

Comportement des sols fins compactés à l'humidification. Apport d'un modèle de microstructure

V. FERBER
J.-C. AURIOL

Laboratoire central
des ponts et chaussées
Route de Bouaye
BP 4129
44341 Bouguenais Cedex
valery.ferber@lcpc.fr
jean-claude.auriol@lcpc.fr

Y.J. CUI

CERMES-ENPC
6 et 8, avenue Blaise-Pascal
Cité Descartes
Champs-sur-Marne
77455 Marne-la-Vallée
Cedex 2, cui@cermes.enpc.fr

J.-P. MAGNAN

Laboratoire central
des ponts et chaussées
58, bd Lefebvre
75732 Paris Cedex 15
jean-pierre.magnan@lcpc.fr

Résumé

Les déformations des sols fins dues aux variations d'état hydrique causent de nombreux dommages aux structures et ouvrages du génie civil, et on peut encore déplorer un déficit méthodologique permettant leur prévision. Dans le cadre des recherches visant à optimiser l'emploi des sols fins dans les remblais routiers et ferroviaires, l'étude présentée avait pour objectif de proposer une méthodologie d'étude destinée à évaluer l'influence de la nature et de l'état initial des sols compactés sur les risques de désordres par humidification.

Pour aborder cette question, un modèle de microstructure reposant sur l'organisation de la fraction argileuse en agrégats a été défini. Grâce aux développements technologiques récents en microscopie électronique à balayage et en porosimétrie par intrusion de mercure, les paramètres du modèle ont pu être formulés uniquement sur la base de paramètres géotechniques conventionnels.

Ce modèle quantitatif de microstructure a été utilisé pour décrire le gonflement libre et les déformations par humidification sous contrainte, en étudiant l'influence du volume des vides inter-agrégats initial. Cette approche a permis de décrire quantitativement les évolutions de la microstructure causées par l'humidification, et de mettre au point une méthodologie d'étude des sols compactés dans la perspective de leur réutilisation dans des remblais en contexte délicat (zone inondable, remblais de grande hauteur...).

Mots-clés : argile, microstructure, agrégats, gonflement, compactage, remblais, minéralogie, physico-chimie.

Sensitivity of compacted fine-grained soils to wetting. Contribution of a microstructural model

Abstract

The deformations of fine-grained soils due to water content variations are responsible for many damages to civil engineering structures. In the framework of a research program aiming at optimising soil uses in road and railways embankments, the present study was aimed at evaluating the influence of soil nature and initial conditions on the risk of disorders due to wetting.

This question was analysed by defining a microstructural model, based on the organisation of the clay fraction in aggregates. Thanks to recent technological developments in scanning electron microscopy and mercury intrusion porosimetry, fundamentals hypothesis were suggested in order to determine the model parameters from conventional geotechnical parameters.

NDLR : Les discussions sur cet article sont acceptées jusqu'au 1^{er} août 2008.

Introduction

Les variations d'état hydrique dans les sols fins sont à l'origine de déformations qui peuvent causer des dommages importants sur les structures telles que les habitations, les ouvrages d'art, les chaussées ou les voies ferrées. Ces modifications de l'état hydrique du massif de sol résultent des variations météorologiques et peuvent atteindre une amplitude particulièrement importante dans les périodes exceptionnelles, causant alors des désordres pouvant remettre en cause l'usage même des structures.

Les déformations des sols fins par séchage et humidification ont fait l'objet de nombreuses recherches, depuis plusieurs décennies, ce qui a permis de mettre en évidence trois points fondamentaux :

- les principaux paramètres qui gouvernent l'amplitude des déformations par séchage-humidification sont essentiellement la nature du sol (Seed *et al.*, 1962), sa teneur en eau et sa masse volumique à l'état initial (Holtz et Gibbs, 1956), l'état de contrainte appliqué pendant les sollicitations hydriques (Serratrice et Soyez, 1996) et enfin l'amplitude des sollicitations hydriques, c'est-à-dire l'amplitude des suctions appliquées au sol (Alonso *et al.*, 1999) ;

- les déformations par variation d'état hydrique sont caractérisées par une composante réversible et une composante irréversible. Ainsi, à l'occasion d'un cycle de séchage-humidification, le retrait dû à la phase de dessiccation est partiellement compensé par le gonflement dû à l'humidification grâce à la composante réversible du phénomène, mais on observe cependant une accumulation des déformations avec le nombre de cycles, mettant en évidence la composante irréversible (Alonso *et al.*, 1999) ;

- la microstructure du sol, c'est-à-dire l'organisation de ses particules à l'échelle élémentaire, paraît avoir une influence sur les déformations (Gens *et al.*, 1995) mais elle reste encore difficile à décrire quantitativement.

Ainsi, malgré les avancées dans la description de ces phénomènes, l'influence des différents paramètres gouvernant la déformation reste encore mal quantifiée et les méthodes de calcul et de prévision proposées dans la littérature sont basées soit sur des considérations empiriques dont la portée est, par nature, limitée (Derriche et Kebaili, 1998), soit sur des modèles de comportement reposant sur de nombreux paramètres dont la détermination est complexe et peu compatible avec la pratique courante de la géotechnique (Alonso *et al.*, 1999).

Dans le cadre de la recherche présentée ici, qui porte sur le comportement des remblais routiers et ferroviaires, la question des déformations par variations d'état hydrique a été abordée avec l'objectif de propo-

This quantitative microstructural model was used to describe the free swell deformations and deformations due to wetting under vertical stress, by studying the influence of initial inter-aggregate volume. Thanks to the microstructural model, the changes in intra-aggregate and inter-aggregate volumes were quantified and a new methodology was developed for the design of roads and railways embankments in sensitive contexts (areas liable to flooding, high embankments...).

Key words : clay, microstructure, aggregates, swelling, compaction, embankments, mineralogy, physico-chemistry.

ser une méthode de prévision des déformations par humidification. L'idée sous-jacente est qu'une humidification complète constituerait la sollicitation la plus préjudiciable à un sol compacté. Cette hypothèse peut être discutée mais elle permet de se concentrer dans un premier temps seulement sur les conséquences de l'humidification.

La recherche d'une méthode de prévision a conduit à mettre au point un modèle de microstructure qui sera présenté dans un premier temps. L'application de ce modèle à l'interprétation des essais d'humidification sera présentée ensuite, d'une part, pour les essais sous faible contrainte (gonflement libre) et, d'autre part, pour les essais d'humidification sous contrainte variable. Les interprétations seront ensuite confrontées à des observations de la microstructure du sol pour évaluer la pertinence du modèle.

Un modèle de microstructure des sols fins compactés

Quelques traits communs à la microstructure des sols fins compactés

La microstructure des sols a fait l'objet de nombreuses recherches au cours des dernières décennies, aussi bien dans le domaine de la géotechnique que celui des sciences du sol. Depuis les travaux précurseurs de Lambe (1958), les connaissances sur l'influence des propriétés de nature et d'état des sols sur la microstructure ont progressé de manière remarquable (Diamond, 1969 ; Tessier, 1984 ; Benett et Hulbert, 1986 ; Bruand et Prost, 1997 ; Delage *et al.*, 1996), jusqu'à sa modélisation par l'outil mathématique des fractales (Bird et Perrier, 2003). D'une manière simplifiée, ces différentes observations sur la microstructure et les propriétés physico-chimiques des sols fins compactés permettent de faire ressortir trois points essentiels :

- **le premier point est la différence fondamentale entre les particules argileuses et les particules non argileuses.** Bien que la nature minéralogique des particules argileuses puisse être très variée, leurs propriétés physico-chimiques (surface spécifique, capacité d'échange cationique) et leur morphologie (dimension, forme) en font des particules à part dans le sol. Pour les sols ne contenant pas de matière organique, on peut ainsi considérer en première approximation les particules non argileuses comme des particules inertes. La caractérisation et la quantification de la fraction argileuse sont donc un point essentiel de l'identification d'un sol ;

– le deuxième point est l'organisation des particules argileuses en agrégats : les particules dites « élémentaires » (Tessier, 1984), de dimension micrométrique, se regroupent en « paquets » que l'on qualifiera de particules « primaires » (Fig. 1). Les particules primaires se regroupent elles-mêmes en plus gros agrégats qui se regroupent eux-mêmes selon le même mode, conférant ainsi à la structure du sol un caractère fractal (Benett et Hulbert, 1986 ; Gimenez *et al.*, 1997). Même si la nature minéralogique conduit à des morphologies de particules primaires différentes, il nous semble que l'on peut définir la particule primaire, que nous appellerons « agrégat », comme la structure de plus petite dimension formée par le regroupement de particules élémentaires. Enfin, cette structuration en agrégats conduit à différencier des pores intra-agrégats, localisés dans la particule primaire, et des pores inter-agrégats, localisés entre les particules primaires. Les premiers sont de beaucoup plus petite dimension que les seconds ;

– le troisième point est la relation entre indice des vides et volume inter-agrégats : il a été montré que les particules primaires ne sont pas affectées par le processus de compactage, et que le volume des pores inter-agrégats diminue avec l'indice des vides (Delage *et al.*, 1996 ; Wan *et al.*, 1995).

Ces trois points méritent d'être complétés par une réflexion sur la localisation de l'eau dans un sol fin compacté non saturé. Dans ce type de sol, les suctions les plus élevées sont dues à la composante d'adsorption des particules argileuses, au sein des agrégats argileux. Par ailleurs, la composante capillaire, qui dépend du rayon des pores, est logiquement plus forte au sein des agrégats que dans les pores inter-agrégats, qui sont de plus grande dimension. Ces éléments suggèrent donc que l'eau doit être attirée préférentiellement au sein des agrégats et que c'est donc là sa localisation privilégiée dans un sol non saturé.

Ces hypothèses ont pu être confrontées à des observations au microscope électronique à balayage (MEB) environnemental, outil qui permet d'observer un même échantillon à l'échelle microscopique au cours

d'une humidification et/ou d'un séchage. Ces observations montrent que, lors de l'humidification d'un sol fin compacté initialement sec (Fig. 2a), l'eau (qui forme un film noir sur les images MEB) pénètre d'abord dans les agrégats argileux (Fig. 2b) et ne remplit les vides inter-agrégats que dans un second temps. C'est donc bien au sein des agrégats argileux que l'eau est attirée préférentiellement.

2.2

Formulation du modèle

Ces observations communes à l'ensemble des sols fins compactés permettent de proposer une quantification simple des volumes des vides intra- et inter-agrégats, selon une approche déjà proposée pour étudier et modéliser le retrait des sols (Braudeau, 1988 ; Boivin *et al.*, 2004). En effet, si l'eau du sol est localisée au sein des agrégats, c'est que les vides inter-agrégats ne contiennent que de l'air. Si l'on suppose en outre que les agrégats sont saturés d'eau, le volume des vides intra-agrégats peut être assimilé au volume d'eau et le volume des vides inter-agrégats peut être assimilé au volume d'air. Ceci permet de définir :

– un indice des vides des agrégats, noté e_{ag} (eq. 1), qui est le rapport entre le volume d'eau et le volume des particules solides ;

– un indice des vides inter-agrégats, noté e_{i-ag} (eq. 3), qui est le rapport entre le volume d'air et le volume des particules solides, mais qui est aussi la différence entre l'indice des vides global du sol et l'indice des vides des agrégats (eq. 2).

$$e_{ag} = \frac{V_w}{V_s} = \frac{w p_s}{p_w} \quad (1)$$

$$e = e_{ag} + e_{i-ag} \quad (2)$$

$$e_{i-ag} = e_{air} = \frac{V - V_{ag}}{V_s} = e - \frac{w p_s}{p_w} = \frac{p_s}{p_d} - 1 - \frac{w p_s}{p_w} \quad (3)$$

Selon ce modèle, l'indice des vides des agrégats

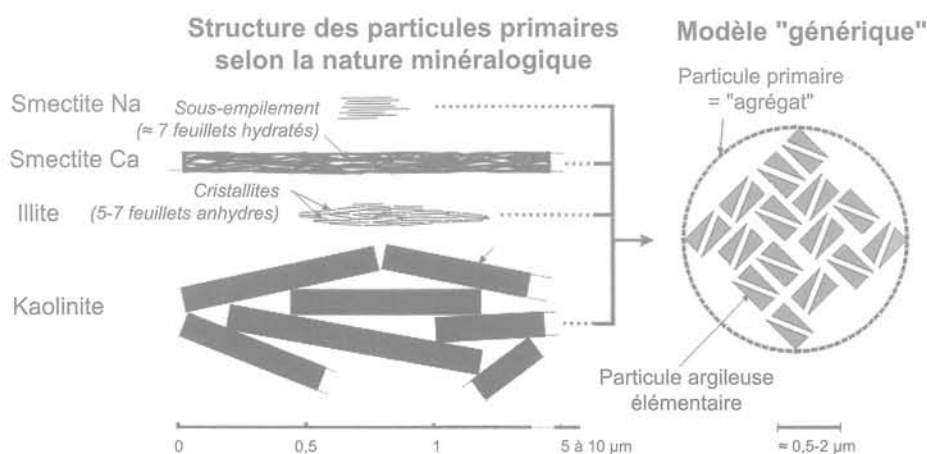


FIG. 1 Représentation simplifiée des différentes formes de particules primaires par un modèle générique de particule primaire. (Tessier, 1984).

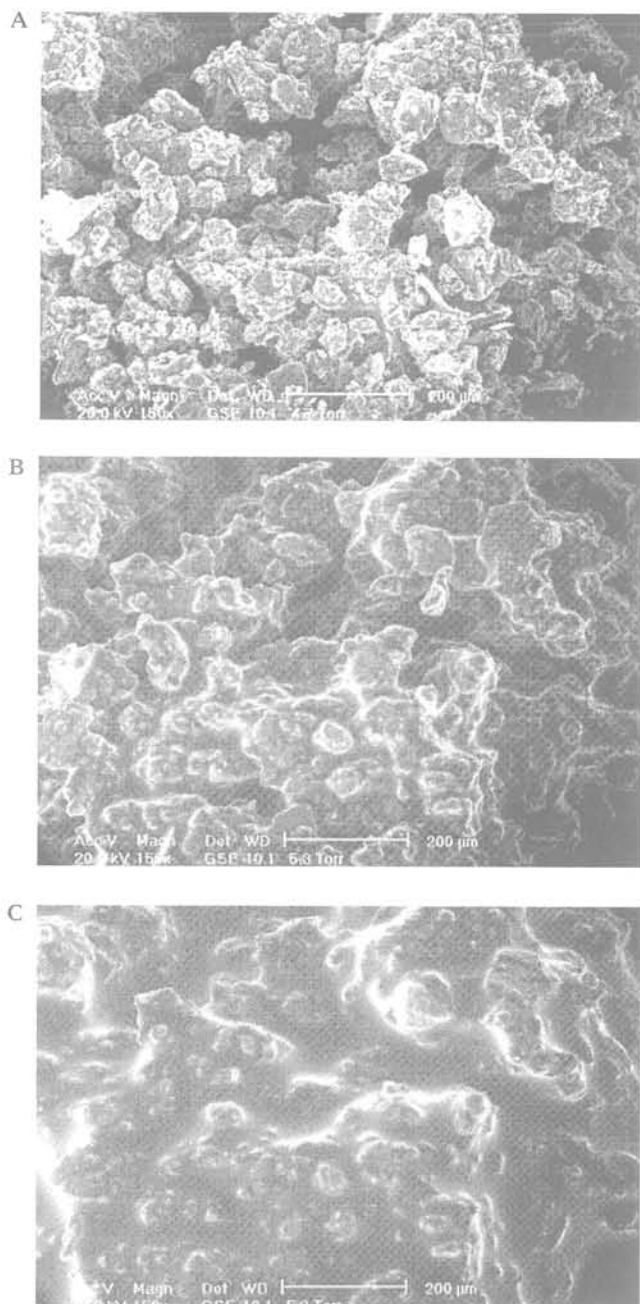


FIG. 2 Observation de particules argileuses à différentes étapes (A : avant humidification ; B : après hydratation des agrégats ; C : après remplissage des vides inter-agrégats).

augmente linéairement avec la teneur en eau du sol et l'indice des vides inter-agrégats résulte de l'influence conjuguée de la teneur en eau et de l'indice des vides global du sol (Fig. 3).

3

Étude du gonflement libre

Le modèle de microstructure présenté dans le paragraphe précédent permet de quantifier deux paramètres microstructuraux du sol compacté non saturé. Dans la suite de cet article, on cherchera à décrire l'évolution de ces paramètres au cours d'essais d'humidification, et dans un premier temps d'essais sous faible contrainte, appelés essais de « gonflement libre ».

3.1

Procédure expérimentale

Le principe d'un essai de gonflement libre, tel que réalisé dans le cadre de cette recherche, est de compacter un échantillon de sol dans un moule œdométrique, de le soumettre à une contrainte verticale de 3 kPa, d'immerger la cellule œdométrique avec de l'eau dé-ionisée et de suivre les déformations dues à l'adsorption de l'eau par le sol. Le compactage a été réalisé au moyen d'une dame de compactage miniaturisée et la surface des échantillons a été égalisée au moyen d'une règle à araser, de sorte que tous les échantillons avaient une hauteur initiale de 19 mm pour un diamètre de 70 mm.

Dans cette étude, les échantillons ont été compactés à différentes masses volumiques sèches initiales en faisant varier le nombre de coups de compactage. A chaque série d'essais correspond ainsi une même teneur en eau initiale et six masses volumiques sèches initiales, en général. La teneur en eau a été obtenue par un séchage préalable du matériau et par une humidification choisie. Les échantillons n'ont été compactés qu'après un minimum d'une journée de conservation du sol humidifié en sac étanche.

3.2

Influence de l'état initial – cas de l'argile verte de Romainville

L'étude de l'influence de l'état initial sur le gonflement libre a été réalisée sur de l'argile verte de Romainville (Sannoisien), prélevée près de Saint-Leu-la-Forêt dans le Val-d'Oise (Tableau I). La fraction argileuse de ce sol, qui représente 67 % de la masse des particules solides, est constituée en majorité d'illite (75 %) et d'une proportion non négligeable de smectites (10 %).

Les échantillons ont été compactés à six teneurs en eau initiales dont cinq étaient inférieures à la teneur en eau de l'optimum Proctor normal (Fig. 4). En reportant l'indice des vides global des échantillons en fonction de l'indice des vides inter-agrégats initial, c'est-à-dire après compactage et avant humidification (Fig. 4), on constate :

- qu'une relation linéaire apparaît entre les deux paramètres pour les échantillons ayant la même teneur en eau initiale ;
- que les séries correspondant aux trois teneurs en eau les plus élevées semblent se superposer dans ce diagramme alors qu'un décalage apparaît pour les séries dont la teneur en eau initiale était plus faible. De plus, ces séries sont d'autant plus éloignées des séries « humides » que leur teneur en eau initiale est faible.

Ces résultats laissent à penser que le gonflement libre d'un sol est plutôt bien caractérisé par son état final, qui paraît pouvoir être décrit par une relation linéaire entre l'indice des vides inter-agrégats initial et l'indice des vides global après gonflement. Dans cette perspective, le fait que les échantillons les plus secs présentent un décalage suggère cependant que leur état initial serait mal caractérisé par le modèle de microstructure initialement proposé. En particulier, le

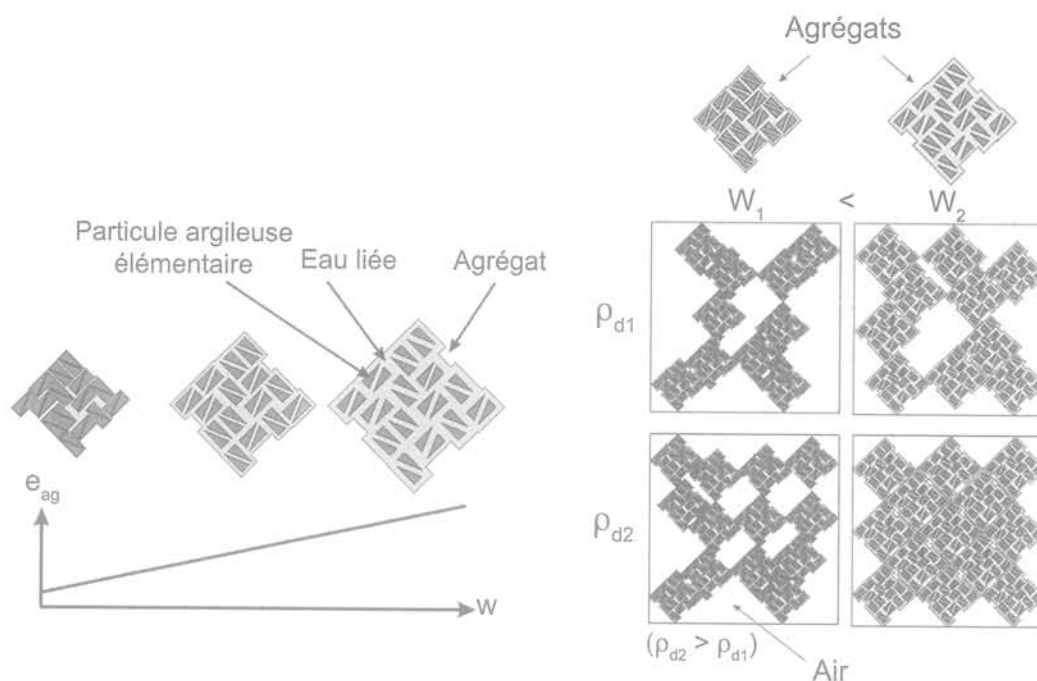


FIG. 3 Illustration schématique de l'influence conjuguée de la teneur en eau et de la masse volumique sèche sur la microstructure.

TABLEAU I Propriétés géotechniques de l'argile verte de Romainville.
Geotechnical characterisation of Romainville green clay.

W_L (%)	I_p	C_{2uni} (%)	ρ_s (Mg/m ³)	W_{OPN} (%)	pd_s OPN (Mg/m ³)	Valeur de bleu (g/100 g)	CEC (cmol + kg)
70,3	39	67	2,76	26	1,55	5,4	18,9

fait de supposer que les agrégats sont saturés à l'état initial pourrait introduire un biais expliquant ce décalage.

Le décalage semble apparaître à partir d'une teneur en eau initiale d'environ 20 %, que l'on appellera « teneur en eau critique » (notée $w_{critique}$). On propose de modifier légèrement l'équation 1 si la teneur en eau initiale est inférieure. Dans ce cas, on supposera que les vides intra-agrégats sont remplis d'eau et d'air mais que leur volume ne varie pas tant que la teneur en eau reste inférieure à la teneur en eau critique. Le volume des vides serait alors égal au volume d'eau que contiendrait le sol à la teneur en eau critique (éq. 4). On en déduit l'indice des vides inter-agrégats grâce à l'équation 2. Les équations 1 et 3 resteraient valables pour les teneurs en eau supérieures à la teneur en eau critique.

$$\text{Si } w < w_{critique} \quad e_{ag} = \frac{w_{critique} \rho_s}{\rho_w} \quad (4)$$

$$\text{Si } w < w_{critique} \quad e_{i-ag} = e - \frac{w_{critique} \rho_s}{\rho_w} = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 - \frac{w_{critique} \rho_s}{\rho_w} \quad (5)$$

La représentation de l'indice des vides global après gonflement libre en fonction de ce nouvel indice des vides inter-agrégats conduit alors à éliminer le décalage entre les séries d'essais (Fig. 5). En calculant l'ordonnée à l'origine et la pente des droites de régression pour les différentes séries d'essais, on constate que l'ordonnée à l'origine des droites à l'état final est relativement constante et indépendante de la teneur en eau initiale,

alors que la pente a tendance à diminuer lorsque la teneur en eau initiale est plus faible (Fig. 6).

3.3

Interprétation microstructurale

La relation linéaire observée entre l'indice des vides global après gonflement libre et l'indice des vides inter-agrégats initial permet de caractériser le comportement à l'humidification grâce à deux paramètres qui sont la pente et l'ordonnée à l'origine des droites de régression. On cherchera ici à préciser la signification de la relation linéaire et de ses paramètres.

Concernant l'ordonnée à l'origine des droites, on peut considérer qu'elle correspondrait à l'indice des vides après gonflement libre d'un échantillon dont l'indice des vides inter-agrégats initial serait nul. Autrement dit, l'ordonnée à l'origine pourrait constituer l'indice des vides après gonflement libre des agrégats. Cette interprétation est assez cohérente avec le fait que ce paramètre ne dépend ni de l'indice des vides initial ni de la teneur en eau initiale. Ce serait donc un paramètre intrinsèque du sol décrivant la capacité totale d'adsorption d'eau de ses agrégats.

L'interprétation de la pente des droites impose un retour sur la description de l'état initial. En effet, l'équation 3 indique qu'il existe, par définition, une relation linéaire entre l'indice des vides inter-agrégats initial et l'indice des vides global initial. Cette relation

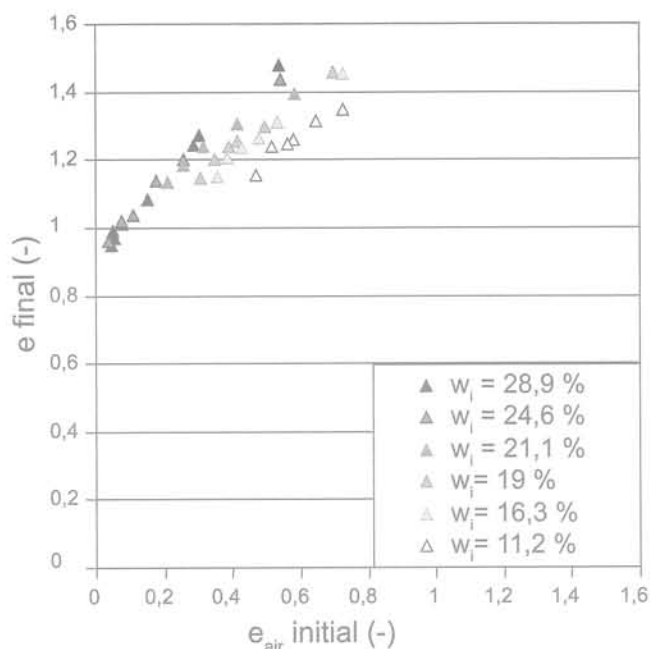


FIG. 4 Influence de l'indice d'air initial sur l'indice des vides après gonflement libre (argile verte de Romanville).

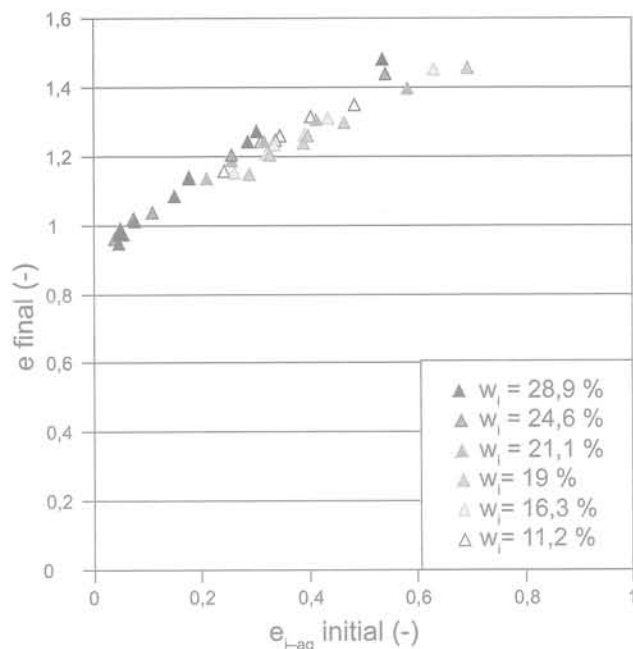


FIG. 5 Influence de l'indice des vides inter-agrégats initial sur l'indice des vides après gonflement libre (argile verte de Romanville).

illustre simplement le fait, qu'à teneur en eau initiale constante, l'indice des vides inter-agrégats augmente avec l'indice des vides global et que la relation linéaire entre ces deux paramètres a une pente de 1 (Fig. 7). Après gonflement libre, l'indice des vides global est toujours la somme de l'indice des vides des agrégats et de l'indice des vides inter-agrégats (eq. 6) mais les résultats expérimentaux indiquent, de plus, qu'il existe une relation linéaire entre l'indice des vides final et l'indice des vides inter-agrégats initial (eq. 7). Si l'on admet que l'ordonnée à l'origine, notée ici β , est égale à l'indice des vides des agrégats final, noté $e_{ag,f}$ comme l'interprétation précédente le suggère, la pente, notée

ici α , correspond alors au rapport entre l'indice des vides inter-agrégats final et l'indice des vides inter-agrégats initial (eq. 8) :

$$e_f = e_{i-ag,f} + e_{ag,f} \quad (6)$$

$$e_f = \alpha \cdot e_{i-ag,i} + \beta \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{e_{i-ag,f}}{e_{i-ag,i}} \quad (8)$$

Ainsi, une pente inférieure à 1 indique que le gonflement libre a généré une diminution du volume des

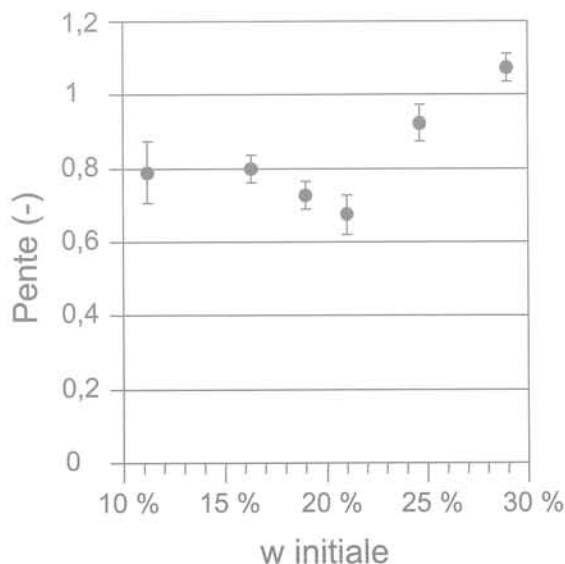
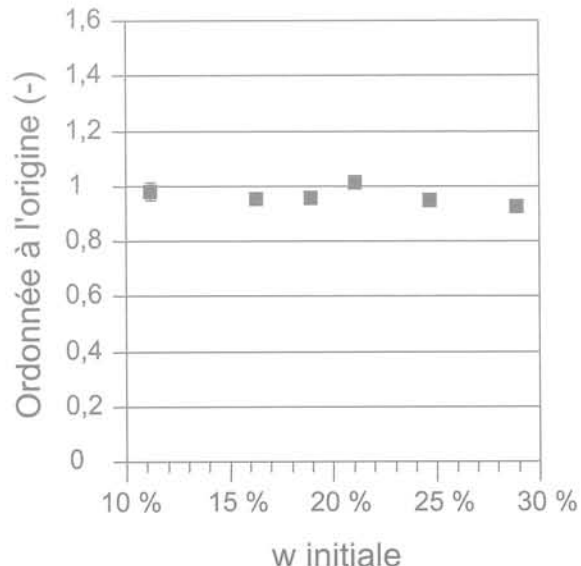


FIG. 6 Influence de la teneur en eau initiale sur la pente et l'ordonnée à l'origine des droites de régression linéaire calculées avec l'indice des vides inter-agrégats initial.



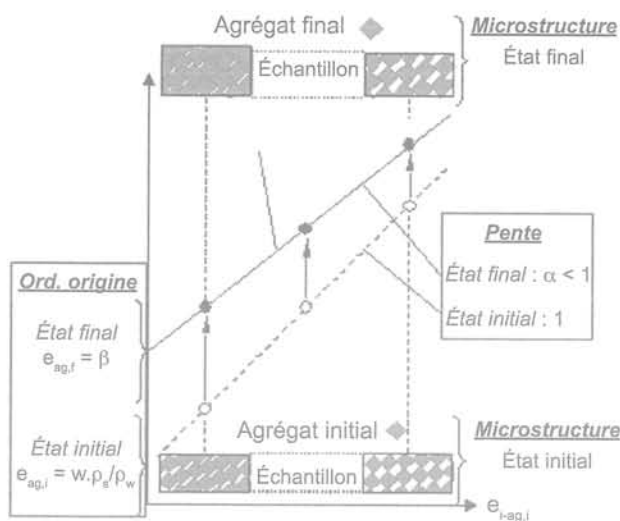


FIG. 7 Représentation schématique de l'interprétation des paramètres de l'état final dans le diagramme $(e_{i-ag,i}, e)$.

vides inter-agrégats, et les résultats présentés suggèrent que cette diminution est d'autant plus forte que la teneur en eau initiale est faible (Fig. 6). Autrement dit, un échantillon de sol perd proportionnellement d'autant plus de vides inter-agrégats lors du gonflement libre qu'il a été compacté à une faible teneur en eau, et ce, quel que soit son indice des vides initial.

Enfin, la relation linéaire indique que le pourcentage de volume des vides inter-agrégats perdu au cours du gonflement est une constante, indépendante du volume initial des vides inter-agrégats. Aucune explication rigoureuse à ce résultat surprenant n'a pu être proposée.

3.4

Influence de la nature des sols

La méthodologie d'étude et d'interprétation décrite précédemment a été appliquée à un panel de dix sols naturels allant du limon peu argileux à l'argile très plastique. Pour chaque sol, des séries d'essais de gonflement libre ont été réalisées à partir de teneurs en eau et de masses volumiques sèches initiales variées. Les résultats ont confirmé qu'il était nécessaire de prendre en compte le concept de teneur en eau critique, que la pente des régressions linéaires sur les essais à même teneur en eau initiale diminuait avec la teneur en eau initiale et que l'ordonnée à l'origine de ces régressions était quasiment insensible à la teneur en eau initiale.

Cette insensibilité de l'ordonnée à l'origine à l'état initial confère à ce paramètre un caractère intrinsèque, qui lui permettrait de refléter le potentiel d'adsorption d'eau des agrégats du sol, indépendamment de leur état hydrique et de leur agencement initial. Pour vérifier cette idée, ce paramètre a été confronté à la limite de liquidité, paramètre d'identification du sol dont on peut aussi attendre *a priori* un caractère intrinsèque. Étant donné que la limite de liquidité est mesurée sur la fraction 0-400 micromètres du sol et que les essais de gonflement libre ont été réalisés sur la fraction 0-2 millimètres, la confrontation a été réalisée avec une limite de liquidité corrigée par le pourcentage de particules

de diamètre inférieur à 400 micromètres, noté $C_{400\mu m}$ (Fig. 8).

Cette confrontation révèle effectivement une corrélation intéressante entre ces deux paramètres pour les sols naturels, ce qui tend à confirmer que l'ordonnée à l'origine des droites de régression pourrait caractériser le potentiel d'adsorption d'eau des agrégats. Ce potentiel d'adsorption à l'échelle des agrégats pourrait en outre être estimé de manière assez pertinente par la limite de liquidité corrigée.

On doit ajouter que la corrélation s'est, en revanche, avérée insuffisante pour une argile de carrière (kaolinite Speswhite), ce qui a pu être expliqué par la forte proportion de cations adsorbés monovalents et en particulier de sodium. *A priori*, la corrélation ne paraît donc pertinente que pour les sols contenant des argiles à tendance plutôt calcique, ce qui représente toutefois la très grande majorité des sols naturels. Ceci devra être étudié sur un panel encore plus large de sols, comprenant notamment des sols à tendance sodique.

3.5

Conclusion pour le gonflement libre

Une approche microstructurale semble donc permettre de distinguer les différents phénomènes à l'origine des déformations par humidification dans les sols fins compactés. En particulier, il apparaît que le gonflement libre mesuré à l'échelle macroscopique résulte d'un gonflement des agrégats, qui semble pouvoir être prévisible grâce à la limite de liquidité corrigée, et d'une réorganisation des agrégats, qui génère une diminution des vides inter-agrégats. Cette interprétation va être confrontée à de nouvelles données expérimentales dans la partie suivante, consacrée à l'humidification sous contrainte.

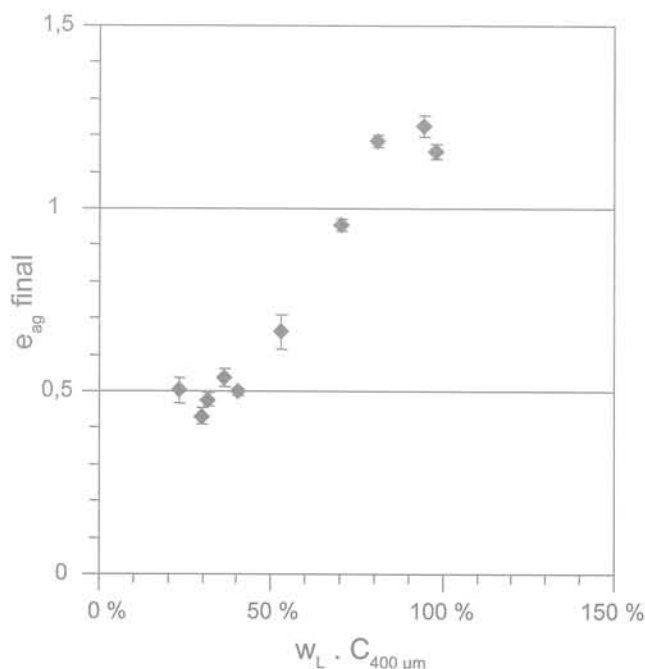


FIG. 8 Influence de la teneur en eau initiale corrigée des vides des agrégats après gonflement libre de dix sols naturels.

Étude de l'humidification sous contrainte

4.1

Procédure expérimentale

La procédure expérimentale est quasiment identique à celle utilisée pour les essais de gonflement libre (cf. § 3.1). Le sol est compacté dans un moule œdométrique au moyen d'une dame de compactage miniaturisée, sa surface est égalisée, puis il est soumis à la contrainte verticale choisie. Ce chargement mécanique à teneur en eau supposée constante se fait relativement rapidement pour les contraintes inférieures à 500 kPa et peut prendre une journée environ pour les plus fortes contraintes. La contrainte maximale utilisée dans cette étude est de 1 400 kPa.

Une fois que les tassements à teneur en eau constante sont stabilisés, la cellule œdométrique est remplie d'eau déionisée et les déformations sont suivies jusqu'à stabilisation.

Comme pour le gonflement libre, ce protocole a été appliqué à des séries d'échantillons compactés à différentes masses volumiques sèches et à même teneur en eau initiale.

L'étude du comportement à l'humidification sous contrainte a été limitée à deux sols (Tableau II) représentant, pour l'argile AvA34, les sols très argileux et, pour le limon LGod, les sols limoneux moyennement argileux. L'argile AvA34 (Albien, Secondaire) a été prélevée sur le chantier de l'autoroute A34 qui relie Charleville-Mézières à Rethel (Ardennes). Sa fraction argileuse est constituée de 60 % de smectites et de 40 % d'illite. Le limon LGod a été prélevé sur le chantier de la déviation de Goderville (Seine-Maritime) et sa fraction argileuse est constituée à 60 % d'illite et à 40 % de kaolinite.

4.2

Comportement d'une argile (AvA34)

L'indice des vides après humidification de l'argile AvA34 a été reporté en fonction de l'indice des vides inter-agrégats initial (Fig. 9). Seule une teneur en eau initiale, égale à 22 %, a été étudiée.

On peut observer (Fig. 9) que, à contrainte verticale constante, l'indice des vides après humidification présente une relation linéaire avec l'indice des vides inter-agrégats initial, comme cela a été observé pour le gonflement libre. On constate que l'ordonnée à l'origine et la pente des droites de régression diminuent lorsque la contrainte verticale augmente, selon une loi semi-

logarithmique (Fig. 10). En reprenant l'interprétation proposée précédemment pour ces deux paramètres (cf. § 3.3), on peut déduire de ces résultats que :

- la pente diminuant lorsque la contrainte verticale augmente, l'humidification sous contrainte génère une diminution du volume des vides inter-agrégats d'autant plus forte que la contrainte verticale est élevée. On trouve même une valeur négative de la pente sous 1 400 kPa, ce qui révèle peut-être les limites du modèle en terme de précision. En effet, on ne peut concevoir que le volume des vides inter-agrégats soit négatif ;
- l'ordonnée à l'origine des droites de régression, qui représenterait l'indice des vides des agrégats après humidification, diminue aussi lorsque la contrainte augmente. Cependant, on peut constater qu'il reste supérieur à l'indice des vides des agrégats initial pour les contraintes inférieures à 800 kPa. Ce n'est donc qu'au-delà de 800 kPa que la contrainte verticale empêche les agrégats de gonfler.

Ainsi, lors de l'humidification sous contrainte de cette argile, les tassements observés lors de l'humidification seraient essentiellement dus à la diminution du volume inter-agrégats, alors que les agrégats eux-mêmes présenteraient un gonflement pour les contraintes inférieures à 800 kPa.

4.3

Comportement d'un limon

Le même protocole appliqué à un limon (limon de Goderville) sous une contrainte verticale de 100 kPa conduit à une toute autre constatation. En effet, on n'observe plus de relation linéaire entre l'indice des vides après humidification et l'indice des vides inter-

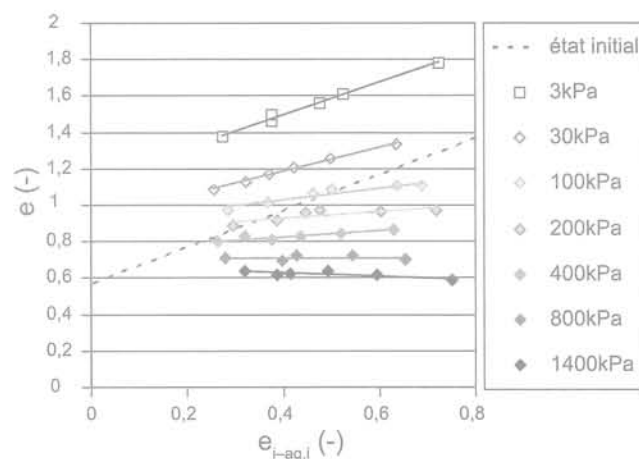


FIG. 9 Influence de l'indice des vides inter-agrégats initial sur l'indice des vides après humidification sous différentes contraintes verticales (argile AvA34).

TABLÉAU II

Propriétés géotechniques de l'argile AvA34 et du limon de Goderville LGod.
Geotechnical characterisation of AvA34 clay and Lgod Goderville silt.

	W_L (%)	I_p	C_u (%)	ρ_s (Mg/m ³)	$w_{p,N}$ (%)	$\rho_{d,N}$ (Mg/m ³)	Valeur de bleu (g/100 g)	CEC (cmol + kg)
AvA34	98	61	66	2,71	28	1,45	10,7	41,2
LGod	41	19	35	2,67	17	1,75	3,5	12,5

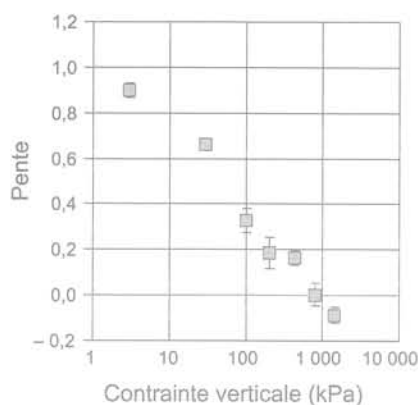
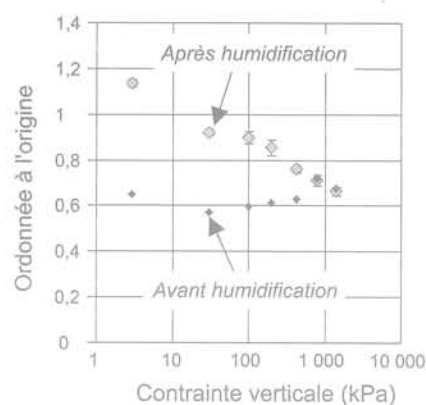


FIG. 10 Influence de la contrainte verticale sur l'ordonnée à l'origine et la pente des droites de régression (AvA34).



agrégats initial (Fig. 11). Par contre, on peut constater que les échantillons les plus compactés ne présentent que de faibles déformations, alors que les échantillons les moins compactés (fort indice des vides inter-agrégats initial) subissent un tassement d'autant plus élevée qu'ils sont peu denses à l'état initial.

Ce résultat doit être accompagné d'une autre observation sur l'état final des échantillons. En effet, on peut observer que, lorsque les échantillons tassent du fait de l'humidification, leur indice des vides final atteint une valeur apparemment constante, qui ne dépend ni de l'indice des vides inter-agrégats initial, ni de la teneur en eau initiale (Fig. 11). On appellera cet indice des vides « indices des vides après effondrement », en référence au phénomène qui semble conduire au tassement par humidification. Ce constat a pu être fait pour les essais sous toutes les contraintes supérieures à 100 kPa et il apparaît que cet indice des vides après effondrement diminue lorsque la contrainte augmente selon une loi semi-logarithmique (Fig. 12). Il a pu être montré que cette courbe n'était autre que la courbe de compression vierge œdométrique du sol saturé.

D'un point de vue pratique, ce résultat montre que le compactage du limon à 95 % de sa masse volumique sèche à l'optimum Proctor normal devrait permettre de se prémunir des déformations par humidification pour une hauteur de remblai de dix mètres, correspondant à

200 kPa (Fig. 12). Ceci paraît relativement cohérent en ordre de grandeur avec les prescriptions de compactage pour les remblais courants (SETRA-LCPC, 1992). Il montre aussi que cette méthode pourrait permettre de proposer des prescriptions de compactage adaptées à la hauteur de l'ouvrage étudié et éventuellement à la nature du matériau.

4.4

Conclusion pour l'humidification sous contrainte

Ainsi, l'indice des vides des échantillons insuffisamment compactés de limon ne dépend que de la nature du sol et de la contrainte verticale. Ceci confirme l'intérêt de la méthode du double-œdomètre (Lawton *et al.*, 1989) pour la prévision des déformations par humidification des sols moyennement argileux. On a vu précédemment que les phénomènes étaient en revanche plus complexes pour les sols très argileux.

Cette différence fondamentale de comportement pourrait provenir de la différence de texture entre ces sols, et en particulier de la différence de pourcentage d'argile. En effet, l'argile AvA34 est un sol contenant près de 70 % de particules argileuses et son comportement est donc quasiment exclusivement gouverné par cette fraction. En revanche, le limon ne contient que 35 % de parti-

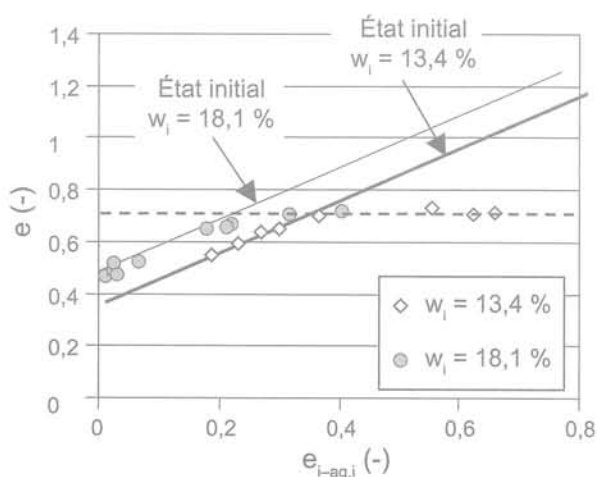


FIG. 11 Influence de l'indice des vides inter-agrégats initial sur l'indice des vides après humidification sous différentes contraintes (limon LGod).

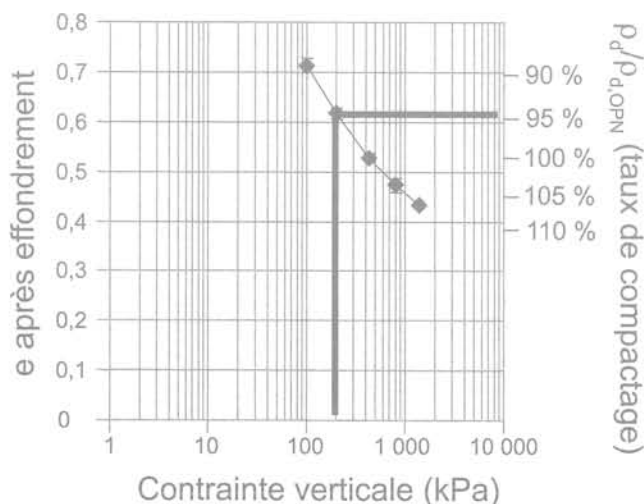


FIG. 12 Influence de la contrainte verticale sur l'indice des vides après effondrement (limon LGod).

cules argileuses, et son comportement est probablement affecté conjointement par les déformations de sa fraction argileuse et par les interactions frottantes entre les particules non argileuses. C'est ce qui expliquerait l'absence de relation linéaire entre l'indice des vides et l'indice des vides inter-agrégats pour le limon.

5

Confrontation aux porosimétries par intrusion de mercure

Pour évaluer la pertinence des hypothèses du modèle de microstructure et des interprétations proposées qui en découlent, des échantillons d'argile AvA34 ont été préparés spécialement pour des analyses par porosimétrie au mercure. Cette technique expérimentale permet de déterminer la distribution des volumes de pores d'un échantillon de matériau en fonction de leur dimension, en forçant l'injection d'un liquide non mouillant (le mercure en l'occurrence) à différentes pressions. En utilisant la loi de Jurin-Laplace (Pellerin, 1980), les pressions peuvent être converties en diamètre de pores. L'interprétation de ces essais doit intégrer la petite dimension des échantillons (quelques grammes) et les effets de leur séchage, même si celui-ci est réalisé par lyophilisation (Delage *et al.*, 1996), ce qui est le cas des échantillons étudiés ici.

Dans un premier temps, les distributions de tailles de pores ont été mesurées sur trois échantillons d'argile AvA34 compactés à une même teneur en eau (environ 22 %) mais à trois indices des vides différents (Fig. 13).

On peut observer la double structure de ce type de sol, avec des micropores de diamètre inférieur à 1 micromètre, et des macropores de diamètre supérieur à 10 micromètres. Les premiers correspondent probablement à ce qui a été appelé ici pores intra-agrégats alors que les seconds correspondraient aux pores inter-agrégats. Comme l'avaient indiqué d'autres auteurs auparavant (Delage *et al.*, 1996 ; Wan *et al.*, 1995), les micropores ne semblent pas affectés par le compactage, qui conduit en revanche à une diminution du diamètre médian et du volume total des macropores.

Par ailleurs, deux échantillons faiblement compactés (indice des vides après compactage de 1,1) ont été soumis, pour le premier, à un gonflement libre et, pour le second, à une humidification sous 200 kPa, puis à un déchargement jusqu'à 3 kPa, de manière à évaluer l'influence de la contrainte verticale appliquée sur la distribution de taille de pores. La confrontation entre les distributions après compactage, après gonflement libre et après humidification sous 200 kPa (Fig. 14) montre :

- que l'humidification a conduit à une augmentation du diamètre médian et du volume total des micropores. Ce phénomène correspondrait au gonflement des agrégats ;

- que l'humidification génère une diminution du volume inter-agrégats d'autant plus importante que la contrainte verticale est élevée, ce qui est cohérent avec l'interprétation des essais d'humidification sous contrainte sur l'argile AvA34 (cf. § 4.2).

6

Conclusion

La démarche adoptée pour cette recherche a consisté à proposer un modèle de microstructure des sols fins compactés non saturés, sur la base des connaissances actuelles et grâce à de nouvelles observations en microscopie électronique environnementale. Ce modèle permet de quantifier deux paramètres microstructuraux grâce à des essais géotechniques conventionnels. Son utilisation pour exploiter et interpréter les essais de gonflement libre et d'humidification sous contrainte permet de décrire l'évolution du volume des vides intra-agrégats et inter-agrégats au cours des phénomènes liés à l'humidification du sol. Ces premiers résultats semblent confirmer que la part réversible du phénomène devrait être associée au comportement des agrégats, dont le volume semble essentiellement gouverné par la teneur en eau, alors que la part irréversible résulte plutôt des évolutions du volume des vides inter-agrégats, ce qu'avaient suggéré Alonso *et al.* (1999).

Cette approche a aussi permis de décrire distinctement l'influence de l'état initial (teneur en eau et masse

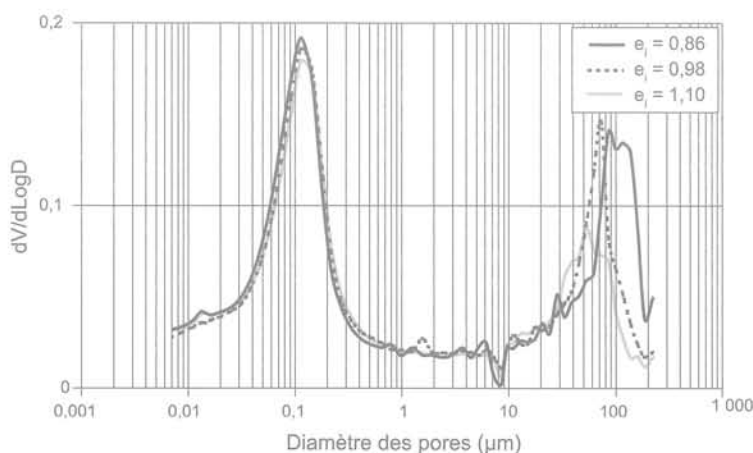


FIG. 13 Influence de l'indice des vides initial sur la distribution des tailles de pores (argile AvA34).

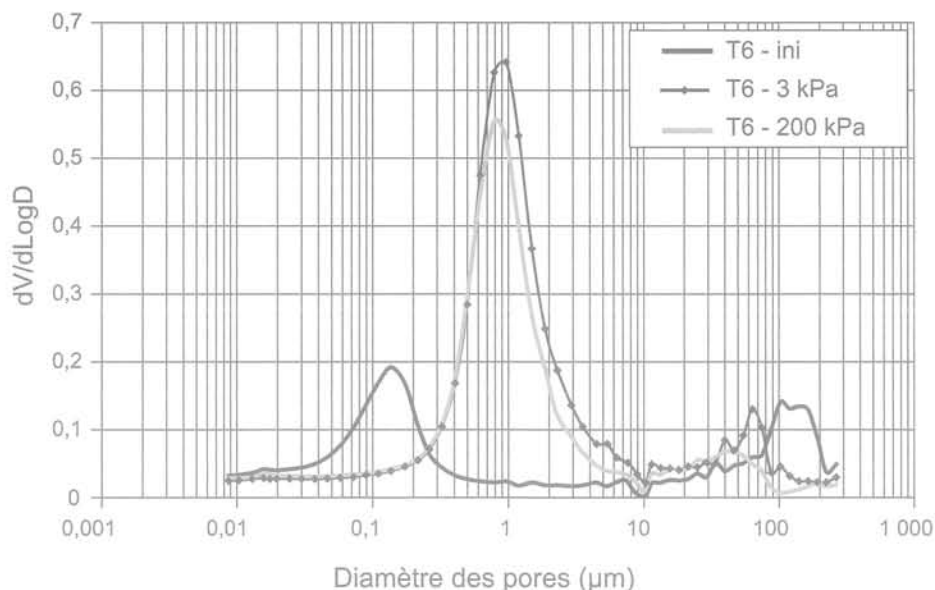


FIG. 14 Influence de la sollicitation sur la distribution des tailles de pores (argile Av34, indice des vides initial ; 1, 1).

volumique sèche), de la nature du sol et la contrainte verticale sur les déformations. Il en résulte une corrélation intéressante avec la limite de liquidité pour le gonflement libre et une description des phénomènes à l'échelle microscopique en général. La confrontation avec les analyses par porosimétrie par intrusion de mercure semble donner des arguments favorables aux interprétations proposées, même si des expérimentations complémentaires sur d'autres sols et à partir d'autres états initiaux mériteraient d'être faites.

En outre, la méthodologie développée dans le cadre de cette recherche devrait pouvoir être appliquée au phénomène du retrait, ce qui permettrait de décrire de

manière plus complète les déformations par variations d'état hydrique. Par suite, les risques de retrait-gonflement devraient pouvoir être mieux appréciés grâce à des essais d'identification simples mais dont la pertinence vis-à-vis du phénomène aura pu être démontrée.

Enfin, les résultats de cette recherche permettent de proposer de nouvelles méthodes de conception des remblais routiers et ferroviaires, en particulier dans les contextes sensibles (remblais de grande hauteur, remblais en zone inondable...) pour lesquelles aucune méthode rigoureusement justifiée n'est actuellement disponible.

- Alonso E.E., Vaunat J., Gens A. – Modeling the mechanical behaviour of expansive clays. *Engineering Geology*, vol. 54, n° 2, 1999, p. 173-183.
- Benett R.H., Hulbert M.H. – *Clay microstructure*, International human resources development corporation, Boston, 1986, 161 p.
- Bird N., Perrier E. – The pore-solid fractal model of soil density scaling. *European Journal of Soil Science*, 54 (3), 2003, p. 467-476.
- Boivin P., Garnier P. Tessier D. – Relationship between clay content, clay type and shrinkage properties of soil samples, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68, 2004, p. 1145-1153.
- Braudeau E. – Équation généralisée des courbes de retrait d'échantillons de sols structurés. *C.R. Acad. Sci. Ser. 2*, 307, 1988, p. 1731-1734.
- Bruand A., Prost R. – Effect of water content on the fabric of a soil material: An experimental approach. *European Journal of Soil Science*, 38 (3), 1997, p. 461-472.
- Delage P., Audiguier M., Cui Y.J., Howat M.D. – Microstructure of a compacted silt. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 33, n° 1, 1996, p. 150-158.
- Derriche Z., Kebaïli M. – Prévion du gonflement des argiles d'In-Amémas. *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, n° 218, 1998, p. 15-23.
- Diamond S. – Pore size distributions in clays. *Clays and clay minerals*, vol. 18, 1969, p. 7-23.
- Gens A., Alonso E.E., Surlol J. – Effect of structure on the volumetric behaviour of a compacted soil. *Proc. of the 1st international conference on unsaturated soils, UNSAT'95*, Paris, France, 6-8 sept. 1995, p. 83-88.
- Gimenez D., Allmaras R.R., Nater E.A., Huggins D.R. – Fractal dimensions for volume and surface of interaggregate pores : Scale effects. *Geoderma*, vol. 77, n° 1, 1997, p. 19-38.
- Holtz W.G., Gibbs H.J. – Engineering properties of expansive clays. *Trans. ASCE*, vol. 121, 1956, p. 641-663.
- Lambe T.W. – The structure of compacted clay. *J. Geotech. Engng. and Found. Div.*, ASCE, vol. 84, n° 2, paper 1654, 1958, p. 1654-1 35.
- Lawton E.C., Fragaszy R.J., Hardcastle J.H. – Collapse of compacted clayey sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 115, n° 9, 1989, p. 1252-1267.
- Pellerin F.M. – La porosimétrie au mercure appliquée à l'étude géotechnique des sols et des roches. *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, n° 106, 1980, p. 105-116.
- Seed H.B., Woodward R.J., Lundgren R. – Prediction of swelling potential for compacted clays. *Journal of the soil mechanics and foundation division, ASCE*, SM3, 1962, p. 53-87.
- Serratrice J.F., Soyez B. – Les essais de gonflement. *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, n° 204, 1996, p. 65-85.
- SETRA-LCPC – *Réalisation des remblais et des couches de forme (GTR)*. Guide technique SETRA-LCPC, 2 fascicules, 1992, 98 et 102 p.
- Tessier D. – *Étude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation*. INRA, thèse de doctorat ès sciences de l'université de Paris VII, 1984, 362 p.
- Wan A.W., Gray M.N., Graham J. – On the relations of suction, moisture content and soils structure in compacted clays. *Proc. of the 1st international conference on unsaturated soils, UNSAT'95*, Paris, France, 6-8 sept. 1995, p. 215-222.