

CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA DYNAMIQUE DE L'ESPACE PORAL UTILISATION DES COURBES DE RETRAIT ET DES COURBES DE RETENTION D'EAU

A. BRUAND ⁽¹⁾

RESUME

En s'appuyant sur les travaux d'autres auteurs, on montre la nécessité de raisonner le choix des échantillons avec lesquels sont réalisées les courbes de retrait et les courbes de rétention d'eau. Un tel choix doit permettre d'effectuer, tout en ne prenant en compte que telle ou telle fraction de l'espace poral, une analyse plus précise de ces deux types de courbe. Les différentes classes de pores, qui constituent l'espace poral étudié, sont alors décrites en déterminant, non seulement leurs dimensions mais aussi, la façon dont celles-ci varient en fonction de l'état d'hydratation.

INTRODUCTION

La description de la géométrie de l'espace poral d'un horizon de sol nécessite que soient déterminés le volume et les dimensions des différentes classes de pores. Or, plus particulièrement pour les horizons argileux, il existe une relation étroite entre l'état d'hydratation et la géométrie de l'espace poral (STIRK, 1954 ; REEVE et HALL, 1978 ; NEWMAN et THOMASSON, 1979 ; STENGEL, 1981 ; FIES et STENGEL, 1984 ; TESSIER, 1984). Cette description ne peut donc pas être effectuée indépendamment de l'état d'hydratation de l'horizon.

Une première façon de procéder consiste à étudier l'espace poral d'un horizon à partir d'échantillons qui, après avoir été amenés dans des états d'hydratation déterminés, sont déshydratés en évitant que l'espace poral soit modifié (LAWRENCE, 1977 ; TESSIER et BERRIER, 1979 ; TESSIER, 1984). La validité d'une telle démarche repose essentiellement sur la validité des méthodes devant permettre d'éliminer l'eau tout en conservant l'organisation de l'échantillon (LAWRENCE et al., 1979 ; MURRAY et QUIRK, 1980 ; DE KIMPE, 1984 ; BRUAND, 1985). Une autre voie possible est de rechercher des informations sur la géométrie de l'espace poral d'un horizon à partir d'échantillons hydratés dont on suit l'évolution simultanée du volume apparent et de la teneur en eau lorsqu'ils subissent une dessiccation progressive. En effet, rappelons que l'on établit, par analogie avec des pores de forme cylindrique, une relation entre la valeur du potentiel de l'eau dans un échantillon et la valeur maximale du rayon des pores occupés par l'eau.

Cette valeur, qui est celle du rayon de pore équivalent, peut être calculée en exprimant le potentiel de l'eau par la valeur de la succion nécessaire pour extraire l'eau lui correspondant (HENIN, 1977 ; HILLEL, 1980). La relation la plus communément employée pour déterminer la valeur du rayon r est la suivante :

$$r = 2 \gamma \cos \theta / P \quad [1].$$

(1) Service d'Etude des Sols et de la Carte Pédologique de France I.N.R.A. - Ardon - 45160 Olivet.

avec γ : tension superficielle entre l'eau et l'air, θ : angle de raccordement solide-liquide, P : pression permettant d'évaluer la valeur de la succion.

Notre objectif est ici de montrer comment les valeurs du volume apparent et de la teneur en eau, déterminés pour différentes valeurs du potentiel de l'eau, peuvent être employés pour discuter la dynamique de l'espace poral d'un échantillon lorsque son état d'hydratation varie. Dans ce but, la discussion qui suit s'appuiera sur des résultats obtenus récemment par différents auteurs. Précisons que les données expérimentales permettant de construire les deux types de courbes sont obtenues en dessiccation. C'est pourquoi, afin de couvrir la gamme désirée de valeurs du potentiel de l'eau, les échantillons sont prélevés à des états d'hydratation déterminés puis conservés humides. Enfin, l'indice des vides, l'indice d'eau et l'indice d'air, qui vont être employés par la suite, correspondent respectivement au volume des vides (V_v), au volume d'eau (V_w) et au volume d'air (V_a) rapportés tous trois au volume de solide (V_s). Ainsi :

$$\begin{aligned} e &= V_v/V_s = \text{indice des vides} \\ e_w &= V_w/V_s = \text{indice d'eau} \\ e_a &= V_a/V_s = \text{indice d'air} \end{aligned}$$

I. EVOLUTION DE L'INDICE DES VIDES EN FONCTION DE L'INDICE D'EAU : COURBES DE RETRAIT

Ce type de courbe représente l'évolution du volume des vides dans un échantillon lorsque l'on extrait un volume d'eau déterminé. Il permet, par conséquent, de discuter les modifications de la géométrie des pores lorsqu'ils se vident de leur eau (HAINES, 1923 ; STIRK, 1954 ; REEVE et HALL, 1978 ; NEWMAN et THOMASSON, 1979 ; TESSIER, 1984).

Lorsque l'eau retenue par un échantillon passe d'une valeur du potentiel (état i) à une valeur supérieure (état j), nous pouvons écrire :

$$\begin{aligned} e^i &= e_w^i + e_a^i \quad (\text{état } i) \\ e^j &= e_w^j + e_a^j \quad (\text{état } j) \end{aligned}$$

avec : e^k : indice des vides prenant en compte l'ensemble du volume poral de l'échantillon dans l'état k ;

$$\begin{aligned} e_w^k &: \text{indice d'eau dans l'état } k. \\ e_a^k &: \text{indice d'air dans l'état } k ; \end{aligned}$$

Entre l'état i et l'état j , la variation d'indice des vides $\Delta e = e^j - e^i$ est égale à la variation de l'indice d'eau ($\Delta e_w = e_w^j - e_w^i$) à laquelle on doit retrancher celle de l'indice d'air ($\Delta e_a = e_a^j - e_a^i$). Ainsi :

$$\Delta e = \Delta e_w - \Delta e_a$$

Le « chemin » qui permet de passer de l'état i à l'état j correspond à un segment de la courbe de retrait. Quatre types de « chemin » sont possibles (fig. 1) :

— avec le « chemin 1 » (fig. 1-a), l'échantillon passe d'un état à l'autre sans qu'il y ait de modification de l'indice des vides total ($\Delta e = 0$). Cela signifie que l'extraction d'eau (Δe_w) entraîne l'apparition d'un volume poral occupé par de l'air (Δe_a) équivalent au volume d'eau extrait. L'espace poral correspondant apparaît alors « rigide ». Cette rigidité peut être réelle pour l'ensemble des pores d'un échantillon, comme dans le cas d'une craie (fig. 2-a) et d'un schiste calcaire altéré (fig. 2-b), ou pour une seule classe de pores, comme dans le cas des pores tubulaires de mottes de dimension centimétrique ou millimétrique (fig. 2-d ; courbes 2 et 3, étape I). Elle peut n'être qu'apparente lorsque la diminution de volume des pores qui se vident de leur eau est compensée par l'apparition d'un volume de fissures équivalent. Il a été effectivement montré que ceci se produit lors de la limite de retrait (fig. 2-d, étape III) pour des échantillons provenant d'un sol argileux. En effet, lors de cette étape, bien que l'indice des vides soit constant, les particules

Figure 1 : Schémas présentant les différents types de « chemin » permettant de passer de l'état i à l'état j.

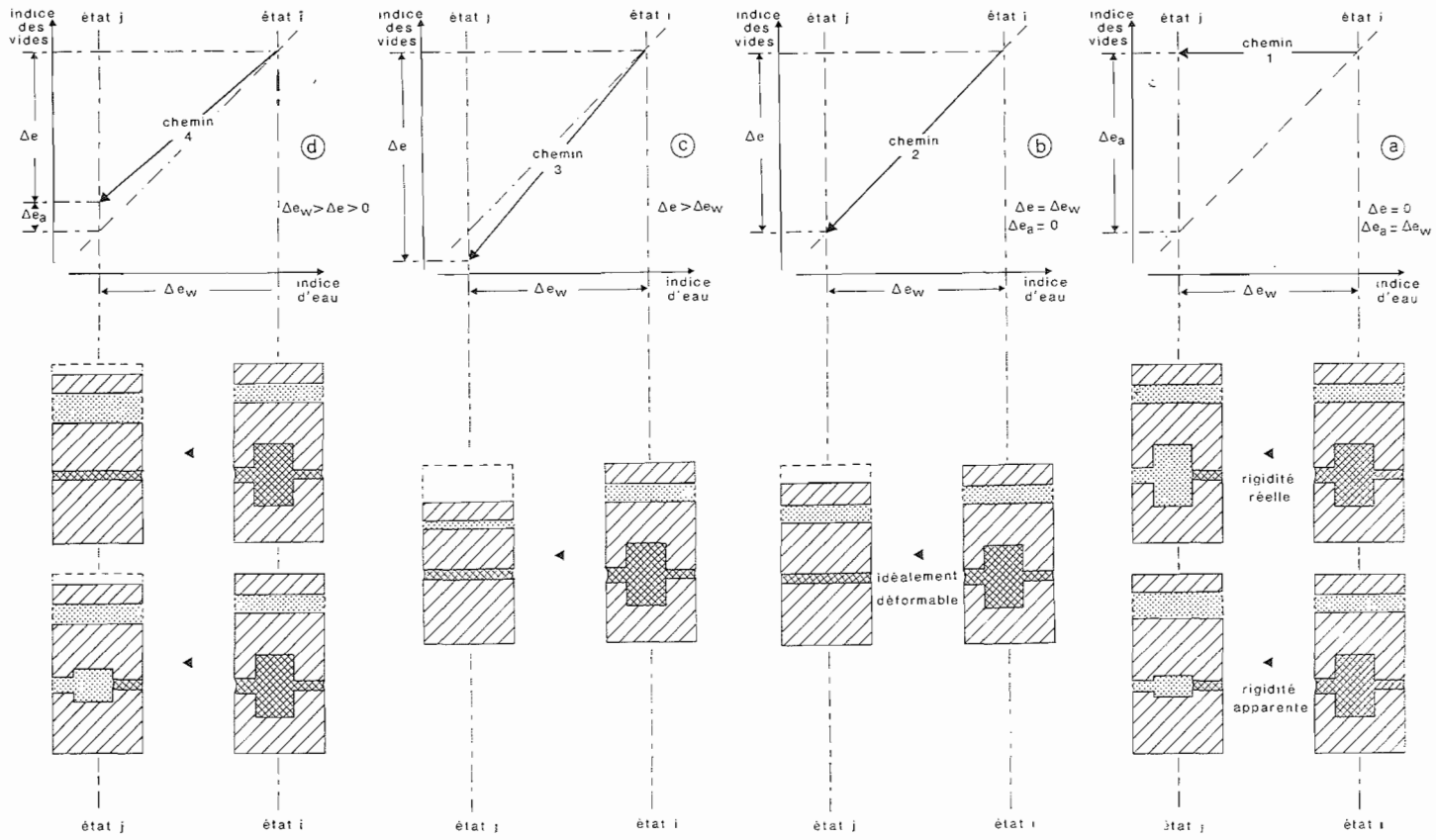


Figure 1 : Schematic diagrams showings different routes from state i to state j.

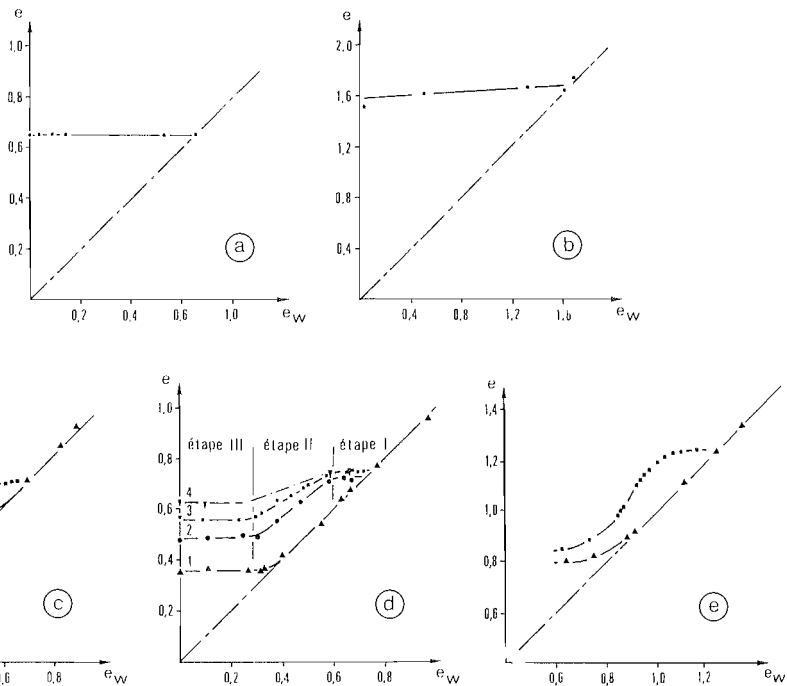


Figure 2 :

Courbes de retrait obtenues avec :

- a - une craie sénonienne (BALLIF, 1978) ;
- b - un schiste calcaire altéré (Van OORT, 1984).
- c - des échantillons « pâte remaniée » (▲) et des mottes de dimension centimétrique (2-5 cm³ ; ■) provenant d'un horizon B argilo-limoneux (LESSARD, 1985) ;
- d - des échantillons « pâte remaniée » (▲), des mottes de dimension millimétrique (25-35 mm³ ; ●), centimétrique (2-5 cm³ ; ■) et décimétrique (0,25-0,35 dm³ ; ▼) issues d'un horizon B argileux (BRUAND, 1985) ;
- e - des échantillons « pâte remaniée » (▲) et des mottes de dimension centimétrique (2-5 cm³ ; ■) issues d'une tranchée de drainage (SAFAR, 1986).

Figure 2 :

Shrinkage curves obtained with :

- a - a senonian chalk (BALLIF, 1978) ;
- b - a weathered calcareous schist (Van OORT, 1984) ;
- c - paste samples (▲) and centimetric clods (2-5 cm³ ; ■) of a silty clay B horizon (LESSARD, 1985) ;
- d - paste samples (▲) and millimetric (25-35 mm³ ; ●) centimetric (2-5 cm³ ; ■) and decimetric clods (0.25-0.35 dm³ ; ▼) of a clayey B horizon (BRUAND, 1985) ;
- e - paste samples (▲) and centimetric clods (2-5 cm³ ; ■) of a drainage trench (SAFAR, 1986).

élémentaires se rapprochent pour atteindre l'assemblage le plus compact possible (TESSIER, 1980) et la diminution de volume, engendrée par cette évolution, est compensée par l'apparition d'un volume équivalent de microfissures de 0,5 à 1 μm de large (BRUAND, 1985).

— avec le « chemin 2 » (fig. 1-b), la diminution de l'indice des vides est égale au volume d'eau extrait ($\Delta e = \Delta e_w$). On passe donc de l'état i à l'état j par un segment de droite parallèle à la première bissectrice. L'espace poral correspondant peut alors être considéré comme « idéalement déformable ». C'est le cas des points expérimentaux qui sont situés sur la droite de saturation ($e = e_w$) (fig. 2-c et 2-d) et qui ont été obtenus pour les échantillons « pâte remaniée » (courbes 1). Rappelons que les échantillons « pâte remaniée » sont obtenus en agitant mécaniquement des mottes dans de l'eau. Ce traitement a pour objectif de supprimer l'organisation acquise par les mottes au cours de leur histoire.

— avec le « chemin 3 » (fig. 1-c), la diminution de l'indice des vides est supérieure au volume d'eau extrait ($\Delta e > \Delta e_w$). Lorsque l'on passe de l'état i à l'état j, on assiste à la disparition d'une partie au moins des pores qui étaient occupés par de l'air dans l'état i. Ce type de dynamique de l'espace poral, décrit pour le réseau fissural d'un horizon argileux (HALLAIRE, 1985), a aussi été obtenu pour des mottes de dimension centimétrique provenant d'une tranchée de drainage (fig. 2-e) (SAFAR, 1986).

— enfin, avec le « chemin 4 » (fig. 1-d), la diminution de l'indice des vides est inférieure au volume d'eau extrait ($0 < \Delta e < \Delta e_w$). L'augmentation du volume poral occupé par de l'air (Δe_a) peut être due :

- uniquement à des fissures. L'espace poral apparaît « partiellement déformable » mais celui d'où est extraite l'eau est en fait « idéalement déformable » ;
- au seul espace poral qui est vidé de son eau entre l'état i et l'état j, les pores ne se déformant que partiellement, l'espace poral correspondant peut alors être considéré comme « partiellement déformable » ;
- pour partie à une déformation partielle des pores et pour partie à l'apparition de fissures. De la sorte entre l'état i et l'état j, l'augmentation du volume poral occupé par de l'air (Δe_a) est due, d'une part, à l'espace poral qui perd son eau et, d'autre part, à l'augmentation du volume des fissures.

Ce type de « chemin 4 » est très fréquemment rencontré pour les courbes obtenues avec des mottes extraites d'horizons de sol. En effet, après une première étape d'importance variable, correspondant à l'extraction d'eau de pores rigides ($\Delta e = 0$), et avant que la limite de retrait ne soit atteinte ($\Delta e = 0$), les courbes présentent ce type d'évolution de l'indice des vides. La courbe de retrait établie pour des mottes de dimension centimétrique et provenant d'un horizon B argilo-limoneux (LESSARD, 1985) montre que entre $e_w = 0,4$ et $e_w = 0,5$, $\Delta e < \Delta e_w$ (fig. 2-c). Il est alors impossible de déterminer la part revenant aux fissures et celle revenant aux pores qui se vidant de leur eau.

II. EVOLUTION DE L'INDICE D'EAU EN FONCTION DE LA VALEUR DU POTENTIEL DE L'EAU : COURBES DE RETENTION D'EAU

Ce mode de représentation graphique traduit l'affinité du matériau pour l'eau et renseigne sur la localisation de l'eau lors de l'extraction (HALL et al. 1977 ; NEWMAN et THOMASSON, 1979 ; TESSIER, 1984). L'eau extraite entre deux valeurs du potentiel de l'eau que l'on exprimera en utilisant la notion de pF (logarithme décimal de la suction évaluée par la hauteur d'une colonne d'eau en centimètres) SCHOFIELD, 1935), provient de pores dont les rayons de pore équivalent peuvent être calculés à l'aide de la relation (1) qui emploie un modèle de pore cylindrique. On peut alors penser que l'image de la géométrie de l'espace poral ainsi obtenue sera

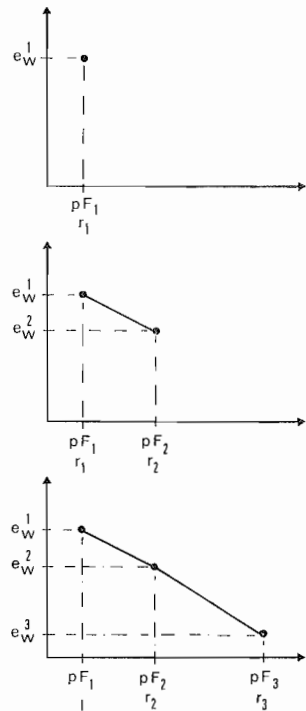
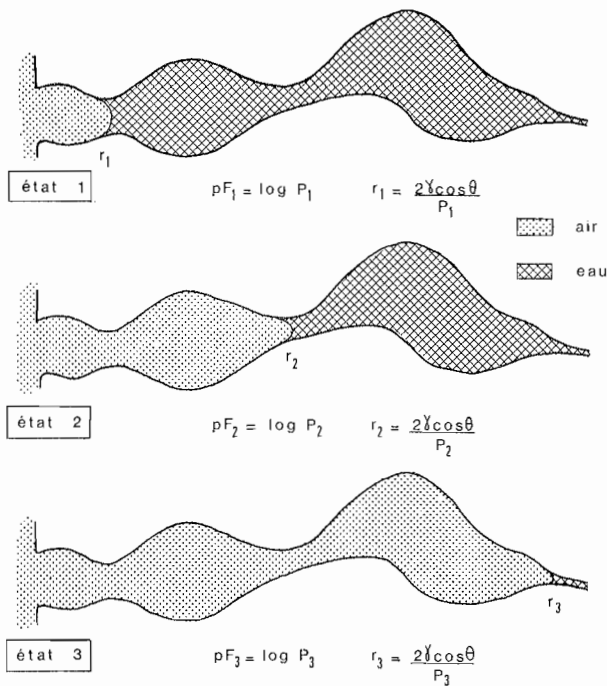


Figure 3 : Schéma présentant un exemple de relation entre des volumes d'eau extraits, lorsque la succion augmente, et une géométrie d'espace poral rigide.

Figure 3 : Schematic representation showing an example of relation between extracted water volumes, when the suction increases, and the geometry of a rigid pore space.

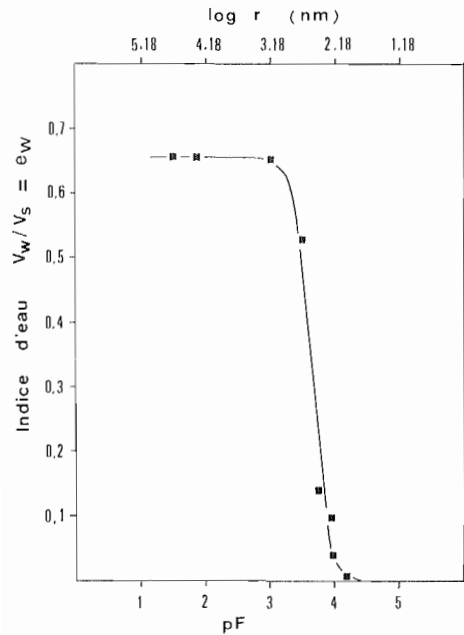


Figure 4 : Courbe de rétention d'eau pour une craie sénonienne (BALLIF, 1978).

Figure 4 : Water retention curve of a senonian chalk (BALLIF, 1978).

d'autant plus déformée que les pores diffèrent de ce modèle. En fait, le modèle de pore cylindrique ne concerne que les étranglements existant dans un pore, c'est-à-dire ses constriction. De la sorte, l'analogie avec des pores cylindriques se limite à ces seules constriction mais, en contrepartie, nous n'avons pas d'information sur la géométrie des volumes poraux auxquels les constriction donnent accès (fig. 3).

Les courbes de rétention d'eau permettent d'avoir accès à un paramètre : « taille des pores », par l'intermédiaire des valeurs de rayon de pore équivalent mais leur utilisation nécessite que le comportement des différentes classes de pores ait été préalablement décrit à partir des courbes de retrait. Ainsi, après avoir montré qu'un échantillon possède un espace poral « rigide », il est possible d'en décrire le spectre poral à partir de la courbe de rétention d'eau. Si nous reprenons l'exemple d'une craie (fig. 4), la courbe du volume poral cumulé en fonction du rayon de pore équivalent est obtenue très simplement en employant la relation (1) puisqu'il s'agit d'un édifice rigide. Nous pouvons appliquer une démarche identique pour toute classe de pore « rigide » (HALL et al., 1977). Par contre, pour les échantillons à espace poral « idéalement déformable », nous ne pouvons indiquer que la dimension maximale des pores équivalents pour une valeur du potentiel de l'eau, mais il est impossible de connaître la distribution de taille des pores de dimension inférieure. Comme précédemment, ce type de démarche est applicable à toute classe de pore « idéalement déformable ».

Pour les échantillons provenant d'horizons de sol, le comportement de l'espace poral lors de l'extraction de l'eau est fréquemment différent de ces deux cas extrêmes. De plus, même lorsque l'on passe de l'état i à l'état j par un chemin de type 1, il peut s'avérer difficile d'affirmer qu'il s'agit effectivement de pores « rigides » et non pas de pores « idéalement déformables » dont la variation de volume serait compensée par le développement de fissures. Par conséquent, il peut paraître difficile, pour l'instant, de décrire la géométrie de l'espace poral d'un échantillon de sol hydraté à partir de la seule utilisation des courbes de retrait et de rétention d'eau.

Il est néanmoins possible de comparer les systèmes poraux de deux échantillons en comparant leurs courbes de rétention d'eau. En effet, lorsque deux échantillons possèdent le même espace poral entre deux valeurs de rayon de pore équivalent, leurs courbes de rétention d'eau sont parallèles entre les deux valeurs de pF correspondantes. Dans l'exemple présenté figure 5, les courbes de rétention d'eau obtenues pour les mottes Δ et les mottes Γ sont distinctes jusqu'à $pF = 4$ (PAPY, 1984). Jusqu'à cette valeur du pF , les valeurs de e_w correspondant aux mottes Γ sont

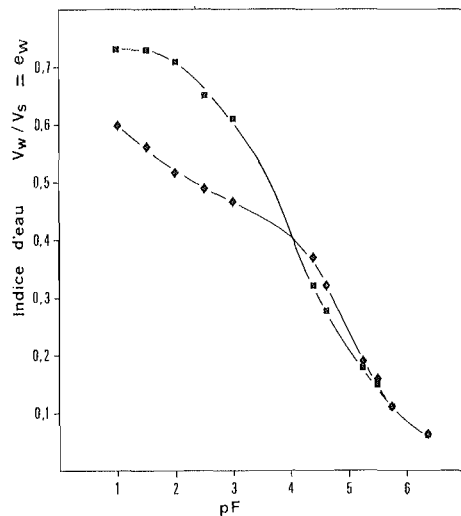


Figure 5 :
Courbe de rétention d'eau obtenue pour des mottes Δ (◆) et des mottes Γ (■) (PAPY, 1984).

Figure 5 :
Water retention curve of Δ clods (◆) and Γ clods (■) (PAPY, 1984).

supérieures à celles obtenues pour les mottes Δ . Ceci indique que le volume des pores qui perdent leur eau entre $pF = 1$ ($r_{\text{ca}} = 150 \mu\text{m}$) et $pF = 4$ ($r_{\text{ca}} = 150 \text{ nm}$) est plus élevé pour les mottes Γ que pour les mottes Δ , ce qui est en accord avec la définition donnée pour ces deux types de motte. En effet, les mottes Δ possèdent un état interne compact et continu alors que pour les mottes Γ , il est moins continu avec de nombreux pores tubulaires et cavités (MANICHON, 1982). Par contre pour $pF > 4$, les courbes se confondent et indiquent qu'il n'y a pas de différence significative pour l'espace poral correspondant dans les deux types de motte.

Un autre exemple est celui des valeurs d'indice d'eau obtenues avec des mottes de dimension millimétrique et d'autres de dimension centimétrique provenant toutes deux d'un horizon B (BRUAND, 1985). On note alors qu'il n'est pas possible de distinguer deux courbes de façon significative (fig. 6). Par conséquent, l'espace poral des mottes de dimension centimétrique concerné par le processus d'extraction d'eau pour les valeurs de pF supérieures à 1,75 ($r_{\text{eu}} < 27 \mu\text{m}$) est identique à celui des mottes de dimension millimétrique.

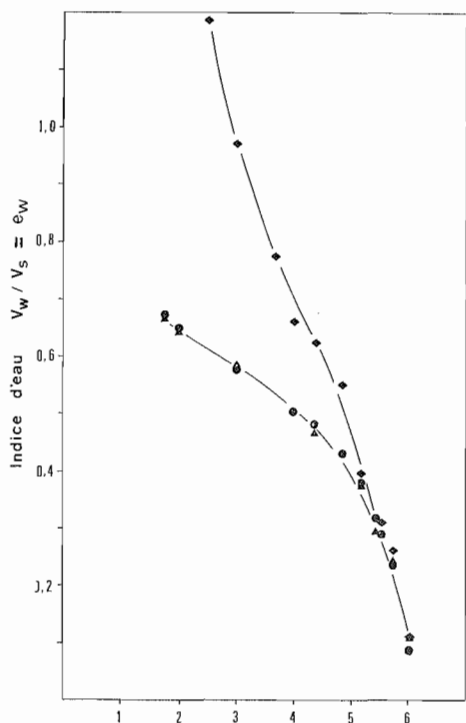


Figure 6 :

Courbes de rétention d'eau pour des échantillons « pâte remaniée » (◆), des mottes de dimension millimétrique (25-35 mm³ ; ▲) et centimétrique (2-5 cm³ ; ●) provenant d'un horizon B argileux (BRUAND, 1985).

Figure 6 :

Water retention curve of paste samples (◆), millimetric clods (25-35 mm³ ; ▲) and centimetric clods (2-5 cm³ ; ●) of clayey B horizon (BRUAND, 1985).

III. DISCUSSION

La description de la dynamique de la géométrie de l'espace poral d'un horizon de sol nécessite que l'on puisse connaître, d'une part, le comportement de chaque classe de pore lorsque l'eau en est extraite et, d'autre part, les conséquences de cette extraction d'eau sur les classes de pores occupées par de l'air parce que précédemment vidées de leur eau. On doit alors s'efforcer de distinguer les différentes classes de pores, non seulement par leurs dimensions (diamètre, volume, maille,...) mais aussi, par la façon dont celles-ci varient en fonction de l'état d'hydratation (ouverture et fermeture de fissures, réversibilité,...).

Nous venons de voir quelles pouvaient être les difficultés rencontrées lors de l'analyse des courbes de retrait et des courbes de rétention d'eau. Une façon de procéder pour contourner ces difficultés consiste à raisonner l'échantillonnage pour que l'analyse des courbes de retrait soit simplifiée. Les données obtenues par PAPY (1984) montrent clairement que les valeurs de l'indice des vides e déterminées pour des mottes Δ et Γ , lorsque e_w varie, se répartissent effectivement dans des domaines distincts de la courbe de retrait en fonction de l'importance du développement des macropores dans ces mottes (fig. 7).

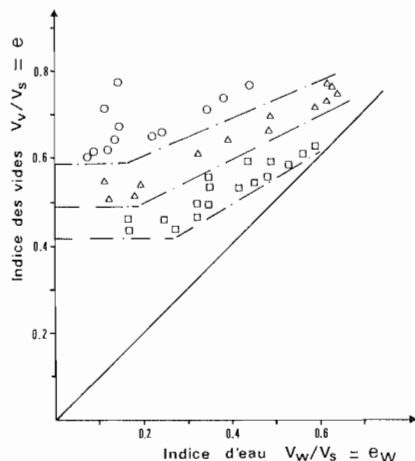


Figure 7 :
Variation de l'indice des vides en fonction de l'indice d'eau pour des mottes possédant un volume de macropores variable : faible □, moyen Δ et élevé ○ (PAPY, 1984).

Figure 7 :
Void ratio variation versus moisture ratio of clods which possess a variable volume of macropores : small □ ; medium Δ and large ○ (PAPY, 1984).

Un autre exemple de l'importance du choix des échantillons est celui déjà évoqué et présenté figure 2-d. La courbe de retrait obtenue pour des mottes de dimension centimétrique présente une étape intermédiaire (étape II, courbe 3) qui correspond au « chemin 4 » et pour laquelle il n'est pas possible de discuter la contribution d'éventuelles fissures dans la variation e enregistrée. L'utilisation de mottes de différente taille a permis de montrer que l'espace poral qui se vidait de son eau durant l'étape II était « idéalement déformable » mais qu'apparaissaient des fissures entre des unités morphologiques de dimension millimétrique (BRUAND, 1985). En effet, la courbe obtenue pour les échantillons de dimension millimétrique possède une pente proche de 1 durant l'étape II ($\Delta e \neq \Delta e_w$ et $\Delta e_{ca} \neq 0$) (fig. 2-d). Lorsque l'on passe des échantillons de dimension millimétrique (courbe 2) aux échantillons de dimension centimétrique (courbe 3) puis à ceux de dimension décimétrique (courbe 4), les valeurs de e prennent en compte un volume croissant de fissures et la pente décroît.

Ces deux exemples montrent, non seulement l'importance du choix des échantillons avec lesquels on réalise les expérimentations mais aussi, la nécessité d'avoir préalablement identifié les différentes classes de pore présentes dans l'horizon étudié (fissures, pores tubulaires, cavités,...) et décrit la façon dont elles sont organisées (isotropie ou anisotropie, maille,...). L'observation macromorphologique de l'horizon, complétée de la description de son organisation en microscopie, suffisent généralement pour cette étape préalable (BRUAND, 1985).

En choisissant un échantillon déterminé par sa taille ou sa morphologie, on pourra ne prendre en compte qu'une fraction de l'espace poral de l'horizon, que telle ou telle classe de pore à l'exclusion des autres. C'est ce type de démarche qui a conduit aux notions de « porosité texturale » et de porosité structurale » (MONNIER et al., 1973 ; STENGEL, 1979). C'est aussi elle qui a conduit à l'utilisation, soit d'échantillons à « organisation naturelle conservée » (mottes de dimension centimétrique ou millimétrique), soit d'échantillons ayant subi un traitement ayant pour objectif de la supprimer (échantillons « pâte remaniée ») (CLAIR et al., 1980). A ce propos, on constate très généralement que les points expérimentaux correspondant aux échantillons « pâte remaniée »

nie » ne se superposent à la courbe de rétention d'eau des échantillons à structure conservée qu'à partir d'une certaine valeur de pF. Celle-ci a été interprétée comme étant la valeur de la contrainte maximale (contrainte équivalente) enregistrée au cours de son histoire par l'horizon dont sont issus les échantillons étudiés (DE CRECY et al., 1979 ; CLAIR et al., 1980). Cette interprétation peut être discutée lorsque l'on sait que, pour le cas présenté figure 6, les échantillons « pâte remaniée » sont en partie constitués de microfragments ayant conservé leur organisation interne et par conséquent leur espace poral. Ainsi, les deux types d'échantillons doivent sensiblement perdre la même quantité d'eau pour des valeurs de pF supérieures à celle correspondant au début de la vidange de cet espace poral. Les courbes sont alors superposées. Selon cette autre interprétation, la valeur du pF correspondant au point de rencontre des deux types de courbe est alors en relation avec le degré de fragmentation des mottes dans l'échantillon « pâte remaniée » et non avec la contrainte maximale enregistrée par ces mottes au cours de leur histoire.

CONCLUSION

Les courbes de retrait et de rétention d'eau sont de plus en plus fréquemment employées pour discuter la géométrie de l'espace poral d'un échantillon de sol. L'analyse des travaux effectués récemment dans ce domaine fait apparaître la nécessité de raisonner le choix des échantillons pour, autant que possible, déterminer la contribution de chaque classe de pores à la variation de l'indice des vides enregistrée. C'est ainsi que différentes classes de pores peuvent être distinguées par leur comportement à l'aide des courbes de retrait. Les courbes de rétention d'eau permettent ensuite d'estimer les valeurs des volumes des différentes classes de pores et celles des rayons de pore équivalent pour lesquelles ils sont accessibles. De plus, cette démarche permet de discuter les variations de géométrie de l'espace poral lorsque l'état d'hydratation varie. Notons enfin, qu'en l'absence de données suffisantes pour parvenir à une telle description, il demeure néanmoins possible de comparer les espaces poraux de deux échantillons en comparant leurs courbes de retrait et leurs courbes de rétention d'eau.

Reçu pour publication : Janvier 1986

Accepté pour publication : Octobre 1986

CONTRIBUTION TO THE STUDY OF PORE SPACE BEHAVIOUR USE OF SHRINKAGE CURVES AND WATER RETENTION CURVES

Especially with clayey soil materials, pore space geometry depends on water potential. Shrinkage curves and water retention curves can be used in order to obtain information about the pore space geometry of moist soil materials. The purpose of the present study is to discuss, on the basis of a literature review, how the pore space description obtained with these two kinds of curves could be improved.

As suction increases, void ratio and moisture ratio values describe both the modification of pore geometry and the location of water in the pore space, respectively. Nevertheless, if the description of the geometry (equivalent pore size distribution and accumulated pore volume curves) of a rigid pore space is easy (fig. 3 and 4), cracks appear in many soil materials and their volume is included in the determined void ratio value. Indeed, pores from which water is extracted can show different behaviours during dehydration (fig. 1 and 2). Therefore, the segments of shrinkage curve of figure 1 can be discussed differently and the pore space geometry cannot be described precisely.

It is suggested that this difficulty can be overcome by using samples which allow the study of each class of pores. The example presented in figure 2d illustrate this suggestion. The cracks appearing in the centimetric clods (2-5 cm³) during phase II do not exist in the millimetric clods (25-35 mm³) and are less developed than in the decimetric clods (0,25-0,35 dm³). Moreover, from pF 1,75 to pF 6, pore space from which water is extracted, is the same in the centimetric and millimetric clods

(fig. 6). Another examples of soil material is presented in figures 5 and 7. In this case, the two types of clods come from the same horizon and have the same size, but do not possess the same pore space geometry. This difference is only due to the pore space which lose some water between pF 1 ($r_{eq} = 150 \text{ m}$) and pF 4 ($r_{eq} = 0,15 \text{ }\mu\text{m}$) (fig. 5).

This approach makes it possible to compare the pore space of many soil materials and, when data are adequate, to describe the modifications of pore space geometry in relation to water potential.

BIBLIOGRAPHIE

- BALLIF J.L., 1978. — Porosité de la craie. Appréciation de la taille et de la répartition des pores. *Ann. Agron.*, 29 (2), 123-131.
- BRUAND A., 1985. — Contribution à l'étude de la dynamique de l'organisation de matériaux gonflants. Application à un matériau provenant d'un sol argilo-limoneux de l'Auxerrois. Thèse 3^e cycle, Univ. Paris VII, 226 p.
- CLAIR A., CONCARET J., De CRECY J., 1980. — Action structurale des influences périglaciaires, 8^e RAST, Marseille.
- De CRECY J., CONCARET J., MUNIER O., LAVIELLE G., 1979. — Assemblage structural des sols et histoire des matériaux. *C.R. Acad. Agricul. Fr.*, 65 (17), 1448-1452.
- De KIMPE C.R., 1984. — Effect of air-drying and critical point drying on the porosity of clay soils. *Can. Geotech. J.*, 21, 181-185.
- FIES J.C., STENGEL P., 1984. — Relations entre la constitution granulométrique et minéralogique et les caractéristiques de l'espace poral des sols. Livre Jubilaire du Cinquantenaire de l'AFES, 235-240.
- HAINES W.B., 1923. — The volume change associated with variations of water content in soil. *The J. Agric. Sci.*, 13, 296-310.
- HALL D.G.M., REEVE M.J., THOMASSON A.J., WRIGHT V.F., 1977. — Water retention, porosity and density of field soils. *Soil Survey Tech. Monogr. N° 9*, Rothamsted Experimental Station, Harpenden, 75 p.
- HALLAIRE V., 1985. — Evolution of crack networks during shrinkage of a clay soil under grass and winter wheat crops. *Int. Symp. on Water and Solute Movement in Heavy Clay Soils*, Wageningen, The Netherlands, August 27-31, ILRI Pub. 37, 1984, 49-54.
- HENIN S., 1977. — Cours de physique du sol. Volume II. L'eau et le sol. Les propriétés mécaniques. La chaleur et le sol. ORSTOM Paris, 222 p.
- HILLEL D., 1980. — Fundamentals of soils physics. Academic Press. 413 p.
- LAWRENCE G.P., 1977. — Measurement of pores sizes in fine-textured soils : a review of existing techniques. *J. Soil Sci.*, 28, 527-540.
- LAWRENCE G.P., PAYNE D., GREENLAND D.J., 1979. — Pore size distribution in critical point and freeze dried aggregates from clay subsoils. *J. Soil Sci.*, 30, 499-516.
- LESSARD L., 1985. — Etude de l'organisation d'un sol argilo-limoneux. Modélisation de la conductivité hydraulique à partir des relations expérimentales teneur en eau-succion. *Science du Sol*, 2, 75-88.
- MANICHON H., 1982. — Influence des systèmes de culture sur le profil cultural. Elaboration d'une méthode de diagnostic basée sur l'observation morphologique. Thèse Doc. Ing. INA PG, 214 p.
- 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.
- NEWMAN A.C.D., THOMASSON A.J., 1979. — Rothamsted studies of soil structure. III. Pore size distributions and shrinkage processes. *J. Soil Sci.*, 30, 415-439.

- MURRAY R.S., QUIRK J.P., 1980. — Freeze-dried and critical-point-dried clay. A comparison. *Soil Sci Soc. Am. J.*, 44, 232-234.
- PAPY F., 1984. — Comportement du sol sous l'action des façons de reprise d'un labour au printemps. Effet des conditions climatiques et de l'état structural. Thèse Doc. Ing. INA PG, 232 p.
- REEVE M.J., HALL D.G., 1978. — Shrinkage in clayey subsoils of contrasting structure. *J. Soil Sci.*, 29, 315-323.
- SAFAR T., 1986. — Contribution à l'étude des interactions entre hydraulique agricole, dynamique de l'eau et des sels dans les sols argileux sous climats aride et tempéré. Thèse Univ. Nancy, 276 p.
- SCHOFIELD R.K., 1935. — The pF of water in soil. *Trans. 3 rd Int. Cong. Soil Sci.*, 2, 37-48.
- STENGEL P., 1979. — Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol in situ. *Ann. Agron.*, 30 (1), 27-51.
- STENGEL P., 1981. — Influence des variations de teneur en eau sur l'espace poral : phénomènes de retrait gonflement. *Bull. Gr. Fr. Humidimétrie Neutronique*, 10, 7-9.
- STIRK G.B., 1954. — Some aspects of soil shrinkage and the effect of cracking upon water entry into soil. *Austr. J. Agricul. Res.*, 5, 279-290.
- TESSIER D., BERRIER J., 1979. — Utilisation de la microscopie à balayage dans l'étude des sols. Observation de sols soumis à différents pF. *Science du Sol*, 1, 67-82.
- TESSIER D., 1980. — Sur la signification de la limite de retrait dans les argiles. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 291, Série D, 377-380.
- TESSIER D., 1984. — Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation. Thèse Univ. Paris VII, 361 p.
- Van OORT F., 1984. — Géométrie de l'espace poral, comportement hydrique et pédogenèse. Application à des sols sous prairie et alpage issus de l'altération de calcschistes sédimentaires en moyenne et haute montagne, Alpes du Nord (Beaufortain). Thèse Doc. Ing. INA PG, 281 p.