

ETUDE DE L'ORGANISATION D'UN SOL ARGILO-LIMONEUX MODELISATION DE LA CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE A PARTIR DES RELATIONS EXPERIMENTALES TENEUR EN EAU - SUCCION

L. LESSARD ⁽¹⁾

avec la collaboration technique de

J. OUDARD ⁽¹⁾ et M. PHAN ⁽¹⁾

RESUME

L'étude de la réorganisation d'échantillons non remaniés d'un sol argilo-limoneux soumis à une forme contrainte initiale est abordé de façon indirecte. L'approche consiste à coupler par modélisation (modèle de MUALEM et traitement mathématique de van GENUCHTEN) la conductivité hydraulique relative aux relations de rétention obtenues expérimentalement.

Un schéma global et quantifié de la transformation de l'espace poral est alors ébauché à partir de l'évolution de ces deux grandeurs associées et de nature différente.

Ce schéma peut être rapproché de résultats de recherches entreprises par des auteurs (TESSIER, PARCEVAUX) ayant suivi en microscopie électronique (balayage, transmission) l'évolution de l'organisation macroscopique de la phase solide d'argiles pures ou de plasma sous différentes contraintes.

INTRODUCTION

En Science du Sol, on attache la plus grande importance au problème de la caractérisation des niveaux d'organisation, à différentes échelles, de la particule à l'agrégat, de la phase solide d'un milieu naturel.

Cette thématique explique le développement important, au cours des dernières années, de recherches sur des pâtes d'argiles pures ou des mélanges d'argiles et orientées vers l'étude des mécanismes élémentaires de leur organisation (TESSIER *et al.*, 1980 ; CAMARA, 1982 ; TESSIER, 1984). On admet en effet le rôle fondamental que jouent les argiles dans ces processus d'agrégation et la structuration des sols.

Au cours de ces recherches, il a été établi que l'amplitude de ces mécanismes est à relier de manière globale au niveau d'énergie, c'est-à-dire à la contrainte maximale de dessiccation, imposé initialement à la fraction argileuse et qui définit l'état de référence du système.

Pour l'essentiel, les résultats acquis à partir de pâtes d'argiles reposent sur deux approches complémentaires. D'abord la maîtrise de l'état hydrique des échantillons dans une large gamme de potentiels matriciels (TESSIER, BERRIER, 1979). Ensuite, l'usage de techniques d'observation directe (microscopie électronique à balayage et à transmission) de l'organisation particulière d'argiles pures dont il est possible de déterminer l'initiation de la structure et l'évolution de celle-ci.

(1) INRA, station de Science du Sol - Route de Saint-Cyr, 78000 Versailles.
Association Française pour l'Etude du Sol - www.afes.fr - 2010

L'analyse systématique des relations teneurs en eau-succion est ainsi associée à la description géométrique des niveaux d'organisation des argiles dans un état de référence connu.

Cependant le fait de s'écarter du modèle argile soulève une réflexion méthodologique sur la généralisation de ces techniques aux échantillons non remaniés d'un même sol dont on va modifier l'état de référence. Une importante lacune d'information peut en effet apparaître lorsqu'on aborde l'examen, à un potentiel déterminé, du réarrangement d'un édifice plasma-squelette dont l'organisation initiale est déjà très complexe parce qu'héritée d'une histoire.

L'information obtenue dans ces conditions n'a, au mieux, qu'un caractère qualitatif sans nécessairement offrir de vision globale sur le mode de transformation du système. Pour contourner cette difficulté, on propose une méthode différente que l'on va appliquer à des échantillons non remaniés d'un sol argilo-limoneux. On va chercher à obtenir une réponse phénoménologique, indirecte, mais quantifiée, de la transformation de l'espace poral.

La démarche est d'abord centrée sur un scénario expérimental s'inspirant des études sur les argiles et qui doit conférer au système des propriétés de rétention irréversibles. Ensuite et dans son principe, l'analyse va porter sur l'évolution de la conductivité hydraulique $K(\theta)$ déduite par modélisation (modèle de MUALEM) des différentes relations de rétention $\theta(h)$ ainsi déterminées.

On examinera enfin si l'association de ces grandeurs peut apporter une information sur le mode de réorganisation macroscopique des constituants du sol.

I. EXPERIENCES DE BASE

Ces expériences ont été réalisées sur des séries d'échantillons prélevés entre 58 et 65 cm à la base de l'horizon B du sol brun lessivé sur limon des environs de Versailles. La caractéristique texturale essentielle de cet horizon à ces cotes est la présence dans la fraction argileuse (34,6 %) de kaolinite, d'illite et d'interstratifiés gonflant à base de smectite.

On notera que la caractérisation hydrodynamique de cet horizon a été faite sur dispositif *in situ* (LESSARD, 1981) par l'analyse de cinétiques de ressuyage. La réponse du comportement du sol attribuée à des phénomènes de gonflement s'exprime à l'intérieur d'une enveloppe de courbes de conductivité $K(h)$ et ces phénomènes semblent dépendre des conditions d'hydratation préalables à ces cinétiques.

A) Scénario expérimental

Dans son principe, ce scénario fondé sur deux protocoles différents tend à favoriser dans les mottes non remaniées le développement d'effets structurants. On va chercher à obtenir une première image du comportement du milieu en la matérialisant par deux caractéristiques de rétention $\theta(h)$ référées à deux histoires hydriques de ce sol. Cette image obtenue dans les conditions de la déshydratation va servir de base expérimentale à l'analyse proposée par application du modèle de conductivité.

1^{re} expérimentation :

Aucune contrainte particulière n'est appliquée par une intervention préalable à l'expérience et l'on admet que la relation $\theta(h)$ obtenue traduit assez fidèlement la déshydratation naturelle du milieu. Les teneurs en eau des échantillons saturés

au départ sont mesurées dans une large gamme de succion, depuis la saturation jusqu'à $pF = 6$ ($pF = \log_{10} h$ cm d'eau).

2° expérimentation :

Ce traitement a pour objectif d'imposer au milieu un niveau d'énergie différent de celui qu'il a acquis naturellement.

— les mottes, préalablement saturées, sont déshydratées par mise à l'équilibre sous un potentiel correspondant à $pF = 6$;

— elles sont ensuite progressivement réhydratées jusqu'à saturation.

— les échantillons sont enfin soumis à une deuxième dessiccation au cours de laquelle les teneurs en eau sont mesurées aux mêmes potentiels pF imposés dans la première expérimentation.

B) Résultats expérimentaux

Référée à un potentiel déterminé, chaque mesure de teneur en eau volumique (θ) et de densité apparente est la moyenne des mesures faites sur 5 échantillons (voire 10 si une confirmation est nécessaire). Ces valeurs obtenues au cours des différents traitements figurent au Tableau 1 et l'écart-type associé aux teneurs en eau témoigne d'une reproductibilité raisonnable des mesures (fig. 1 et 2).

Les graphes semi-logarithmiques (fig. 1 et 2) de couples $\theta(h)$ montrent l'effet de la 2° expérimentation souligné par une transformation de caractère irréversible de la relation $\theta(h)$ de rétention des mottes.

1ère expérimentation			2è expérimentation	
pF	cm^3/cm^3	ρ_a	cm^3/cm^3	ρ_a
0	0,414	1,5	0,437	1,46
1	0,404	1,5	0,435	1,46
1,5	0,382	1,58	0,392	1,49
2	0,376	1,58	0,372	1,51
2,5	0,361	1,59	0,353	1,54
3	0,333	1,57	0,309	1,55
3,6	0,305	1,60	0,254	1,63
4	0,290	1,61	0,224	1,67
4,2	0,274	1,66	0,205	1,70
4,4	0,264	1,65	0,201	1,70
4,8	0,170			
5,5	0,119	1,73	0,120	1,73
6	0,052	1,71	0,060	1,72

Tableau 1 :

Teneur en eau volumique et densité apparente des échantillons non remaniés mesurées à différents pF en deshydratation.

Volume water content and bulk density of undisturbed samples measured in drying conditions at different pF .

A partir de ces bases expérimentales et au sens de la méthode proposée, il convient alors, pour interpréter ces résultats, de passer à la conductivité hydraulique en la modélisant à partir des propriétés de rétention.

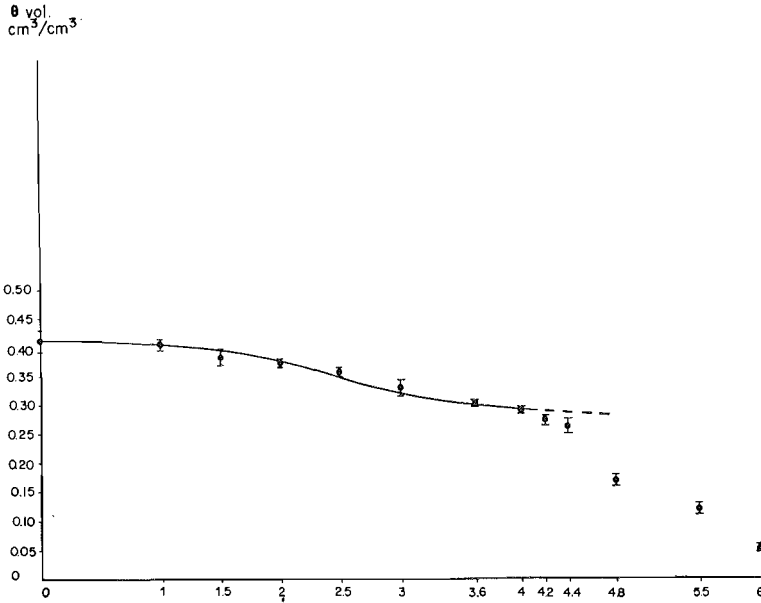


Figure 1 :

Relation teneur en eau-suction θ (h) des mottes non remaniées ; première expérimentation.

Points expérimentaux et écarts-type associés.

Courbe ajustée à partir du modèle pour $\theta_r = 0,25$ cc/cc.

Soil water characteristic of undisturbed clods, first experiment.

Experimental measurements with associated standard deviation.

Fitted curve from the model for $\theta_r = 0,25$ cc/cc.

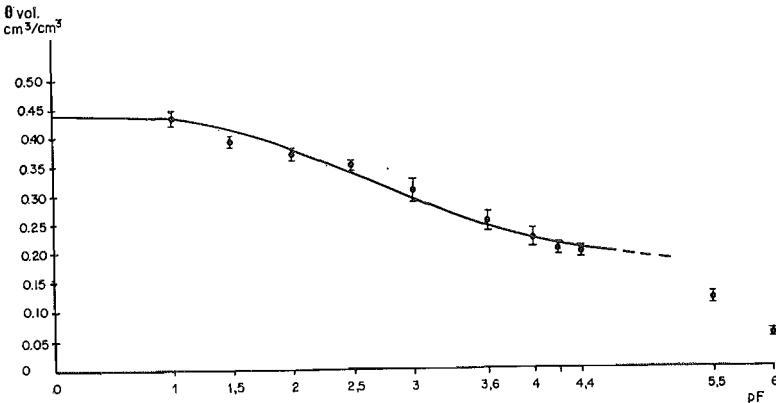


Figure 2 :

Relation teneur en eau-suction θ (h) des mottes non remaniées ; deuxième expérimentation.

Points expérimentaux et écarts-type associés.

Courbe ajustée à partir du modèle pour $\theta_r = 0,15$ cc/cc.

Soil water characteristic of undisturbed clods, second experiment.

Experimental fitted curve for $\theta_r = 0,15$ cc/cc.

II. PASSAGE A LA CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE

A) Le modèle ; généralités

Le modèle utilisé et dont la théorie a été développée par MUALEM (1976) dérive globalement des types de modèles de sommation des contributions de fractions de l'espace poral à la conductivité en milieu non saturé.

La configuration de l'espace poral repose d'abord sur une loi de probabilité de rencontre de pores de tailles différentes. A ce concept est ensuite associée une hypothèse qui attire l'attention en faisant intervenir un facteur géométrique bidimensionnel dans la disposition des pores dont les longueurs sont définies comme proportionnelles aux rayons.

L'ensemble de ces concepts débouche sur une expression analytique intégrale rendue opérationnelle en substituant les rayons de pores par leur équivalent en terme de succion (loi de LAPLACE). A partir de cette expression, il est possible, en ajustant le modèle sur les couples de valeurs expérimentales teneur en eau-potential $\theta(h)$ de calculer les valeurs correspondantes de la conductivité $K(h)$ ou $K(\theta)$. Sur ces bases, les résultats sont exprimés en terme de conductivité relative $K_r = K_{abs}/K_{sat}$.

En déterminant la valeur de la conductivité à la saturation K_{sat} , MUALEM a testé son modèle sur une série de 45 milieux ou matériaux divers d'où il extrait 16 sols qui lui permettent de comparer ses résultats à ceux issus de l'exploitation de modèles d'autres auteurs.

La bonne performance obtenue dans l'agrément observation calcul est un argument en faveur de l'utilisation de ce modèle dans l'approche proposée.

B) Exploitation mathématique du modèle

L'exploitation du modèle est facilitée par une procédure mathématique mise au point par Th. van GENUCHTEN (1980).

Dans l'expression analytique intégrale de MUALEM réécrite par van GENUCHTEN sous la forme :

$$K_r = \Theta^n \left[\int_0^{\Theta} \frac{1}{h(x)} dx / \int_0^1 \frac{1}{h(x)} dx \right]^2$$

K_r est la conductivité en valeurs relatives ; la succion h est une fonction de la teneur en eau Θ dont les valeurs sont affichées dans le modèle en grandeurs adimensionnelles telles que :

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

Les indices s et r désignent respectivement la teneur en eau à la saturation et une teneur en eau dite « résiduelle ». L'exposant n de Θ est un paramètre expérimental pour lequel la déviation entre valeurs de $K(\theta)$ mesurées et calculées est minimale ; à la suite de nombreux essais, MUALEM a montré que n converge vers 1/2.

Van GENUCHTEN utilise alors, pour faciliter la prise en compte par le modèle des résultats expérimentaux, une fonction de traitement mathématique ajustable sur les graphes de couples θ , h , dont la morphologie est conforme à celle des courbes de rétention classique de milieux poreux.

La fonction proposée :

$$\Theta = \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m$$

est introduite dans le modèle en l'explicitant sous la forme $h = h(\Theta)$ en vue de la procédure d'intégration rendue possible sous réserve d'une condition particulière imposée dans une relation entre les paramètres m et n , α étant un coefficient d'ajustement.

Tous calculs faits, van GENUCHTEN donne une expression des valeurs de conductivité relative en fonction de la teneur en eau ou du potentiel matriciel correspondant :

$$K_r(\Theta) = (\Theta)^{1/2} [1 - (1 - (\Theta)^{1/m})^m]^2$$

avec la condition $m = 1 - 1/n$.

C) Aptitude du modèle à l'analyse d'une information phénoménologique. Sa valeur prévisionnelle

Le bien fondé de la démarche dérive avant tout de l'aptitude du modèle à rendre compte des propriétés hydrodynamiques d'un milieu à forte teneur en argile. Or l'adéquation du modèle à ces conditions ne peut être estimée que par un contrôle de ses capacités de prévision.

La seule référence qui puisse être recherchée repose sur la comparaison des valeurs de $K_r(h)$ directement mesurées *in situ* (LESSARD, 1981) aux valeurs calculées par le modèle à partir des résultats expérimentaux obtenus sur mottes et illustrés sur la figure 1. Dans son principe, cette confrontation observation-calcul est en bon accord avec le concept même de la démarche : l'horizon B en place et ses échantillons non remaniés sont en effet maintenus dans le même état initial et étudiés dans le même contexte de la dyshydratation naturelle.

1 - Conditions d'ajustement du modèle

Il est à prévoir que la réponse du modèle va dépendre des conditions d'ajustement de la fonction de van GENUCHTEN sur les relations $\theta(h)$ et il importe en particulier d'étudier l'effet de la prise en compte sur ces ajustements du paramètre θ_r qui apparaît dans cette fonction réécrite sous la forme :

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^m}$$

On rappelle à ce sujet que la notion de teneur en eau résiduelle a souvent fait l'objet de controverses entre chercheurs et il est effectivement difficile, dans le cas le plus général de lui reconnaître un sens physique.

Dans le contexte du modèle de MUALEM, van GENUCHTEN se fonde sur une définition purement mathématique de θ_r telle que $d\theta/dh \rightarrow 0$ pour $\theta \rightarrow \theta_r$. Cet auteur souligne notamment ces difficultés d'ajustement lorsque ces couples θ , h , n'ont pas fait l'objet de mesures à des suctions suffisamment élevées. Il propose l'alternative suivante dans sa procédure de traitement :

— soit une méthode d'extrapolation numérique de la fonction au travers des plus basses valeurs de θ mesurées ;

— soit la possibilité d'imposer au préalable une valeur du paramètre θ_r sous réserve qu'elle soit connue comme une condition à la limite de l'ajustement.

Cette deuxième méthode est utilisée dans la présente démarche pour rendre l'ajustement de la fonction plus conforme à certaines réalités physiques tirées de l'interprétation de la morphologie du graphe $\theta(h)$ de la figure 1.

2 - Identification du paramètre θ_r

Sur ce graphe (fig. 1), on identifie entre la saturation et $pF = 4$, une relation $\theta(h)$ à terminaison de tendance asymptotique dont l'allure est proche de celle de courbes classiques de rétention de milieux poreux. Entre $pF = 4$ et $pF = 6$, dans la gamme des fortes contraintes, le phénomène de déshydratation se manifeste par une importante discontinuité.

— L'élément de rétention de tendance asymptotique peut être l'image d'une bonne interconnection entre certains domaines de l'espace poral ;

— En revanche, la discontinuité observée est probablement significative d'une marge d'accessibilité réduite entre des distributions très différentes de tailles de pores subsistant de part et d'autre.

Cette interprétation, si elle est fondée, laisse supposer qu'une telle discontinuité peut être en relation avec une teneur en eau particulière associée à un potentiel qui atteint la valeur d'entrée d'air dans certaines classes de pores.

On a pu argumenter dans ce sens par une approche expérimentale différente des précédentes. La procédure consiste à remanier les mottes de sol par traitement mécanique et à déshydrater les échantillons dans la gamme de potentiels englobant la discontinuité majeure observée sur la figure 1.

Les résultats du tableau II sont illustrés par la fig. 3 où l'on a reporté, entre $pF = 3$ et $pF = 6$, les valeurs des indices d'eau w référées au volume du solide et les valeurs associées d'indice des vides e . Une entrée d'air est alors identifiable (1) et s'établit sans ambiguïté entre $pF = 4.4$ et $pF = 4.8$ à l'amorce du palier de la courbe d'indice des vides qui marque la limite de retrait du matériau remanié.

pF	ρ_a	w	e
3	1,40	0,89	0,93
3,6	1,54	0,73	0,75
4	1,66	0,56	0,63
4,2	1,75	0,49	0,54
4,8	1,85	0,25	0,46
5,5	1,86	0,18	0,45
6	1,86	0,12	0,45

Tableau 2 :

Densité apparente ρ_a ,
indice d'eau w , indice
des vides e mesu-
rées sur échantillons
remaniés en deshydra-
tation.

*Bulk density ρ_a , wa-
ter ratio w , voids ra-
tio e of disturbed
samples in drying
conditions.*

(densité du solide, density of solid, $\rho_s = 2,7$)

Cette expérience tend à montrer que l'histoire du milieu n'a été que partiellement effacée par le remaniement :

— En deçà de la valeur d'entrée d'air, les relations e et w sont presque confondues ; il y aurait évanescence des classes de pores macroscopiques fragiles et sensibles au traitement.

— Au delà, subsisterait une classe de pores en cours de déshydratation pouvant résider à l'intérieur d'entités particulières ou d'organisations plasmiques résistantes au remaniement mécanique.

(1) On constate tout au moins que le décalage entre la teneur en eau et l'indice des vides ne s'accroît que très légèrement de pF 3 à pF 4,2 ; l'entrée d'air ne devient réellement significative qu'au-delà de ce pF .

Sur la figure 1, au droit de cette discontinuité, une teneur en eau volumique particulière pour une valeur moyenne de l'ordre de $0,25 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ peut être sensiblement mise en corrélation avec le potentiel d'entrée d'air explicité sur la figure 3. Il s'agit donc d'une condition à la limite qui pourrait se définir comme la teneur en eau à la saturation d'une fraction très fine du spectre poral après déshydratation de gammes de pores macroscopiques.

Si l'on identifie cette teneur en eau particulière à θ_r , la prise en compte par le modèle de la valeur expérimentale $\theta_r = 0,25 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ conduit à un accord satisfaisant (fig. 1) entre la courbe calculée et les mesures dans un domaine de potentiels compris entre $pF = 1,5$ (ou au voisinage) et $pF = 4$.

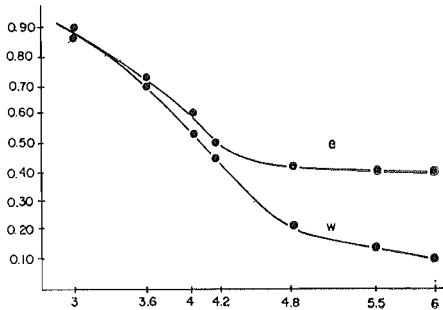


Figure 3 :

Indice des vides e et indice d'eau W des échantillons remaniés en fonction de la succion.

Void ratio e and water ratio W of disturbed samples vs suction.

En revanche, aux très basses succions ($\leq pF = 1$), la fonction de van GENUCHTEN s'ajuste médiocrement par lissage des valeurs de θ (h) dessinant une légère inflexion sur le palier de saturation. Or cette caractéristique morphologique de la relation θ (h) de la figure 1 se retrouve également sur celle de la figure 2.

On est donc conscient de l'incidence, sur les résultats de la modélisation, de cette lacune qu'il faudrait combler au niveau de la connaissance de tels phénomènes et de leur prise en compte par une modification de la procédure numérique.

3 - Test du modèle

Les conditions nécessaires pour tester la valeur prédictive du modèle dans le contexte de l'histoire réelle et de la déshydratation naturelle du milieu se ramènent donc :

- au critère de l'ajustement « au mieux », connecté à la détermination de θ_r , de la fonction de van GENUCHTEN sur l'élément de la relation θ (h) représentatif sur le graphe 1 entre $pF = 1,5$ et $pF = 4$ de la porosité structurale.

- à la mesure de la conductivité saturée K_{sat} sur l'horizon en place de manière à exprimer les valeurs de K obtenues *in situ* en grandeurs adimensionnelles $K_r = K/K_{sat}$ (tableau III) pour les comparer aux conductivités relatives calculées par le modèle. Cette mesure a été pratiquée par la méthode du double anneau et la valeur moyenne obtenue après répétitions est de $0,3 \text{ cm/h}$.

Succion h (cm)	Conductivité relative $K_r = K/K_{sat}$
- 10	0,066
- 15	0,030
- 20	0,020
- 25	0,011
- 35	0,077
- 45	0,0057
- 50	0,0043
- 55	0,0040
- 60	0,0037
- 65	0,0027
- 80	0,0020
- 90	0,0013

Tableau 3 :

Valeurs de la conductivité relative K mesurées in situ à la base de l'horizon B du sol de Versailles (LESSARD, 1981).

Relative hydraulic conductivity measured in situ at different pressures in the clayey loam B horizon of Versailles

Ces conditions étant réunies, des valeurs calculées de $K_r(h)$ sont en accord raisonnable, à partir de $pF = 1$, avec les valeurs de $K_r(h)$ mesurées in situ en 1977 (fig. 4). En deçà de ce pF , les valeurs modélisées amorcent une déviation.

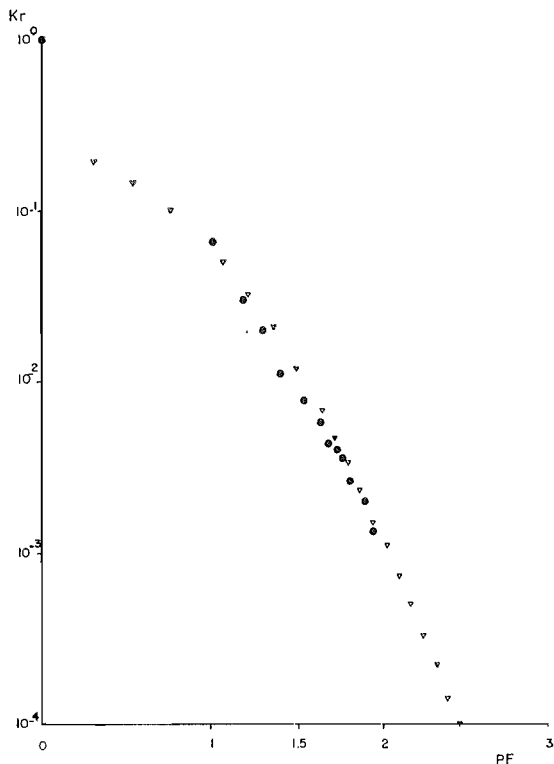


Figure 4 :

Conductivité hydraulique relative K en fonction de la succion.

- mesures expérimentales in situ.
- ▼ valeurs calculées par le modèle.

Relative hydraulic conductivity K vs suction.

- in situ experimental measurements.
- ▼ calculated values from the model.

Cette correspondance bien que partielle, permet d'avancer l'hypothèse que ces classes de pores d'un domaine macroscopique peuvent être prises en compte par les mottes non remaniées au laboratoire.

III. APPLICATION DES RESULTATS PRECEDENTS A LA COMPREHENSION DES PHENOMENES DE REORGANISATION MACROSCOPIQUE DE L'ESPACE PORAL

La démarche revient donc à analyser la transformation de l'espace poral à partir de l'évolution des deux grandeurs θ (h) et K (θ) associées.

Dans cette optique, l'exposé qui va suivre a pour but :

- de définir les modalités d'application du modèle au problème posé ;
- d'ébaucher un schéma de réorganisation de l'espace poral à partir des données globales obtenues ;
- d'examiner si ce schéma de l'espace des vides est cohérent avec certains résultats de recherches sur l'organisation de la phase solide de sols ou matériaux soumis à des processus de dessiccation et d'humectation.

A) Application du modèle au problème posé

1 - Critère d'ajustement de la fonction de traitement de van GENUCHTEN

On rappelle que dans les conditions de la figure 1, un bon ajustement de cette fonction a été réalisé lorsqu'il a porté sur une mesure du paramètre θ_r auquel on a pu donner un sens physique. Dans le cas où ce paramètre n'est pas déterminé explicitement, on admettra que cette corrélation peut valider une procédure d'ajustement numérique si le choix d'une valeur approchée de θ_r permet de minimiser l'écart observation/calcul.

Cette procédure adoptée dans les conditions de la figure 2 introduit l'hypothèse que les valeurs K (θ) ou K (h) calculées à partir des données de la 2^e expérience peuvent être représentatives des propriétés hydrodynamiques des mottes de sol dans leur nouvel état de référence.

Pour récapituler, les teneurs en eau particulières θ_r reportées dans le tableau ci-dessous fixent les conditions d'ajustement qui permettent au modèle de prendre en compte la porosité macroscopique.

Figures	Relations θ (h), domaines de potentiels	θ_r
1	pF voisin de 1.5 \rightarrow pF = 4	0,25
2	pF voisin de 1.5 \rightarrow pF = 4.4	0.15

2 - Représentation des courbes de conductivité modélisées

L'application du modèle aux différentes relations θ (h) du tableau I permet d'obtenir des courbes de conductivité en valeurs relatives que l'on peut représenter en fonction de la teneur en eau ou de la succion.

On a cependant choisi de reporter sur les figures 5 et 6 les valeurs de la conductivité en fonction de la teneur en eau, K_r (θ).

En effet, l'abscisse arithmétique des teneurs en eau facilite les comparaisons et fait apprécier l'évolution de cette caractéristique. Par contre, l'abscisse en terme de pF contracte l'échelle des suctions et donne une vision moins significative de ce phénomène.

**B) Analyse de l'évolution des relations θ (h) et K (θ).
Signification de la réponse globale du milieu.**

La modification de l'organisation des mottes due au traitement expérimental est révélée par leur comportement hydrique dans les conditions de la déshydratation.

La première information est à rechercher dans la transformation irréversible de la courbe initiale θ (h) (fig. 1) en une deuxième courbe (fig. 2).

On observe en premier lieu une concavité nettement accrue de cette deuxième courbe d'allure asymptotique entre $pF = 1.75$ et $pF = 4.4$. En second lieu et de manière concomitante, une tendance significative à l'effacement de la discontinuité majeure identifiée sur la figure 1 à partir de $pF = 4$ et dont le sens physique a été déterminé par approche expérimentale (3^e expérience).

Ces observations montrent que les potentiels agissent dans une gamme de teneurs en eau plus élargie d'où l'on tire la conséquence que les propriétés de rétention sont certainement reliées à une distribution de tailles de pores plus monotone.

On constate enfin qu'au-delà de $pF = 4.8$ les parties terminales des deux graphes sont à peu près confondues. Ce fait peut être interprété comme la coalescence des niveaux d'organisation de la phase solide dont la structure n'est plus évolutive sous de très fortes contraintes et qui tend vers sa limite de retrait.

La morphologie des deux courbes K_r (θ) (figures 5 et 6) obtenues par calage du modèle sur les bases expérimentales précédentes contient en elle-même une information qui permet de relier globalement l'évolution de facteurs géométriques à celle des propriétés hydrodynamiques.

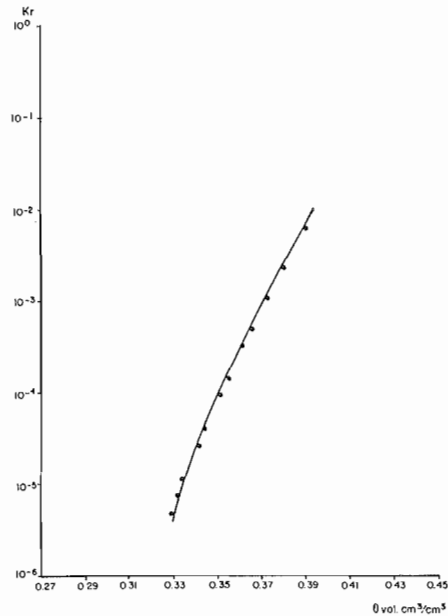


Figure 5 :

Courbe de conductivité relative K en fonction de la teneur en eau θ résultant de l'ajustement du modèle sur la première relation expérimentale θ (h).

Calculated relative hydraulic conductivity vs water content from the first fitted soil water characteristic.

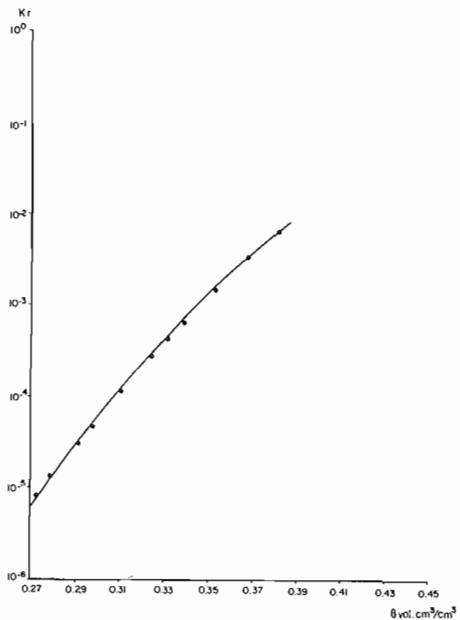


Figure 6 :

Courbe de conductivité K en fonction de la teneur en eau θ résultant de l'ajustement du modèle sur la deuxième relation expérimentale θ (h).

Calculated relative hydraulic conductivity vs water content from the second fitted soil water characteristic.

Un schéma d'organisation de l'espace poral dû au changement d'état des mottes peut être en effet déduit de la pente nettement atténuée de la courbe $K_p(\theta)$ (fig. 6) par rapport à celle de la courbe initiale (fig. 5).

L'étalement, sous la courbe $K_p(\theta)$ de la figure 6, du domaine des teneurs en eau est significatif. Cette disposition sous-entend que les propriétés hydrodynamiques s'exercent dans un édifice structural différent dans lequel s'est créé un espace poral beaucoup plus graduel, intermédiaire et au dépend des organisations plasmiques.

La continuité des chemins conducteurs joue en effet un rôle très important sur ces propriétés et les processus résultant du traitement expérimental ont certainement amélioré les seuils d'accès d'une gamme de pores à une autre.

Cette interprétation du réarrangement spatial des mottes à partir de la conductivité calculée est tout à fait concordante avec l'information précédente ayant pour fondement des approches expérimentales.

On aboutit ainsi à une image cohérente de l'évolution du spectre poral et le modèle utilisé renforce l'analyse en couplant par une relation fonctionnelle deux grandeurs de nature physique différente :

— l'une, $\theta(h)$, est l'expression du potentiel énergétique de l'eau à différentes échelles d'organisation du milieu.

— l'autre, $K_p(\theta)$, est étroitement dépendante des chemins macroscopiques qui assurent ou améliorent la continuité du passage du fluide dans la porosité.

La réponse quantifiée du fonctionnement des vides (pores, itinéraires) permet simultanément l'accès à une information globale sur le mode de structuration de la phase solide.

La transformation qui s'opère à l'intérieur de volumes représentatifs d'assemblage issus des interactions plasma-squellette et qui tend à faire disparaître une hétérogénéité dans la distribution de tailles de pores est très probablement liée à des phénomènes de division dans la matrice d'échantillons peu agrégés à l'état naturel.

L'étude expérimentale servant de support à la modélisation et permettant d'aboutir à ces conclusions s'inspire par ailleurs de protocoles utilisés par D. TESSIER au cours de recherches approfondies sur le comportement d'argiles pures et leur rôle potentiel dans la structuration des sols.

D. TESSIER (1984) a montré, par l'analyse très fine d'observations directes (MEB, MET), que la résultante des processus de dessiccation et d'humectation pouvait aboutir à une réorganisation irréversible de la phase solide et par conséquent du spectre poral. Il a notamment observé qu'au cours de la réhydratation, les propriétés de gonflement acquises aux très fortes succions agissent par cisaillement dans la phase solide en individualisant de nouvelles entités particulaires.

En utilisant également la microscopie électronique à balayage, P. PARCEVAUX (1980) a montré que dans certains milieux argileux non remaniés et relativement compacts, la progressivité du gonflement en réhydratation engendrait deux phénomènes simultanés :

— La division d'agrégats primaires en agrégats secondaires de tailles de plus en plus réduites,

— La formation de pores inter-agrégats et de taille croissante.

Une convergence s'établit donc entre des résultats de nature différente :

— Les uns déduits d'une réponse globale du système,

— Les autres relevant d'une description minutieuse, en observation directe, d'assemblages de particules.

CONCLUSION

Le but de cette note est une tentative pour relier l'évolution de facteurs géométriques à celle de propriétés d'un sol argilo-limoneux soumis à une forte contrainte.

La démarche revêt à ce niveau l'aspect d'un essai méthodologique dont l'application doit être confrontée à la complexité du milieu naturel.

Un des intérêts de cette note est de montrer que, dans une certaine mesure, la modélisation mathématique peut s'appliquer à l'étude de l'organisation de la phase solide de milieux de texture fine sous réserve de déterminer le sens physique de certains paramètres.

Il convient en effet, dans ce type d'approche, de s'assurer que le couplage de deux caractéristiques différentes d'un système est validé au sens conceptuel de la modélisation. Cet objectif semble être en partie atteint par l'identification du paramètre θ_r . L'imposition, dans la procédure de calcul, de la valeur mesurée de cette teneur en eau particulière paraît compatible avec l'ajustement correct du modèle sur la partie des résultats expérimentaux la plus représentative de la transformation profonde du milieu.

Dans le cas précis étudié, ce paramètre peut définir une condition à la limite dans l'application du modèle à la porosité macroscopique d'un système à géométrie variable.

Il serait enfin souhaitable d'entamer une réflexion sur certaines hypothèses introduites par MUALEM (1976) et relatives à des dispositions géométriques susceptibles d'intervenir dans le fonctionnement de la porosité inter-particulaire.

Ces hypothèses pourraient être confrontées à des modèles d'assemblage de particules de milieux déformables et vérifiés par l'expérience.

Reçu pour publication : Février 1984

Accepté pour publication : Mars 1985

STUDY OF THE ORGANIZATION OF A CLAYEY LOAM SOIL MODELLING OF HYDRAULIC CONDUCTIVITY FROM EXPERIMENTAL SOIL WATER PROPERTIES

The study of reorganizing of undisturbed clayey loam soil samples subjected to a strong initial drying stress is approached indirectly. The method is to relate by a model (MUALEM's model, 1976 ; van GENUCHTEN mathematical procedure, 1980) the relative hydraulic conductivity $K(\theta)$ to the experimental soil water retention properties $\theta(h)$. A comprehensive and quantified draft of the poral space transformation is then suggested based on the evolution of these two associated characteristics.

The approach relies on experiments inspired from recent studies on pure clay water behaviour (TESSIER and al., 1980 ; TESSIER, 1984). The experiments are applied to sets of samples from the bottom of the Versailles soil B horizon, the clayey components (34,6 %) of which are kaolinite, illite and smectite. The water contents are measured in a large range of suction h from saturation to $pF = 6$ ($pF = \log_{10} h$ cm of water).

During the first experiment, no preliminary stress is applied to clods and we admit that this soil water characteristic is representative of the natural deshydration of the medium (Table 1, first experiment).

The aim of the second experiment is to modify the water behaviour of clods submitting them to an initial energy level :

- the saturated clods are driep up to equilibrium at $pF = 6$;
- the are progressively rewetted to saturation ;

— the same clods are finally submitted to a second drying during which water contents are measured at same pF as in the first experiment (Table 1, second experiment).

The comparison of the two semi-log graphs $\theta(h)$ (fig. 1 and 2) thus obtained in drying conditions shows the result of the second experiment underlined by a marked change of retention properties of samples.

The second part of the paper is devoted to the fitting of the hydraulic conductivity model on these experimental bases. Taking into account in the fitting process the parameter θ_r (residual water content) is of great importance. The estimation of this parameter assimilated here to a particularly and physically identified water content (air entry value into the plasmic fabric, fig. 3, third experiment) allows to verify the previsionnal capacity of the model applied to a very fine textured medium. Reasonable agreement is obtained between $K(h)$ measured in situ (LESSARD, 1981) and the $K(h)$ computed from the model (fig. 4).

An outline of the reorganization of the poral space is then deduced from the evolution of the two main related characteristics of different physical nature, $\theta(h)$ and $K(h)$.

1. - The irreversible evolution of retention or equilibrium properties is marked by an increasing of the concavity of the $\theta(h)$ relation coherent with the vanishing tendency of the observed discontinuity between $pF = 4$ and $pF = 4.8$. This evolution might reflect the existence of a more continuous pore size distribution at the expense of a finer porosity occurring initially in the plasmic fabric.

2. - The clearly reduced slope of the second $K(h)$ curve (fig. 5 and 6) in a larger range of water contents is significant. The shape of the curve suggests that hydrodynamic properties are active in a different structure as a result of the formation of a more gradual porosity. Continuity of flow paths plays as a matter of fact a prominent part in these properties. Processes resulting from second experiment have probably improved the thresholds of accessibility from pore size distribution to another.

This draft is compared to results of other authors (TESSIER, 1984 ; PARCEVAUX, 1980) having visually followed the evolution of pure clays or plasmic fabrics macroscopic organization under different stresses. These authors observed more particularly during rewetting from very high suctions that the swelling properties induce shear structure in the solid phase individualizing new types of particles.

BIBLIOGRAPHIE

- CAMARA L., 1982 — Comportement hydrique et propriétés de gonflement macroscopique de mélanges d'argiles. Thèse 3^e cycle, Paris VI, 155 p.
- van GENUCHTEN M. Th., 1980 — A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soils Sci. Soc. Am. J.* 44 : 892-898.
- LESSARD L., 1981 — Caractérisation hydrodynamique d'un sol non saturé et évolution structurale. *Science du Sol* n° 1, 55-72.
- MUALEM Y., 1976. — A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, vol. 12, n° 3, 513-522.
- PARCEVAUX P., 1980. — Etude microscopique et macroscopique des sols argileux. Thèse Doc. Ing. Univ. Paris VI, 265 p.
- TESSIER D., PEDRO G., CAMARA L., 1980. — Sur le comportement hydrique et l'évolution de l'organisation des argiles (kaolinites et smectites) au cours de la dessiccation et de la réhumectation. *C.R. Acad. Sci Paris*, t. 290, série D., 1169-1172.
- 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 Doctorat ès-Sciences, Paris VII, 361 p.