur une surface et non en profondeur.

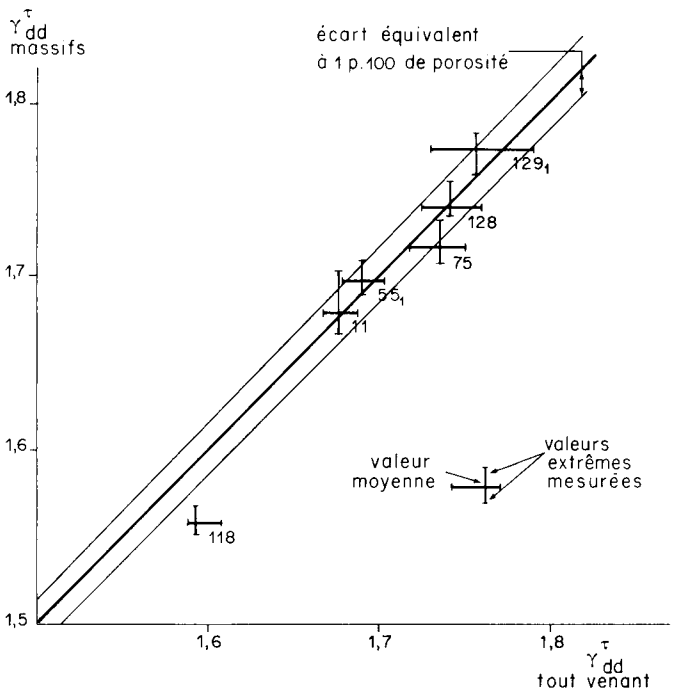

Figure 5

Comparaison de deux modes d'échantillonnage d'agglomérats de sols naturels, tamisés entre 2 et 3 mm.

— tout venant : prises d'agglomérats au hasard.

— massif : agglomérats choisis, présentant peu de pores visibles.

Comparison between two ways of sampling aggregates of natural soils (2-3 mm diameter).

— random sampling.

— sampling of visually compact aggregates.

En ce qui concerne l'échantillon 118, pour lequel la valeur de densité texturale la plus élevée est obtenue sur des prises d'agglomérats tout venant, on est conduit à penser que l'existence de zones plus ou moins massives est sans doute ici le signe de variations locales de granulométrie.

V. CONCLUSION

Nous nous sommes attachés, dans cette étude, à définir le domaine d'application d'une méthode de mesure de la densité texturale.

Si une étude préalable (MONNIER *et al.*, 1973) avait défini l'intérêt technique de la méthode utilisée et posé les bases d'une interprétation des valeurs obtenues en terme de densité texturale, il était nécessaire d'en évaluer les limites avant de l'appliquer à différents sols.

Il ressort des résultats obtenus que la mesure de la densité texturale de sols naturels ne peut être conduite systématiquement sur des échantillons de volume fixé *a priori*. Il est nécessaire de tenir compte de la composition granulométrique pour définir le plus petit volume d'échantillon à soumettre à la mesure. Cette attitude est imposée par la limite technique propre à une méthode par imprégnation au pétrole. Elle répond à la nécessité de travailler sur des échantillons dont la granulométrie doit rester représentative de celle du sol étudié.

Sur ces bases, nous allons présenter dans une étude suivante l'influence de la composition granulométrique sur la densité texturale des sols.

Reçu le 22 décembre 1980.
Accepté le 2 mai 1981.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bornand M., Guyon A., 1969. Etude pédologique dans la vallée du Rhône. *S.E.S. n° 106 - Montpellier.*

Brewer R., 1979. Relationships between particle size fabric and others factors in some Australian soils. *Aust. J. Soil Res.*, **17,** 29-41.

Chrétien J., 1971. Essai de caractérisation des sables en tant que squelette minéral du sol. *Ann. agron.*, **22** (6), 615-654.

Chrétien J., 1979. Etude expérimentale de la porosité de mélanges sables-argile. Aspects micromorphologiques. *Sci. Sol,* **4,** 333-353.

Currie J. A., 1966. The volume and porosity of soil crumbs. *Soil Sci.*, **17** (1), 24-35.

Faure A., Fies J. C., 1972. Etude expérimentale de la sensibilité à la compaction de matériaux meubles en fonction de leur composition granulométrique. *Ann. agron.*, **23** (3), 317-332.

Feodoroff A., Betremieux R., 1964. Une méthode de laboratoire pour la détermination de la capacité au champ. *Sci. Sol,* **2,** 109-118.

Fies J. C., 1971. Recherche d'une interprétation texturale de la porosité des sols. *Ann. agron.*, **22** (6), 655-685.

Fies J. C., 1978. Porosité du sol : étude de son origine texturale. Thèse U.L.P. - Strasbourg.

Monnier G., Kheyrabi D., 1968. Etude expérimentale de l'influence de la composition granulométrique des terres sur leur stabilité structurale. *Ann. agron.*, **19** (2), 129-152.

Monnier G., Stengel P., Fies J. C., 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** (5), 533-545.

Staple W. J., 1975. The influence of size distribution on the bulk density of uniformly packed glass particles. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **39** (3), 404-408.

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.

Yerazunis S., Bartlett J. W., Nissan A. H., 1962. Packing of binary mixtures of spheres and irregular particles. *Nature,* **195,** 33-35.