

L'analyse de la porosité: Application à l'étude du compactage des sols

J.Guérif

Institut National de la Recherche Agronomique, Centre de Recherches Agronomiques d'Avignon, Station de Science du Sol, Montfavet, France

RESUME

L'étude du compactage et de ses conséquences soulève de nombreux problèmes méthodologiques et notamment :

- Comment exprimer l'effet du compactage sur le sol ?
- Comment modéliser le processus de compactage des couches de surface sans satisfaire aux conditions d'homogénéité, d'isotropie et de continuité ?
- Comment évaluer en terme de risques pour la plante les effets du compactage ?

L'auteur propose d'utiliser comme état de référence la masse volumique résultante de l'assemblage des constituants évaluée sur des agrégats de 2-3 mm de diamètre.

Cette partition de l'espace poral en textural (intra-agrégats) et structural (inter-agrégats) permet une bonne interprétation du niveau de masse volumique, quelle que soit la teneur en eau.

Une analyse du processus de compactage, en distinguant des comportements mécaniques texturaux et structuraux, est proposée.

Des exemples de l'application de l'analyse des systèmes de porosité à l'étude des conséquences du compactage sont présentés et plus particulièrement l'interaction entre espace poral structural et transferts d'eau et de gaz (perméabilité, diffusivité) ainsi que les propriétés mécaniques résultantes.

ABSTRACT : SOIL COMPACTION : PORE SPACE ANALYSIS EFFICIENCY.

Several difficulties arise when studying soil compaction and its consequences on crop growth :

- How to express compaction responses in the soil ?
- How to predict soil compaction under wheel without assuming homogeneity, continuity and isotropy of top soil layers ?
- How to assess the real risks of crops consecutive to soil compaction ?

The author proposes to use, as a reference state, the bulk density due only to the packing of soil constituents, which may be measured on aggregates of 2-3 mm diameter.

This leads to a partition of pore space into "textural" (intra-aggregates) and "structural" (inter-aggregates) pore spaces, which allows a good interpretation of bulk density at any water content.

An analysis of compaction process, distinguishing textural and structural mechanical behaviours is proposed.

Examples of using this pore space partition for the study of the consequences of compaction are given. The interaction between structural pore space and water and gas transfer (permeability, diffusivity) as well as mechanical properties (soil strength) are emphasized.

INTRODUCTION

Les difficultés d'étudier le compactage des sols agricoles, et surtout de l'interpréter en terme de risque pour les cultures en cours et à venir, sont d'ordre différents et concernent :

- L'évaluation des modifications de l'état physique de la couche de sol tassée, le choix des variables à analyser et donc le choix des mesures physiques à mettre en œuvre. Ainsi, l'augmentation de compacité, appréciée en bilan de volume, est une variable qui décrit insuffisamment les modifications de l'espace poral (formes des pores, organisation, connexité, ...) qui sont à l'origine des modifications des propriétés de transfert (gaz, liquide, chaleur) ou des propriétés mécaniques (résistance à la pénétration, résistance à la rupture) susceptibles d'affecter le fonctionnement du système racinaire (fonction puit, implantation) directement ou indirectement par la qualité du travail du sol postérieur à la phase de compactage.

- La modélisation des phénomènes de compactage (nécessaire pour l'analyse des mécanismes, comme pour la prévision de la dégradation des sols). Les couches de surface des sols agricoles ne répondent que rarement aux hypothèses d'homogénéité, de continuité, et d'isotropie, généralement admises dans les modèles existants d'une part, au niveau de l'évaluation de la transmission des contraintes en profondeur (on utilise généralement la formule de Soëhn) d'autre part, et dans une moindre mesure, au niveau de la relation contrainte déformation (Guérif, 1984).

- L'évaluation du niveau de risque qu'entraînent les modifications de l'état physique du sol par compactage et leurs conséquences pour le fonctionnement de la plante en place ou pour l'implantation de la future culture. En effet, cette évaluation doit être pondérée en fonction de la nature et de l'intensité des événements climatiques probables. Ceux-ci peuvent, en effet, augmenter ou atténuer les risques, voire contribuer, à une régénération de l'état structural.

EXPRESSIONS PHYSIQUES DE LA COMPACITE

La compacité ou ses variations sont le plus souvent évaluées directement par des mesures combinées de masse et de volume ou indirectement par des mesures étalonnées, bien sûr, par rapport à des mesures de masse et de volume, telles les mesures de variation de cote ou les mesures de l'atténuation ou de la rétrodiffusion de rayonnement gamma (Soane, 1976 ; Soane and Henshal, 1979 ; Stengel, 1985 ; Raghavan et al., 1976).

Dans la majorité des cas, dans la littérature internationale, les résultats de ces mesures s'expriment donc sous forme de masse-volumique, rapport de la masse de solide au volume de l'échantillon de sol considéré.

Suivant les disciplines (Hydrologie, Génie Civil, Agronomie) et suivant les auteurs, la compacité est exprimée par différentes combinaisons de bilan de volume.

$\frac{\text{volume des pores}}{\text{volume total}}$: porosité (porosity) n %

$\frac{\text{volume des pores}}{\text{volume de solide}}$: indice des vides (void ratio) e Génie Civil

$\frac{\text{volume total}}{\text{volume de solide}}$: volume spécifique (specific volume) $1 + e$
Kurtay and Reece : Critical State theory

$\frac{\text{volume de solide}}{\text{volume total}}$: "packing density" $\frac{1}{1 + e} = D$
Dexter et Tanner

LES ETATS DE REFERENCES

Dans la littérature

Quelle que soit l'expression de compacité choisie, cette variable ne permet pas, d'une manière satisfaisante, d'interpréter des variations de comportement (hydriques (transferts), ou mécaniques) d'un sol à un autre, ou entre deux états physiques d'un même sol.

De nombreux auteurs ont tenté de résoudre le problème en définissant un système de référence permettant de situer un état physique donné par rapport à un état physique standard considéré comme caractéristique du matériau.

Ainsi, pour relativiser l'intensité d'un tassement, on peut faire référence à un état de compacité obtenu par un protocole de compactage standard.

- Une charge et son mode d'application

- masse volumique au maximum Proctor ($\rho_{d \max}$). Pigeon et Soane (1977) ont ainsi défini une compacité relative ("relative compaction") $\rho_d / \rho_{d \max}$

- masse volumique obtenu après une compression statique uniaxiale confinée de 200 kPa (2 kg/cm²). Hakansson (Eriksson et al., 1974) a défini de la même manière un "degré de compacité" $\rho_d / \rho_{d \text{ standard}} \cdot 100$ % (degré of compaction). Aucune caractéristique physique initiale de l'échantillon (notamment hydrique) n'est définie.

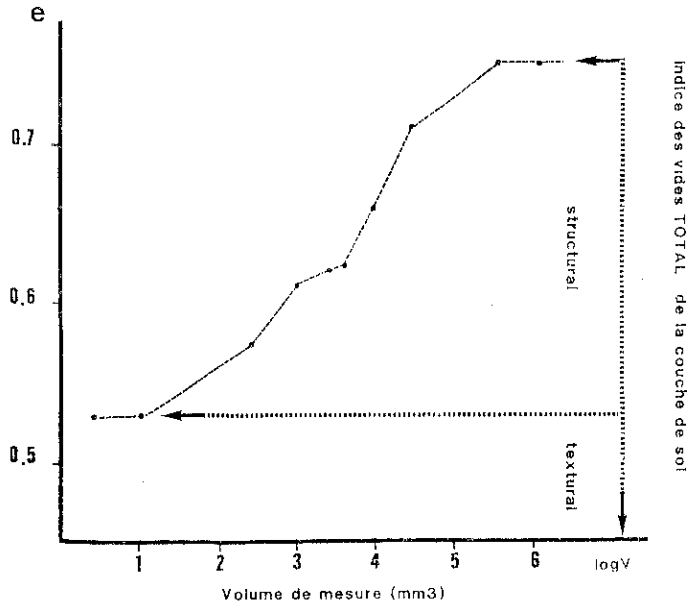


Fig. 1 Variations de l'indice des vides (e) d'une couche de sol en fonction du volume de mesure (V).
Variation of the top soil layer void ratio with the volume of soil upon which the measurement is done.

- Un test de compactage par incréments successifs de la charge.

L'état de référence est défini par l'asymptote de la courbe de compression (Dexter et Tanner, 1973).

Par ailleurs, pour relativiser le volume et la taille des pores, d'un sol à l'autre et d'un état physique à l'autre, on fait fréquemment appel à la notion de micro et de macroporosité. La limite arbitraire entre ces deux classes de pores est choisie pour une succion variable suivant les auteurs et en fonction des types de sol entre quelques dizaines et quelques centaines de mbar.

Ces systèmes de référence sont établis pour un état hydrique donné du matériau et ne permettent donc pas de caractériser l'état physique d'une couche de sol quelle que soit sa teneur en eau.

L'analyse du système de porosité

Fies (1971), Monnier et al. (1973), Stengel (1979), Fies et Stengel (1981) proposent un système de référence où l'hypothèse de base consiste à admettre qu'une fraction de l'espace poral résulte de l'assemblage des particules élémentaires constitutives du sol. Elle est déterminée essentiellement par les caractéristiques de ces particules (taille, forme, nature minéralogique, garniture ionique)

et leur état d'hydratation. Cette fraction est appelée **porosité texturale**. Son complément dans la porosité totale est appelé **porosité structurale**. Cette dernière varie sous l'effet d'actions extérieures que subit le matériau : travail du sol et tassements mécaniques, actions climatiques et biologiques.

Le caractère opérationnel de cette analyse dépend de la capacité à mesurer l'une de ces fractions de l'espace poral.

L'analyse des relations entre le volume d'un échantillon et sa porosité nous a conduit à supposer que la porosité contenue dans un fragment de matériau dont le volume est suffisamment petit est essentiellement d'origine texturale (fig. 1). Et on a constaté qu'en mesurant la porosité d'agrégats obtenus par rupture et tamisage entre 2 et 3 mm, on obtenait une valeur, qui, pour un matériau donné :

- à l'état sec varie peu au cours du temps,
- est liée à la teneur en eau par une courbe de retrait-gonflement qu'on peut également considérer comme stable (fig. 2).

Par ailleurs, à l'état sec, cette porosité est étroitement corrélée à la constitution des matériaux (teneur en argile, teneur en matières organiques).

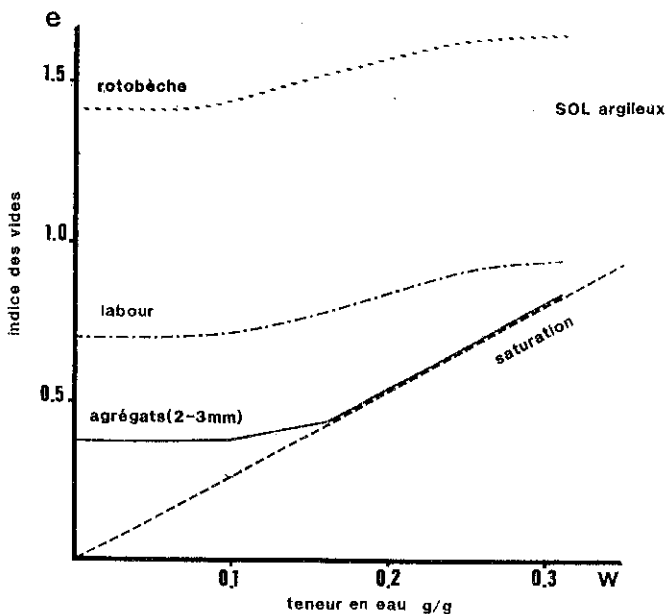


Fig. 2 Courbes de retrait de couches de surface d'un sol argileux travaillé et courbe de retrait textural évaluée sur des agrégats de 2-3 mm. Shrinkage curves of a clayey soil, measured on tilled layers (rotary spade machine, and ploughed) and on aggregates (2-3 mm diameter).

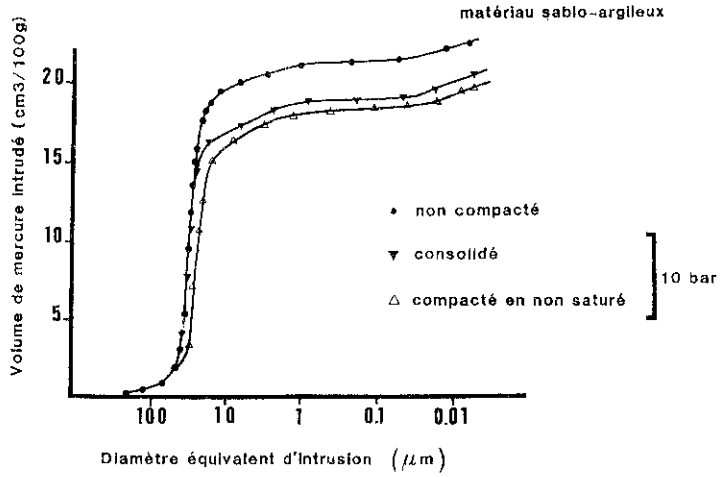


Fig. 3 Courbes d'intrusion de mercure : Effet du compactage sur l'espace poral textural d'un sol sablo-argileux.
Mercury intrusion curves : Effect of compaction on the "textural" pore space (sandy clay soil).

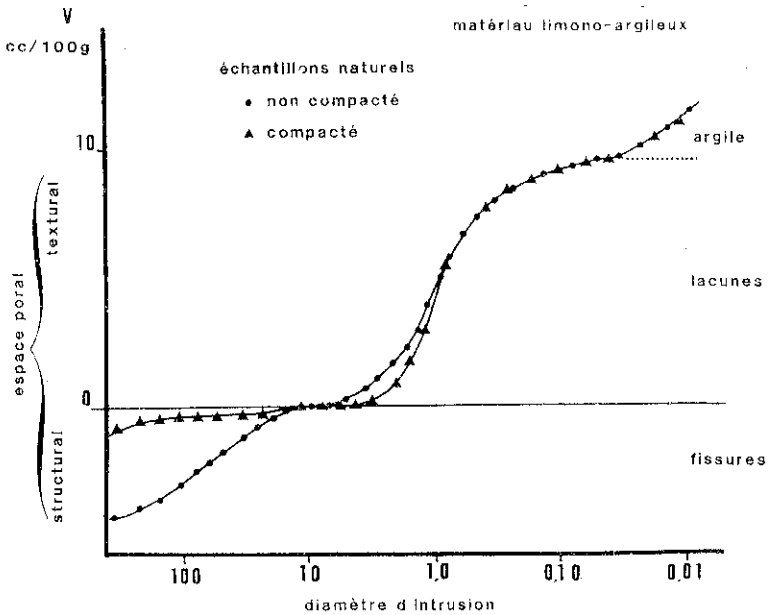


Fig. 4 Courbes d'intrusion de mercure : Effet du compactage sur l'espace poral textural d'un sol limono-argileux.
Mercury intrusion curves : Effect of compaction on the textural pore space (silty clay soil).

Cet ensemble de constatations permet d'assimiler la porosité d'agrégats à la porosité texturale.

La possibilité d'utiliser cette analyse pour l'étude des phénomènes de compactage et de leurs conséquences dépend de la stabilité de la porosité texturale vis-à-vis des actions de compactage, au moins dans la gamme de pressions rencontrées en conditions agricoles. Seul, l'assemblage des constituants des matériaux très sableux (fig. 3) semble affecté d'une manière significative par les actions mécaniques (Fies et Zimmer, 1982).

Il n'a pas été possible de mettre en évidence, par des procédés de compactage de laboratoire, des variations de l'assemblage des constituants pour les matériaux argilo-limoneux (fig. 4) (Fies et Guérif, non publié).

- La porosité structurale est seule, ou de façon très prédominante, affectée par l'action d'agents extérieurs (à une humidité donnée) (fig. 5). Elle est donc une meilleure caractéristique des effets de ces actions que la porosité totale. Vis-à-vis des actions anthropiques en particulier, et en adoptant un point de vue d'ingénieur, l'analyse de la porosité permet d'isoler la porosité sur laquelle on agit et celle qu'on ne peut pratiquement pas modifier.

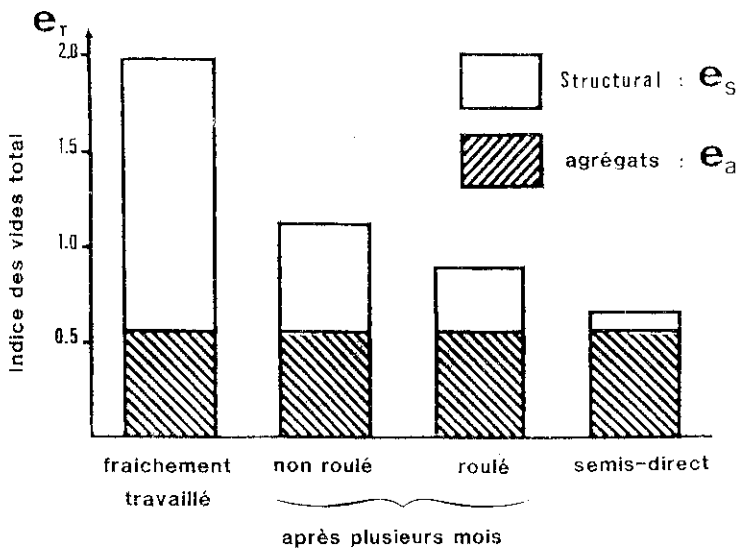


Fig. 5 Analyse du système de porosité à différents niveaux de tassement. Le sol est la capacité au champ.
Pore space partition at different state of compaction (just tilled, after several months : unwheeled and wheeled, direct-drilled).

- On peut par analyse de la porosité comparer les effets de ces actions à différents teneurs en eau et dans différents matériaux, en tenant compte de l'état de gonflement du moment de la mesure. Cela est impossible à partir de mesures de la porosité totale ou de la division en macro et micro porosité, cette dernière n'étant valide qu'à une succion donnée.

L'ANALYSE DU SYSTEME DE POROSITE DANS L'ETUDE DES MECANISMES DE COMPACTAGE

Le comportement au compactage des couches de sols travaillées fait intervenir :

- les propriétés mécaniques résultant des contacts et frottements entre les éléments structuraux (mottes, agrégats, terre fine) constitutifs de la couche de sol.

- les propriétés mécaniques des éléments structuraux eux-mêmes.

Les tests de compactage, effectués en laboratoire, sur des massifs d'agrégats, sont à cet égard très éclairant.

Ainsi, Faure (1980) définit deux domaines hydriques de comportement au compactage.

- Un domaine où le compactage dépend du concassage et du réarrangement des agrégats,

- Un domaine où les agrégats deviennent déformables avec l'entrée en plasticité de la phase argileuse.

De même, Braunack et Dexter (1978) font intervenir dans leur modèle de compressibilité d'un massif, la résistance à l'écrasement propre aux agrégats. Collis-George et Lloyd (1978) estiment les contraintes de cisaillement d'un lit de semences à partir du frottement des agrégats entre eux et non du frottement entre constituants minéraux. Ce frottement entre agrégats diminue quand la teneur en eau augmente (Guérif, 1982).

On peut donc envisager d'interpréter les comportements au compactage des couches de sol travaillés et donc discontinues en distinguant :

- les caractéristiques mécaniques intrinsèques au matériau, résultantes de l'assemblage des éléments minéraux constitutifs et donc texturales.

- les caractéristiques mécaniques résultantes de l'assemblage des éléments structuraux (mottes et agrégats) et donc structurales.

On peut ainsi définir trois domaines hydriques de comportement au compactage (fig. 6) à partir des comportements mécaniques texturaux :

- $W < W_1$: l'amplitude du tassement est faible. Elle est fonction de la résultante de la pression appliquée et des frottements entre agrégats. Elle

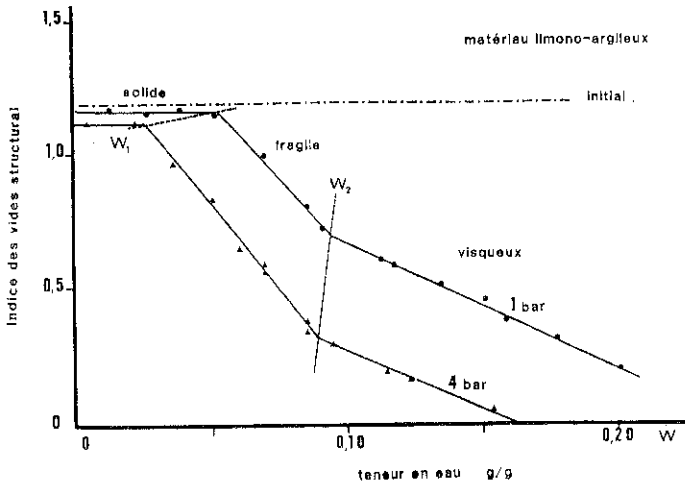
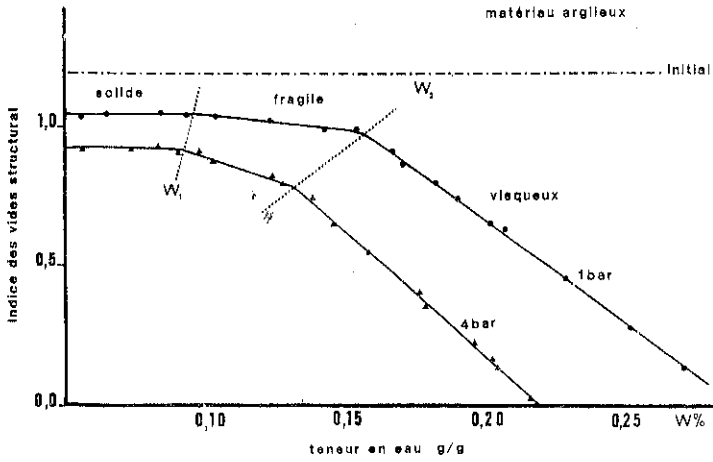


Fig. 6 Compactage de massifs d'agrégats : effet de la teneur en eau et de la pression appliquée sur l'indice des vides structuraux.
Compaction of aggregates'bed : effect of water-content and pressure on structural void ratio.

est indépendante du temps d'application. Les agrégats ont un comportement **SOLIDE**. Leur résistance à l'écrasement est grande par rapport aux contraintes qui se développent dans le massif.

- $W_1 \leq W \leq W_2$: à l'humidité W_1 la résistance à l'écrasement des agrégats est de l'ordre de grandeur des contraintes auxquelles ils sont soumis. L'augmen-

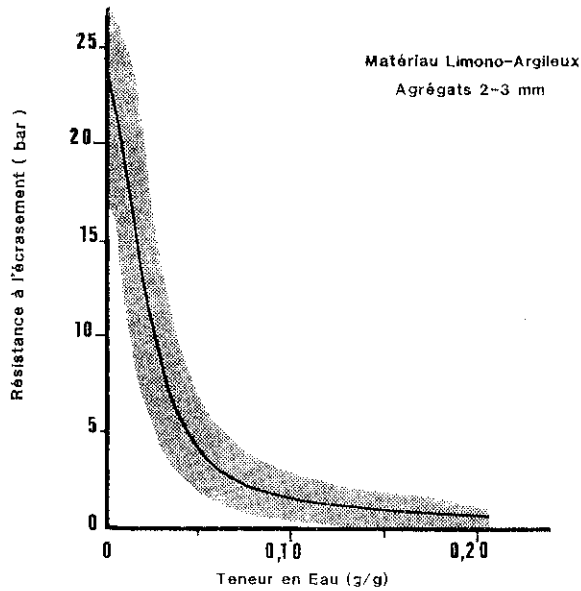


Fig. 7 Variations de la résistance à l'écrasement d'agrégats en fonction de leur teneur en eau.
 "Textural" tensile-strength versus water content measured on aggregates (2-3 mm diameter).

tation de l'humidité s'accompagne d'une diminution rapide de la "cohésion texturale" (fig. 7). Les agrégats deviennent **FRAGILES**. Le tassement du massif résultera du réarrangement des petits morceaux issus de la rupture.

- $W \geq W_2$: dans cette gamme de teneur en eau, on ne peut plus considérer la déformation comme instantanée. Le comportement sous charge est alors **VISQUEUX**. L'amplitude de déformation est en effet fonction du temps d'application de la charge.

L'ANALYSE DU SYSTEME DE POROSITE DANS L'ETUDE DES CONSEQUENCES DU COMPACTAGE

Au niveau des propriétés mécaniques

L'augmentation de la résistance à la rupture d'un massif d'agrégats avec l'augmentation de sa compacité (fig. 8) par compactage dépend :

- de l'intensité des forces de liaison qui ont pu se rétablir entre éléments structuraux : le niveau de coalescence des agrégats dépend de l'interaction humidité-intensité de compactage.

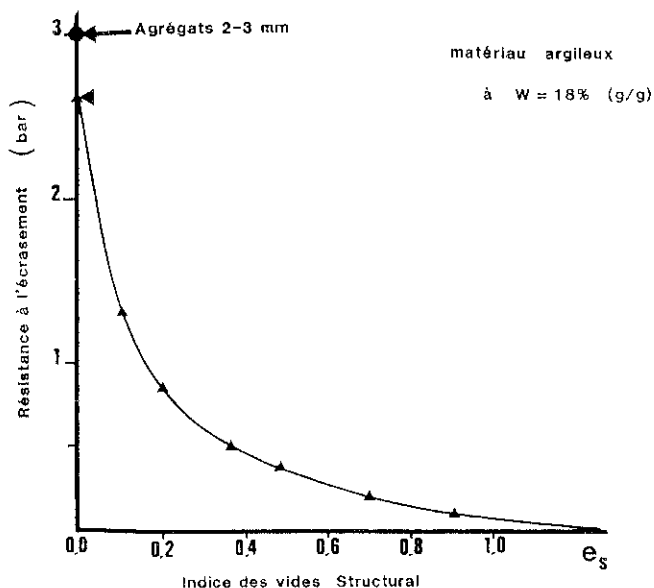


Fig. 8 Résistance à l'écrasement de massifs d'agrégats, compactés à une humidité donnée ($\psi = 5$ bar), en fonction de l'indice des vides structural.

"Structural" tensile strength at a given moisture content ($\psi = 5$ bar) versus structural void ratio.

- de la surface de contact entre éléments structuraux ; celle-ci est fortement corrélée à l'indice des vides structural.

Au niveau des propriétés de transferts

Une quantification de l'espace poral structural semble être une variable prometteuse dans la modélisation de certains phénomènes de transfert :

Ainsi, Fies a montré que le coefficient K de Darcy en saturé pouvait être ajusté de façon satisfaisante à une fonction ayant la forme de la relation de Kozeny en ne faisant intervenir que la porosité structurale (fig. 9). De même, Bruckler (à paraître) a montré que la diffusivité en phase gazeuse, évaluée avec le dispositif de Ball, pouvait être modélisée par la loi de Fick en faisant notamment intervenir une "porosité de transfert" pouvant s'interpréter comme l'espace poral structural.

CONCLUSION

Cette partition dans l'espace poral, en fonction de son origine soit texturale, soit structurale, semble prometteuse à la fois dans l'étude des mécanismes,

mais aussi des conséquences du compactage des couches de surface des sols agricoles.

Elle répond à un souci de pouvoir faire référence à un état bien défini pour apprécier l'intensité du compactage mais aussi pour pouvoir comparer différents matériaux en différentes situations.

Elle devrait permettre une approche de la mécanique des milieux discontinus certes moins analytique, mais plus réaliste que celles qui existent actuellement.

En comptabilisant la part de l'espace poral affecté par le compactage, cette analyse du système de porosité devrait permettre d'analyser les conséquences des actions de compactage pour les propriétés mécaniques et les propriétés de transferts.

Il convient néanmoins de compléter cette évaluation aveugle du volume poral affecté par le compactage par une appréciation quantitative des modifications de ses caractéristiques morphologiques (cf. articles de Stengel et Pagliai).

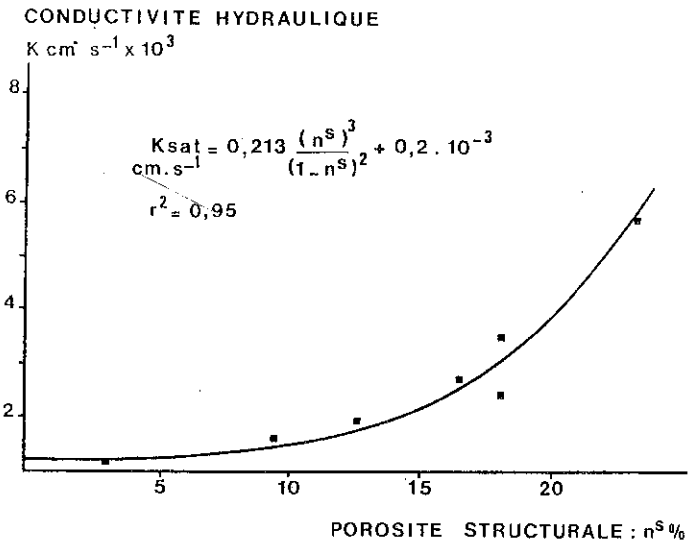


Fig. 9 Ajustement de la conductivité hydraulique à la porosité structurale par la formule de KOZENY (d'après J.C. Fies).
 Curve fitting of the hydraulic conductivity with structural porosity by KOZENY's formula (from J.C. Fies).

REFERENCES

- Ball, B. ; Harris, W. ; Burford J.R., 1981. A laboratory method to measure gaz diffusion and flow in soil and other porous material. J. of Soil Sci. 32: 323-333.

- Dexter, A.R. and Tanner, D.W., 1973. The response of unsaturated soils to isotropic stress. *J. of Soil Sci.* 24: 491-502.
- Eriksson, J. ; Hakansson, I. ; Danfors, B., 1974. The effect of soil compaction on soil structure and crop yields. *Swedish Inst. of Agric. Engng, Bull.* 354.
- Faure, A., 1980-1981. A new conception of the plastic and liquid limits of clay. *Soil Tillage Res.* 1:97-105.
- Fies, J.C., 1971. Recherche d'une interprétation texturale de la porosité des sols. *Ann. agron.* 22(6): 655-685.
- Fies, J.C., 1982. Etude des écoulements en milieux saturés en relation avec la morphologie de l'espace poral du sol. Note interne, INRA-Sol, Montfavet.
- Fies, J.C. and Zimmer, D., 1982. Etude expérimentale de modifications de l'assemblage textural d'un matériau sablo-argileux sous l'effet de pressions. *Bull. du Groupe Français d'Humidimétrie neutronique*, 12, 39-54.
- Fies, J.C. and Stengel, P., 1981. Densité texturale de sols naturels. I-Méthode de mesure. II-Eléments d'interprétation. *Agronomie* 1(8): 651-658;659-666.
- Guérif, J., 1982. Compactage d'un massif d'agrégats : effet de la teneur en eau et de la pression appliquée. *Agronomie*, 2(3), 287-294.
- Guérif, J., 1984. The influence of water-gradient and structure anisotropy on soil compressibility. *J. Agric. Engng* 29:367-374.
- Kurtay, T. and Reece, A.R., 1970. Plasticity theory and critical state soil mechanics. *J. Terramechanics* 7:23-56.
- Pidgeon, J.D. and Soane, B.D., 1977. Effects of tillage and direct drilling on soil properties during the growing season in a long-term barley monoculture system. *J. Agric. Sci. Camb.*, 88:431-442.
- Raghavan, G.S.V. ; McKyes, E. ; Chassi, M., 1976. Soil compaction patterns caused by off-road vehicles in Eastern Canadian agricultural soils. *J. Terramechanics*, 13:107-115.
- Soane, B.D., 1976. Gamma ray transmission systems for the in-situ measurement of soil packing state. *Review Paper Scot. Inst. Agric. Eng. Biennial Rep.* 58-86.
- Soane, B.D. and Henshall, J.K., 1979. Spatial resolution and calibration characteristics of two narrow probe gamma ray transmission systems for the measurement of soil bulk density in-situ. *J. Soil Sci.*, 30:517-528.
- 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), 27-49.
- Stengel, P. ; Bertuzzi, P. ; Gaudu, J.C., 1985. La double sonde gamma LPC-INRA. Précision, Utilisation agronomique. *Bull. de liaison des Ponts et Chaussées.*

