

Réflexions sur le concept d'espace poral

A. FAURE

Station de Science du Sol, I.N.R.A., Montfavet (France)

SOMMAIRE

Les réflexions présentées s'appuient sur des bases expérimentales bien connues et ont pour but de proposer une définition de l'assemblage dit textural. Il est alors possible de dissocier totalement la part de l'espace poral due à la seule texture du matériau de la part de l'espace poral due aux actions énergétiques cumulatives dans l'histoire du matériau. Si aux faibles teneurs en eau, il n'est pas encore possible de déterminer la densité texturale par méconnaissance des lois de mélanges en granulométrie continue, il s'avère qu'aux teneurs en eau plus élevées, l'arrangement textural correspond à l'état de saturation.

Les études portant sur les comportements physiques, les écoulements hydrodynamiques ou les réactions mécaniques des sols en place prennent nécessairement en compte des paramètres caractérisant la répartition de la matière dans le milieu, pour un même résultat global de compacité. Par exemple, il y a quelques décades, les hydrodynamiciens, se préoccupant de perméabilité des sols, ont été amenés à définir la notion de rayon équivalent des pores, notion dont on connaît les avantages et les limites. Cette notion s'est avérée rapidement insuffisante et a été complétée par celle de tortuosité, donnant déjà une moins mauvaise image de la répartition spatiale de la matière.

L'observation de profils de sols en place a mis en évidence l'existence de constructions architecturalement complexes des grains et, plus généralement, des éléments constitutifs du sol. Ces architectures diffèrent entre elles non seulement en fonction de la granularité du sol, mais aussi selon l'histoire du milieu, que celle-ci soit climatique, biologique, hydrique ou énergétique, ou enfin une combinaison de ces différentes actions. Alors que les praticiens de chantiers géotechniques n'ont à prendre en compte que le

résultat global de la compacité qu'ils modifient en déployant l'énergie nécessaire pour obtenir le résultat escompté, les théoriciens ont à prendre en compte l'existence même de ces édifices architecturaux, qu'il s'agisse de micromorphologues, de pédologues, d'agronomes ou de géotechniciens (CAMBOU, 1979 ; LAMBE, 1958 ; MATHIEU, 1978 ; SEED et CHAN, 1959 ; TESSIER et PEDRO, 1980).

Ainsi, un même matériau peut avoir, selon son histoire, des édifices architecturaux différents et, de ce fait, des fonctionnements différents. Il en sera de même pour deux matériaux, différents par leur granularité, mais ayant eu la même histoire. Pour la prévision et la compréhension du comportement d'un sol, il convient donc de dissocier ce qui ne peut être apprécié par la seule mesure en place :

- d'une part, la conséquence sur l'arrangement des grains de leur propre granularité et **elle seule** ;
- d'autre part, la conséquence sur l'arrangement des grains de l'histoire du matériau, quelle que soit l'essence de celle-ci.

ESPACE PORAL TEXTURAL - ESPACE PORAL STRUCTURAL

Le fait même que le sol soit constitué de grains de formes diverses et très complexes rend inéluctable la présence de vides dans le milieu (1), quelle que soit l'ingérence de l'histoire, climatique ou autre. **Abstraction faite de cette histoire**, la répartition des vides, la forme des pores ainsi créés et l'ampleur de ces vides dépendent en particulier de la répartition granulométrique des éléments minéraux, de la forme et de l'état de surface des grains, ainsi que de la présence de constituants secondaires — phylliteux, carbonatés, organiques — dont la nature peut être très variée. Ce sont autant de paramètres qui, habituellement, sont cités de façon implicite sous le vocable « texture ». L'arrangement correspondant des éléments constitutifs du matériau doit être, par définition, obtenu de façon indépendante de l'histoire. Il s'agit donc de l'arrangement correspondant à l'obtention d'un état d'équilibre vrai, et non approché, indépendant du chemin des contraintes et non « d'un régime de contraintes... qui varie peu au cours du temps » (STENGEL, 1979). Le seul arrangement répondant à cette définition est l'arrangement le plus serré physiquement possible (STENGEL, 1979). A cet arrangement maximal correspond un espace poral **réduit au minimum** qui est l'espace poral textural quantifié par la porosité texturale. Cet arrangement, bien qu'anisotrope à l'échelle des éléments constitutifs, donne toutefois, à une autre échelle, un assemblage considéré comme continu et isotrope d'un point de vue mécanique, même si en fait il est physiquement granulaire.

Tout autre arrangement, provenant soit directement d'une ingérence de l'histoire, soit d'une perturbation de l'arrangement le plus serré physiquement possible précédemment réalisé, induit des discontinuités, des hétérogénéités et des anisotropies par rupture, fissurations, etc. A l'échelle des éléments constitutifs se trouvent donc, dans le milieu, des arrangements préférentiels qui donnent les agrégats, les mottes, etc., étroitement liés aux chemins de contraintes suivis par le matériau. L'existence de ces arrangements préférentiels, à distribution aléatoire, modifie l'espace poral par rapport à l'espace poral textural : en plus de ce dernier est créé un espace induit par les modifications architecturales, et les vides correspondants appartiennent à l'espace poral dit structural, qu'ils soient dans l'agrégat ou dans la motte ou encore à l'extérieur de ces volumes.

ESPACE PORAL TEXTURAL : DETERMINATION ET MESURES

Considérons un sol, dans lequel l'eau est répartie de façon homogène. Les techniques de mesures de densités décrites par MONNIER, STENGEL et FIES (1973) et STENGEL (1979) permettent de suivre l'évolution de la densité d'un sol en fonction du volume prélevé. Grâce à ces techniques, il est maintenant bien connu que plus le volume de

(1) FAURE. — Texte de soutenance de thèse, Grenoble, 1978.

prélèvement est faible plus la densité mesurée est forte jusqu'à atteindre, bien évidemment, une limite supérieure (fig. 1). Ces constatations mettent en évidence, sans aucune ambiguïté possible, l'hétérogénéité de la distribution de l'espace poral du sol en place.

La limite **expérimentale** inférieure imposée sur le volume de mesure est celui des agrégats passant au tamis de 1 ou 2 mm de mailles. Pour de tels agrégats, il est communément admis qu'ils représentent la plus petite partie aliquote représentative de la granulométrie du matériau. Toutefois, même si, statistiquement, pour un matériau donné et une teneur en eau donnée, ces agrégats ont une densité peu variable sous un régime hydrique ou climatique donné, il est évident que **cette densité ne correspond pas nécessairement à l'arrangement le plus serré physiquement possible des éléments constitutifs du matériau**, sauf cas particuliers, comme nous le verrons.

Nous avons montré (FAURE, 1978) que les lois de Substitution et de Remplissage étudiées par FIES (1978) sont des lois permettant de caractériser l'arrangement le plus serré physiquement possible d'un mélange. Ces lois n'ont, pour l'instant, d'expressions mathématiques que lorsqu'il s'agit de mélanges binaires de deux populations de grains de tailles différentes. Il resterait à déterminer ces lois extrêmes concernant des matériaux non plus binaires, mais à distribution granulométrique continue. Ainsi il serait possible, par un calcul théorique jusqu'ici inconnu dans le cas général, de déterminer l'arrangement le plus serré physiquement possible (lié aux caractéristiques géométriques des grains) à une **teneur en eau donnée**, lorsque l'énergie augmente sans toutefois modifier par rupture ou concassage la granulométrie.

Aux faibles teneurs en eau, telles w_1 sur les graphiques (2) et (3), cet arrangement textural n'est pas perturbé par une variation de la teneur en eau car l'eau n'occupe que les vides inéluctablement créés par l'assemblage des éléments constitutifs. Il convient de remarquer que le mélange binaire sol-eau suit, à son tour, la loi de remplissage, laissant inchangé le volume d'occupation du sol (donc laissant inchangée la densité dite

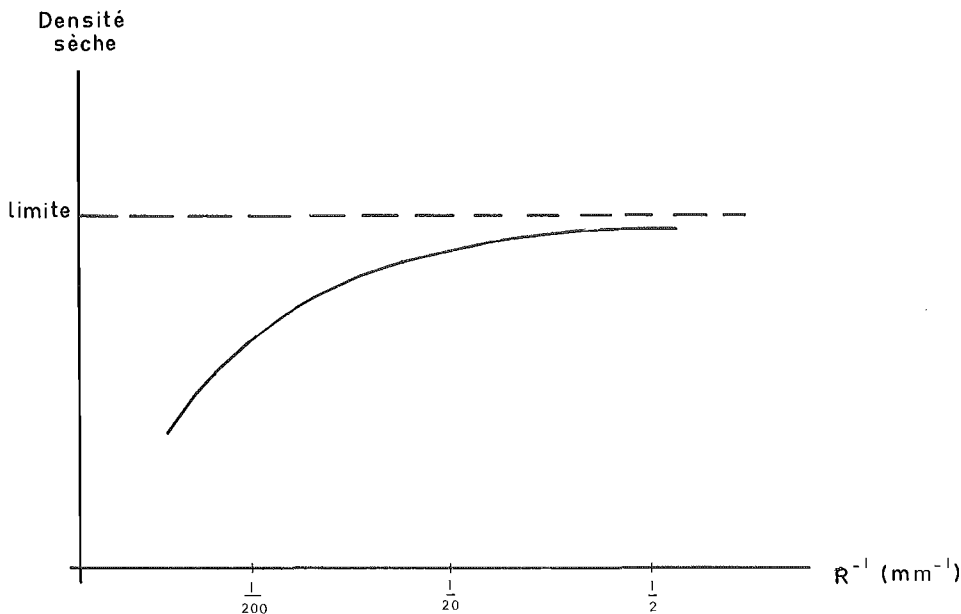


fig.1

FIGURE I. — Variation de la densité sèche d'un matériau en place en fonction du volume de prélèvement (d'après MONNIER, STENGEL et FIES, 1973).

Bulk density versus sample volume (after MONNIER, STENGEL and FIES, 1973)

texturale) lorsque la teneur en eau varie. La limite de validité de cette loi est la valeur w^1 pour laquelle le matériau est saturé.

Aux teneurs en eau supérieures à w^1 (telles w_2 sur les graphiques (2) et (3)), l'arrangement le plus serré physiquement possible correspond à l'état saturé : en effet, à une teneur en eau donnée dans cette plage, l'arrangement le plus serré physiquement possible correspond à l'absence totale de la phase gazeuse. Dans ce cas, et dans ce cas seulement, la densité texturale correspondante est calculable directement par l'équation de l'hyperbole de saturation, qui n'est qu'une autre expression mathématique de la loi de substitution subie alors par le mélange binaire sol - eau.

ESPACE PORAL STRUCTURAL

Sur ces considérations, il apparaît que la densité texturale est la limite absolue maximale liée à la seule valeur de la teneur en eau, pour un matériau donné. Toute mesure de densité effectuée sur un volume quelconque (qu'il s'agisse de l'agrégat, de la motte ou de toute autre unité) prend nécessairement en compte l'arrangement architectural **du moment** des éléments constitutifs. Dans certains cas, cet arrangement peut être relativement stable, mais il prend tout de même en compte un effet structure lié à l'histoire et au chemin des contraintes.

La comparaison à la densité texturale des densités d'agrégats ou de mottes permet de quantifier l'effet structure propre à l'agrégat, à la motte ou l'effet structure de la motte par rapport à l'agrégat. Ainsi, ces diverses comparaisons permettent d'apprécier la façon dont l'espace poral structural est distribué à l'échelle de la motte ou de l'agrégat lui-même.

La mesure expérimentale de la densité d'agrégat apparaît donc comme étant, aux faibles teneurs en eau, la moins mauvaise approche indispensable de la densité texturale que, dans l'état actuel des connaissances, il est en général impossible de calculer. Aux fortes teneurs en eau, cette mesure expérimentale apparaît comme inutile en tant que représentative de la densité texturale qui peut être calculée directement dès lors que la densité de solide est connue. D'un point de vue conceptuel, la densité d'agrégat ne peut être considérée comme étant la densité texturale.

SIGNIFICATION DE w^1 , TENEUR EN EAU LIMITE

La valeur de w^1 , teneur en eau limite entre les phases de saturation et de non saturation du matériau à sa densité texturale, est évidemment inconnue dans la plupart des cas. Les résultats expérimentaux, et les calculs dans les cas simples, conduisent à penser que w^1 ne devrait pas dépasser 20 % dans le cas extrême qu'est celui des sables. Il est important de remarquer que w^1 est la limite absolue des diverses limites de retrait mises en évidence expérimentalement sur un même matériau. Cette limite w^1 est, de toute évidence, le point d'entrée d'air du matériau à son arrangement textural. Toute autre limite de retrait, ou tout autre point d'entrée d'air, liée nécessairement aux conditions des essais, est la conséquence d'arrangements préférentiels de laboratoire et non de terrain : la comparaison entre eux de résultats de laboratoire et de champ n'en est que plus délicate, voire dangereuse.

La teneur en eau w^1 s'avère être, d'un point de vue fondamental, la limite de retrait unique du matériau, unique dans le sens « hors contingence expérimentale ». Cette limite est également, lorsque l'énergie mise en jeu augmente, la limite du seuil de sensibilité au compactage (FAURE, 1974) par définition même de ce seuil hydrique. Le point T, d'abscisse w^1 sur la courbe de saturation (fig. II et III), est un point triple : en ce point, le sol est à la fois solide, plastique et liquide.

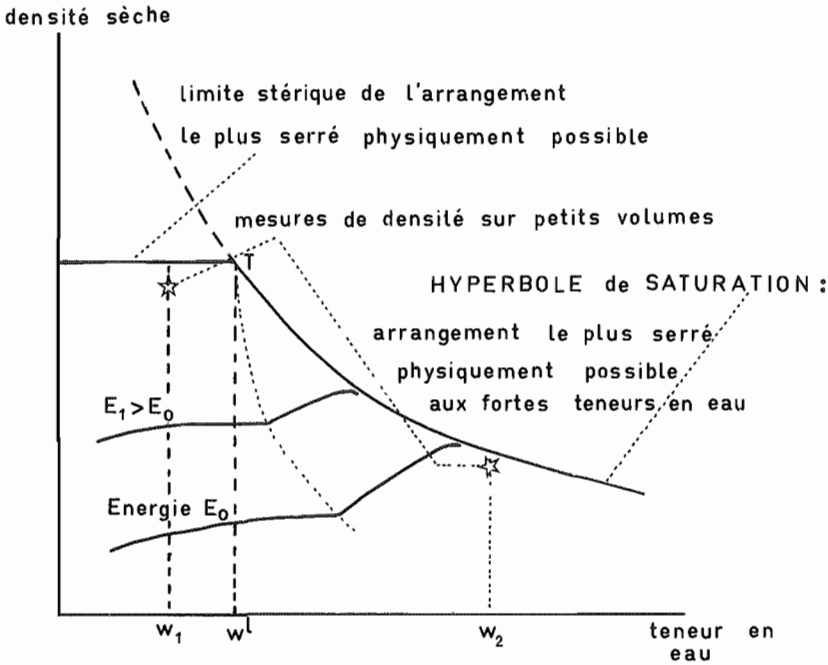


FIGURE II. — Variation de la densité sèche d'un matériau à l'arrangement le plus serré physiquement possible en fonction de la teneur en eau
 Dry density versus water content of «maxitightened» material

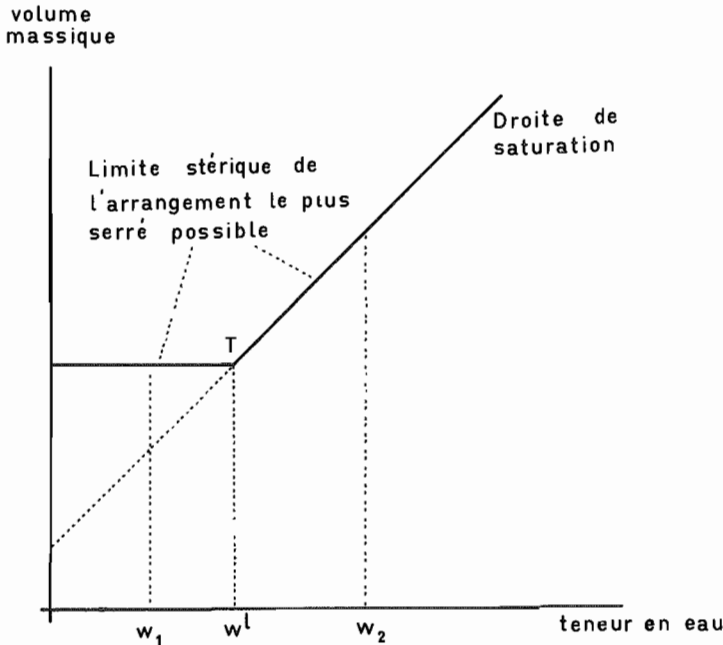


FIGURE III. — Variation du volume massique d'un matériau à l'arrangement le plus serré physiquement possible en fonction de la teneur en eau
 Massic volume versus water content of a «maxitightened» material

CAS DU SOL EN PLACE

Il n'a été considéré, jusqu'à présent, que le cas où le matériau est homogène en teneur en eau. A la lumière des divers résultats obtenus sous cette hypothèse, il est possible d'aborder le cas du sol en place, en général hétérogène en teneurs en eau selon le volume de prélèvement. Soit w_1 la teneur en eau mesurée en place, w_2 celle de la motte qui en est issue et w_3 celle de l'agrégat qui en est extrait. D'un point de vue théorique, l'ordre de classement des valeurs de ces trois teneurs en eau importe peu et l'éventualité que l'une ou plusieurs d'entre elles correspondent à des volumes de sol saturés ne change rien à la teneur du raisonnement. En effet, il ne demeure pas moins qu'alors qu'il manque une égalité, celle qui caractérise l'homogénéité hydrique du matériau, $w_1 = w_2 = w_3$. Cette donnée manquante entraîne qu'il devient fondamentalement impossible de définir les caractéristiques de l'état textural du matériau et, par là-même, d'en mesurer la porosité texturale. Seule reste la possible comparaison entre-eux des espaces poraux structuraux, sans pour autant oublier que la part de ce qui est textural est incluse dans l'espace poral de l'agrégat.

CONCLUSION

Les raisonnements auxquels nous ont conduit les résultats expérimentaux ont permis d'aboutir à un tissu logique de constatations dont l'intérêt n'est pas seulement formel ou conceptuel, mais s'avère également d'ordre pratique :

1. L'arrangement le plus serré physiquement possible n'est pas celui rencontré fortuitement in situ, mais celui que les calculs nous permettent d'obtenir (courbe de saturation) ou nous permettraient d'obtenir, aux faibles teneurs en eau, par l'écriture des lois de substitution et de remplissage généralisées au cas d'une distribution granulométrique continue.

2. La prise en compte de cet arrangement le plus serré physiquement possible permet d'apprécier les évolutions de la structure tant de l'agrégat que de la motte ou de tout autre volume soumis à des sollicitations différentes ou plus sévères que celles auxquelles ces volumes sont habituellement soumis.

3. A cet arrangement le plus serré physiquement possible correspondent les lois de substitution et de remplissage du mélange binaire sol-eau, lois qui sont bien les lois d'occupation maximale de l'espace.

4. Concernant la notion de tassement, il convient de remarquer que si le tassement est défini comme étant une variation positive de densité entre l'état initial et l'état final, à une teneur en eau donnée, il ne peut y avoir que des tassements structuraux en fonction des variations des densités d'agrégats ou de mottes par modification de leur propre structure. Puisque la densité texturale est la limite maximale atteinte pour une teneur en eau donnée, **il ne peut y avoir, au sens strict du terme, de tassement textural.** Si il est sous-entendu une variation de teneur en eau au cours de l'augmentation de densité envisagée, il s'agit alors du phénomène de consolidation qui, en plus d'un simple rapprochement des éléments constitutifs, implique un mouvement d'eau, c'est-à-dire l'intervention de la perméabilité du matériau, elle-même évolutive au cours du phénomène.

Il apparaît que l'arrangement le plus serré physiquement possible à **une teneur en eau** déterminée est la référence absolue qui permet sans ambiguïté de comparer entre-eux deux états physiques du même sol et, mieux encore, de comparer entre-eux, deux sols différents à des états physiques que l'on pourrait croire identiques.

SUMMARY

DISCUSSION ABOUT THE CONCEPT OF «PORAL» VOLUME

Using experimental data obtained when structure of soil is studied, we show that the maximum limit of dry density (or, of course, minimum limit of porosity) is necessarily a textural characteristic of soil. At this limit the soil can be considered as homogeneous, isotropic, without any discontinuity, and continuous from a mechanical point of view.

At low water contents (fig. II and III), this limit is generally unknown, excepted in simple cases, but it is calculable by generalizing «Substitution» and «Filling» Laws. In this case, the soil — water mixture follows itself the simple Filling Law of binary mixtures.

At higher water contents (fig. II and III), this limit is necessary on the saturation line which is perfectly known. In this case, the soil — water mixture follows itself the simple substitution law of binary mixtures.

It is important to notice that these different maximum dry densities, called textural densities, depend on water content and so, must be useful for studying the structure of soil, i.e. the actions of different energetic conditions on soil: climatic conditions, wetting and drying effects, humans actions.

Références bibliographiques

- CAMBOU B. (1979). — Approche du comportement d'un sol considéré comme un milieu non continu. Thèse d'Etat. Univ. Claude-Bernard, Lyon.
- FAURE A. (1974). — Des caractéristiques de la fraction argileuse dans le mécanisme de tassement des sols. Compte rendu Ac. Sc., t. 278, série D, 1175-1178.
- FAURE A. (1978). — Comportement des sols au compactage : Rôle de l'argile et conséquences sur l'arrangement des grains. Thèse d'Etat. Univ. Scientif. Méd., Grenoble.
- FIES J.-C. (1978). — Porosité des sols : Etude de son origine texturale. Thèse d'Etat. Univ. Louis-Pasteur, Grenoble.
- LAMBE T.W. (1958). — The structure of compacted clay. J. Soil Mech. and Found. Div Proc. A.S.C.E. (SM 2), Vol. 84, 1654 : 1-34.
- MATHIEU C. (1978). — Influence de l'irrigation sur l'évolution de quelques caractéristiques fondamentales des sols argileux des plaines du Maroc Oriental. Science du Sol, Bull. A.F.E.S., n° 2, p. 95-112.
- MONNIER G., STENGEL P. et FIES J.-C. (1973). — Une méthode de mesure de densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol. Ann. Agron. 24 (5), 533-545.
- SEED H.B. et CHAN C.K. (1959). — Structure and strength characteristics of compacted clays. J. Soil Mech. and Found. Div. Proc. A.S.C.E. (SM 5), p. 87-128.
- STENGEL P. (1976). — Influence du non travail du sol sur la porosité en rotation céréalière. Compte rendu Ac. Agric., p. 881-894.
- 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.
- TESSIER D. et BERRIER J. (1979). — Utilisation de la microscopie électronique à balayage dans l'étude du sol. Sc. du Sol, Bull. A.F.E.S., n° 1, 67-82.
- TESSIER D. et PEDRO G. (1980). — Sur les propriétés de gonflement des argiles dans les sols. Compte rendu Ac. des Sc., t. 291, 461-464.

