

T.D. TRAN
M. AUDIGUIER
R. COJEAN

Centre de Géosciences
MINES ParisTech
35, rue Saint-Honoré
77305 Fontainebleau
(France)

Analyse des rôles de la microstructure et de la composition minéralogique de trois sols argileux du bassin de Paris sur leur sensibilité au retrait-gonflement

Résumé

En France, depuis 1976, des périodes de sécheresse prolongée, associées à des déficits hydriques importants, ont mis en évidence une grande vulnérabilité des maisons individuelles fondées sur des sols argileux. Cet article présente les caractéristiques minéralogiques, microstructurales et géotechniques de trois formations argileuses du bassin de Paris, sensibles aux processus de retrait-gonflement. Les Argiles Plastiques (AP) du Sparnacien, non carbonatées, sont comparées aux Argiles Vertes de Romainville (AVR) du Rupélien et aux Marnes Bleues d'Argenteuil (MBA) du Ludien. Les contributions de la composition minéralogique et de la microstructure sur leur sensibilité au retrait-gonflement sont étudiées, en particulier en comparant des matériaux intacts et des matériaux remaniés au laboratoire.

Mots-clés : argile, retrait, gonflement, Argiles Plastiques du Sparnacien, Argiles Vertes de Romainville, Marnes Bleues d'Argenteuil.

Analysis of the roles of microstructure and mineralogical composition of three clayey soils in the Paris basin on their sensitivity to the shrinkage-swelling

Abstract

In France since 1976, periods of prolonged droughts, associated to significant water deficits, showed a high vulnerability of houses founded on clayey soils. This paper presents the mineralogical, microstructural and geotechnical characteristics of three clayey formations of the Paris basin, sensitive to shrink/swell processes. The Plastic Clays (AP) of Sparnacian age are not carbonated. They are compared to the Green Clays of Romainville (AVR) of Rupelian age and the Blue Marls of Argenteuil (MBA) of Ludian age. The respective contributions of the mineralogical composition and microstructure on their sensitivity to shrinkage and swelling are highlighted, especially when comparing intact materials and remoulded materials in the laboratory.

Key words: clay, shrinkage, swelling, Plastic Clays of Sparnacian, Green Clays of Romainville, Blue Marls of Argenteuil.

Introduction⁽¹⁾

Récemment, de nombreux chercheurs qui étudient des argiles à l'état naturel ainsi qu'à l'état compacté ont réalisé des études microstructurales cherchant à préciser par les techniques de microscopie électronique et porosimétrie au mercure l'arrangement des particules, des agrégats et la distribution de rayon des pores (Delage et Lefebvre, 1984 ; Delage et al., 1996). Ces études sur la microstructure du sol peuvent expliquer en partie leur comportement macroscopique et leurs propriétés physiques, comme cela a été montré dans la synthèse de Romero et Simms (2008).

Barden (1973), Collins *et al.* (1973), Tovey (1973) ont été les pionniers qui ont travaillé sur la microstructure des argiles gonflantes. Depuis lors, beaucoup d'études sur la microstructure des sols ont été réalisées (Romero et Simms, 2008). Dans les études microstructurales des sols non saturés, plus d'attention a été portée aux sols compactés qu'aux sols intacts. Il y a eu des tentatives de lier la microstructure des sols compactés avec leurs propriétés géotechniques. Par exemple, les caractéristiques de microstructure des sols compactés ont été utilisées pour expliquer les variations de volume dues à la compression œdométrique, ou dues à des compactages dynamiques (Ahmed *et al.*, 1974) ou pour prévoir les propriétés de rétention d'eau (Simms et Yanful, 2002 ; Cui *et al.*, 2002 ; Cuisinier et Laloui, 2004). En outre, les relations entre les caractéristiques de microstructure et les propriétés principales d'un sol compacté telles que la résistance, la compressibilité et la perméabilité ont également été étudiées dans les travaux de Tessier *et al.* (1992) et Delage *et al.* (1996). Récemment, les argiles gonflantes naturelles ont été étudiées à nouveau en raison de la prise en compte croissante du risque de sécheresse dans le dimensionnement des fondations sur sols argileux (Audiguier *et al.*, 2008).

Cet article a pour but d'étudier la microstructure de sols argileux en utilisant les techniques de porosimétrie au mercure et de microscopie électronique à balayage

(MEB) avec l'objectif de relier des caractéristiques de microstructure à des paramètres géotechniques. Les Argiles Plastiques (AP) du Sparnacien sont étudiées et comparées aux Argiles Vertes de Romainville (AVR) du Rupélien et aux Marnes Bleues d'Argenteuil (MBA) du Ludien, formations géologiques étudiées antérieurement dans les travaux de Audiguier *et al.*, 2008. On cherche à mettre en évidence les contributions respectives de la composition minéralogique et de la microstructure sur la sensibilité au retrait-gonflement de ces sols argileux.

Matériaux étudiés

Les Argiles Plastiques (AP) du Sparnacien ont été prélevées à Angervilliers (Essonne, Île-de-France). Trois niveaux sont analysés : un niveau supérieur (APS), un niveau moyen (APM) et un niveau inférieur (API). Ils sont différenciés par leur teneur en argiles et les proportions des différents minéraux argileux. Les résultats des caractérisations minéralogiques et géotechniques de ces sols sont présentés (Tableau I).

Caractérisation minéralogique

Les compositions minéralogiques des trois niveaux d'AP sont très proches (Tableau I).

L'analyse des résultats concernant les trois niveaux d'Argiles Plastiques (AP) conduit aux conclusions suivantes :

- la proportion de quartz diminue avec la profondeur. Elle est de 37 % pour APS, de 34 % pour APM et de 19 % pour API ;
- les trois niveaux sont non carbonatés ;
- les minéraux argileux sont représentés par de la kaolinite, de l'illite et des interstratifiés illite-smectite en

TABEAU I Analyse minéralogique des sols étudiés.
Mineralogical analysis of soils studied.

Composition minéralogique déterminée sur matériau total (lames de poudres ou mesures spécifiques)	APS	APM	API	AVR*	MBA-1*	MBA-2*
Carbonates	0 %	0 %	0 %	10 %	27 %	58 %
Calcite	–	–	–	–	+++	++++
Dolomite	–	–	–	++	–	–
Quartz	37 %	34 %	19 %	30-40 %	23 %	< 15 %
Oxydes de Ti	+	+	+	–	–	–
Oxydes de fer	–	+	–	–	–	–
Feldspaths	–	–	–	< 5 %	–	–
Minéraux argileux	62 %	61 %	79 %	30-50 %	40-60 %	20-40 %
Minéraux argileux déterminés sur < 2 µm (lames d'argiles)						
Illite	+	+	++	+++	+++	++
Kaolinite	+++	+++	++	++	+	–
Interstratifiés Illite-Smectite ou Smectites	+	+	++	++	+++	++
Argiles fibreuses	–	–	–	–	–	++

* Audiguier *et al.*, 2008.

++++ : très abondant, +++ : abondant, ++ : moyennement abondant, + : peu abondant, – : non décelé ou traces.

⁽¹⁾ Une version de cet article, moins complète, a été présentée aux JNGG 2012.

proportions égales dans API, alors que la kaolinite est majoritaire dans APS et APM.

La comparaison avec les Argiles Vertes de Romainville (AVR) et les Marnes Bleues d'Argenteuil (MBA) met en évidence des différences majeures avec ces formations :

- absence de carbonates dans AP alors qu'ils sont abondants à très abondants dans AVR et MBA ;
- abondance de kaolinite dans APS et APM par rapport aux autres formations ;
- proportion d'interstratifiés illite-smectite moins importante dans APS et APM.

2.2

Caractérisation géotechnique

Les remarques suivantes peuvent être tirées de l'analyse du tableau II :

- pour les Argiles Plastiques (AP), l'indice de plasticité, la teneur en fines et la valeur de bleu augmentent avec la profondeur ;
- dans APS, la présence de kaolinite représentée par des particules pouvant atteindre 5 à 10 µm explique que le pourcentage de minéraux argileux (62 %) soit plus grand que le pourcentage des particules de diamètre inférieur à 2 µm (56 %).

La comparaison avec les Argiles Vertes de Romainville (AVR) et les Marnes Bleues d'Argenteuil (MBA) met en évidence une densité plus forte (Tableau III) pour les Argiles Plastiques (AP) et des valeurs de bleu significativement plus faibles.

3

Techniques expérimentales pour l'étude de l'aptitude au gonflement

L'aptitude au gonflement des argiles a été étudiée à partir d'essais de gonflement libre à l'œdomètre suivant la norme ASTM D 4546-85, méthode A (1986), sur des échantillons naturels et des échantillons remaniés au laboratoire. Le remaniement est analogue à celui réalisé pour les limites de liquidité, suivi d'un séchage jusqu'à la teneur en eau correspondant à celle du matériau intact.

La microstructure des matériaux dans l'état intact ou remanié, à teneur en eau naturelle ou après gonflement, a été analysée à partir d'échantillons lyophilisés, qualitativement par observation au microscope électronique à balayage (MEB) et quantitativement par porosimétrie au mercure (Delage et Lefebvre, 1984 ; Delage *et al.*, 1996 ; Audiguier *et al.*, 2007).

4

Résultats et discussions

4.1

Analyse des potentiels de gonflement

Les résultats de l'analyse des potentiels de gonflement (Tableau III) montrent que les taux de gonflement sont différents entre les niveaux d'AP mais aussi

TABLEAU II Caractéristiques physiques et géotechniques des sols étudiés.
Physical and geotechnical parameters of soils studied.

	APS	APM	API	AVR*	MBA-1*	MBA-2*
Teneur en eau naturelle moyenne (%)	20	23	20	30	33	30
Porosité (%)	33	40	37	42	45	40
Limite de liquidité (%)	46	63	69	75	89	63
Indice de plasticité (%)	21	36	37	35	47	35
Indice de retrait (%)	30	47	56	59	68	47
Fraction fine < 2 µm (%)	56	62	87	78	78	82
Valeur de bleu (g/100 g)	2,6	4,4	5,9	9,3	9,7	5,4

* Audiguier *et al.*, 2008.

TABLEAU III Gonflement libre des sols étudiés.
Free swell of soils studied.

Formation	APS	APM	API	AVR*	MBA-1*	MBA-2*
Échantillons intacts						
Taux de gonflement libre (%)	4	8,5	10,5	16	4	1,5
Teneur en eau avant le gonflement (%)	20	20	21	25	32	23
Poids volumique sec avant de gonflement (kN/m ³)	17	17	17	15	14	16
Échantillons remaniés						
Taux de gonflement libre (%)	13	21	19	32	26	15
Teneur en eau avant le gonflement (%)	20	21	21	27	34	24
Poids volumique sec avant de gonflement (kN/m ³)	16	16	16	15	15	16

* Audiguier *et al.*, 2008.

entre l'état intact et l'état remanié d'un même niveau, à teneurs en eau de départ voisines. Ce phénomène présente une analogie avec ce qui a été observé pour les formations AVR et MBA.

Pour une teneur en eau équivalente, le taux de gonflement d'APS passe de 4 % à 13 % entre l'état intact et l'état remanié, celui d'APM passe de 8,5 % à 21 % et celui d'API passe de 10,5 % à 19 %. APM et API ont des taux de gonflement voisins et supérieurs à celui d'APS. Plus que la forte proportion en quartz dans APS, c'est certainement la disposition de ces quartz observée au MEB (Fig. 2) et la microstructure correspondante qui sont à l'origine d'une plus faible sensibilité au gonflement concernant APS à l'état intact, comparée à celle d'APM et API.

Par comparaison, AVR est également plus sensible au gonflement à l'état remanié qu'à l'état intact et son taux de gonflement est supérieur à celui de MBA. Les échantillons de MBA sont d'autant moins sensibles au gonflement à l'état intact que la teneur en carbonate est élevée (Audiguier et al., 2008). Comme les carbonates dans MBA, la proportion de quartz et leur arrangement dans les trois niveaux d'AP jouent un rôle dans l'aptitude au retrait-gonflement, en rigidifiant quelque peu l'édifice microstructural.

Bien que les échantillons des trois niveaux d'AP intacts soient plus denses et leurs teneurs en eau plus faibles que celles des échantillons d'AVR et de MBA, leurs potentiels de gonflement sont plus faibles. La proportion plus faible d'interstratifiés illite-smectite (minéraux argileux gonflants) et la forte proportion de kaolinite (minéral argileux non gonflant) expliquent en partie un pouvoir de gonflement plus faible pour les trois niveaux d'AP que pour ceux d'AVR et MBA.

4.2

Analyse et observation des microstructures

Les résultats des essais porosimétriques des échantillons d'APS, APM et API sont regroupés dans le tableau IV.

Les échantillons séchés à l'étuve (APS, APM et API) présentent une distribution unimodale des rayons d'accès de pores centrée sur 25 nm pour APS, 20 nm pour APM et 7 nm pour API, prolongée vers les faibles

rayons par une queue de distribution dénotant ainsi une porosité inter-particulaire non accessible par la porosimétrie au mercure. Cette courbe est caractéristique d'une structure matricielle argileuse compacte (Audiguier et Delage, 1987).

Les trois niveaux d'AP, se différenciant par leurs compositions minéralogiques et leurs microstructures, ne présentent pas le même comportement vis-à-vis du gonflement.

Les remarques suivantes peuvent être tirées de l'analyse du tableau IV :

- à l'état intact (état initial), APS (Fig. 1a) et API (Fig. 1c) présentent une distribution bimodale avec deux familles de pores tandis que APM (Fig. 1b) présente une distribution unimodale ;

- à l'état remanié (état initial), les trois niveaux présentent une distribution de pores similaire ou quasi similaire à celle des échantillons intacts, mais avec une augmentation du volume poreux total résultant du remaniement ;

- après gonflement, le volume poreux de l'échantillon APS intact ne varie quasiment pas. Mais le rayon moyen de la famille de macropores passe de 90 nm à 150 nm. Par contre, après gonflement, l'échantillon APS remanié augmente nettement de volume (20 %) et on observe que le rayon moyen de la famille de macropores passe de 90 nm à 400 nm (Fig. 1a). Pour l'échantillon APM intact ou remanié, le gonflement fait apparaître une nouvelle famille de pores (macropores de rayons 150 nm pour APM intact et 300 nm pour APM remanié) (Fig. 1b). Dans le cas d'API, le gonflement conduit à une forte augmentation des rayons de la famille de macropores préexistante (passant de 400 nm à 1 500 nm pour API intact et de 500 nm à 1 700 nm pour API remanié) (Fig. 1c) ;

- après gonflement, les trois niveaux, intacts ou remaniés, présentent une distribution bimodale avec deux familles bien individualisées. Ces courbes bimodales correspondent à une structure en agrégats.

Les observations au microscope électronique à balayage des états intact et remanié, avant et après gonflement, illustrent les résultats obtenus en porosimétrie au mercure.

Les photos prises sur APS, à l'état intact, montrent une microstructure relativement aérée formée par des petits grains (environ 1 μ m) de quartz jointifs, assem-

TABLEAU IV

Caractéristiques des courbes porosimétriques des sols étudiés.
Parameters of porosimetric curve of soils studied.

Formation	APS	APM	API
Échantillon intact, état initial			
Volume poreux total (mm ³ /g)	180	168	158
Rayons moyens des familles (nm)	25/90	30	7/400
après gonflement			
Volume poreux total (mm ³ /g)	182	196	232
Rayons moyens des familles (nm)	25/150	30/150	10/1 500
Échantillon remanié, état initial			
Volume poreux total (mm ³ /g)	223	191	225
Rayons moyens des familles (nm)	25/90	30	10/500
après gonflement			
Volume poreux total (mm ³ /g)	268	312	264
Rayons moyens des familles (nm)	25/400	30/300	10/1 700

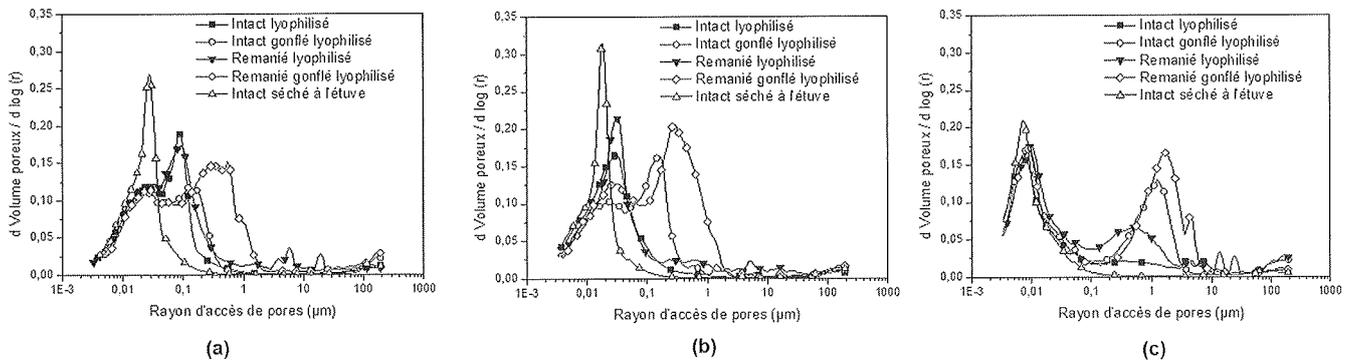


FIG. 1 Courbes porosimétriques dérivées (a : APS ; b : APM ; c : API).
Derived porosimetric curves (a : APS ; b : APM ; c : API).

blés en amas de 10 µm à 20 µm qui contribuent à rigidifier quelque peu le squelette du matériau. Ces amas sont reliés entre eux par des agrégats argileux (Fig. 2a). Cette structure ressemble à la structure de MBA où la calcite est remplacée par le quartz (Audiguier et al., 2008). Cette microstructure subit peu de changement au cours du gonflement (Fig. 2b).

L'échantillon remanié, avant gonflement, présente une microstructure où des amas de grains coexistent avec des grains isolés. Cette microstructure est peu différente de celle de l'échantillon intact. Au cours du gonflement un réseau poreux bidimensionnel (aspect de fissure) apparaît, responsable de la famille de macropores mesurée en porosimétrie au mercure.

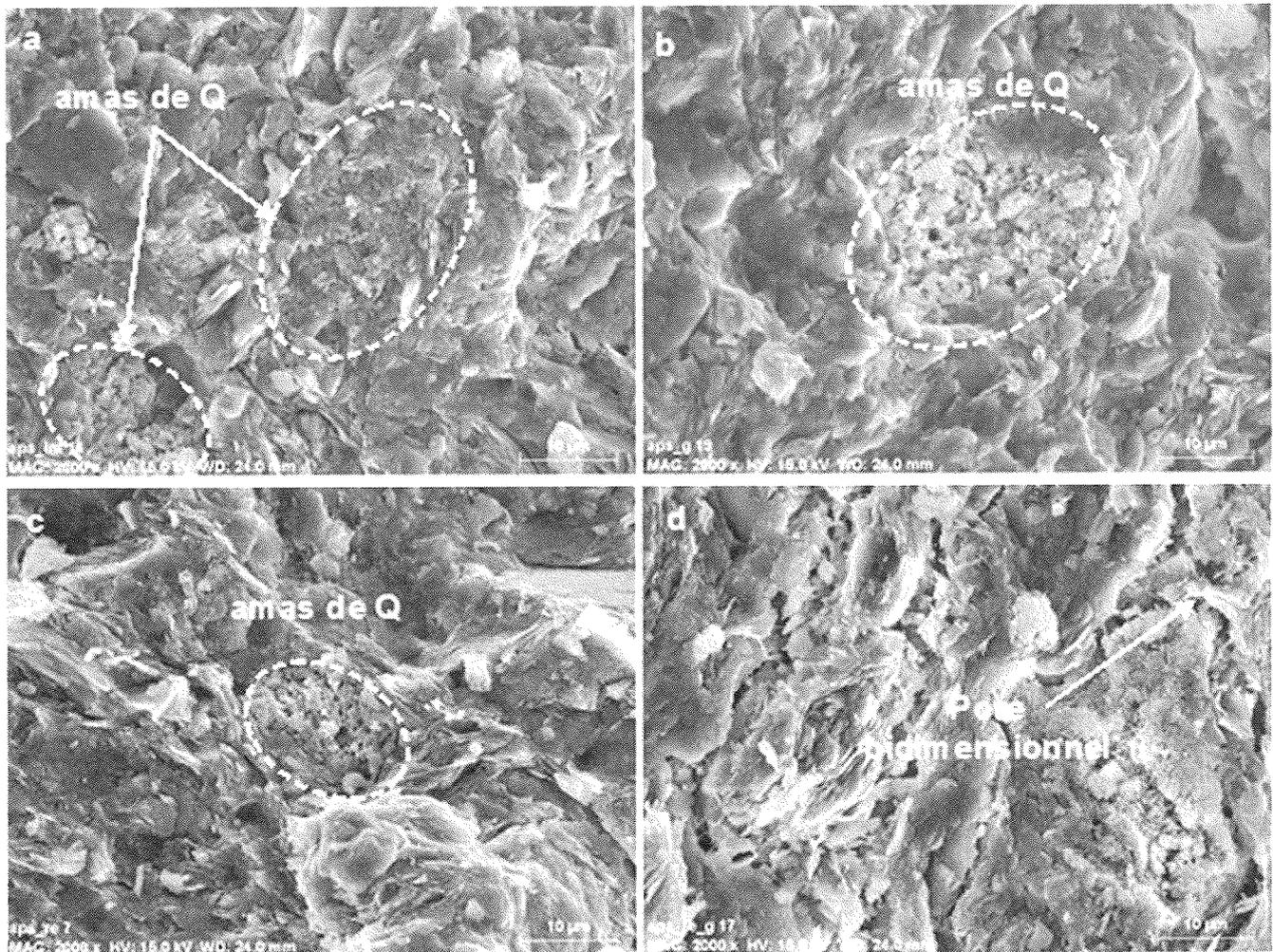


FIG. 2 APS. Échantillon intact : a) état initial ; b) après gonflement. Échantillon remanié : c) état initial, d) après gonflement.
APS. Natural sample : a) initial state ; b) after swelling. Remoulded sample : c) initial state ; d) after swelling.

Pour APM, à l'état intact et à l'état remanié, avant gonflement, on observe une microstructure relativement compacte où les agrégats ne sont pas bien individualisés. Elle est formée d'une matrice argileuse dans laquelle sont noyés des grains de quartz dispersés (Fig. 3a, c). Après gonflement, une porosité bidimensionnelle apparaît montrant un processus de division en agrégats. L'échantillon remanié présente alors un espace poral plus important que celui de l'échantillon intact après gonflement (Fig. 3d).

Pour APS, à l'état intact, avant gonflement, on observe une microstructure en agrégats séparés par des pores bidimensionnels de taille inférieure à 1 µm. La matrice argileuse, dans laquelle sont noyés des grains de quartz épars, est très compacte (Fig. 4a). A l'état remanié, l'observation au MEB ne montre pas de différences significatives (Fig. 4c). Après gonflement, les échantillons intacts et remaniés présentent une macroporosité de taille plus importante, avec des pores bidimensionnels de plusieurs microns d'extension (Fig. 4b et 4d).

5

Conclusion

Les analyses et les observations réalisées sur les échantillons d'APS, APM et API intacts ou remaniés conduisent aux remarques suivantes :

- l'analyse minéralogique a mis en évidence la présence de quartz en abondance dans les échantillons APS, diminuant en passant d'APS à APM puis API. Le pourcentage d'interstratifiés illite-smectite est plus important dans API que dans APM et APS ;

- le gonflement libre des échantillons d'APS, APM et API varie suivant la teneur en eau de départ et suivant l'état initial : intact ou remanié. Alors qu'API présente un taux de gonflement de 10,5 % pour l'état intact et de 19 % pour l'état remanié, APM de 8,5 % pour l'état intact et de 21 % pour l'état remanié, APS ne varie pratiquement pas de volume pour l'état intact (4 %) et il augmente de 13 % pour l'état remanié ;

- les analyses par porosimétrie au mercure et les observations faites au MEB confirment les remarques précédentes.

Cette étude et la comparaison avec l'étude des échantillons d'AVR et MBA ont permis de confirmer le rôle de deux familles de facteurs dans les processus de retrait-gonflement des sols argileux :

- la composition minéralogique : les smectites et interstratifiés illite-smectite favorisent le gonflement, ce qui n'est pas le cas des kaolinites. Le gonflement est contrarié par la présence de carbonates mais aussi de quartz, la présence de ces minéraux limitant l'influence des minéraux argileux. A l'état intact, le gonflement libre dépend du taux de carbonates ou de quartz ;

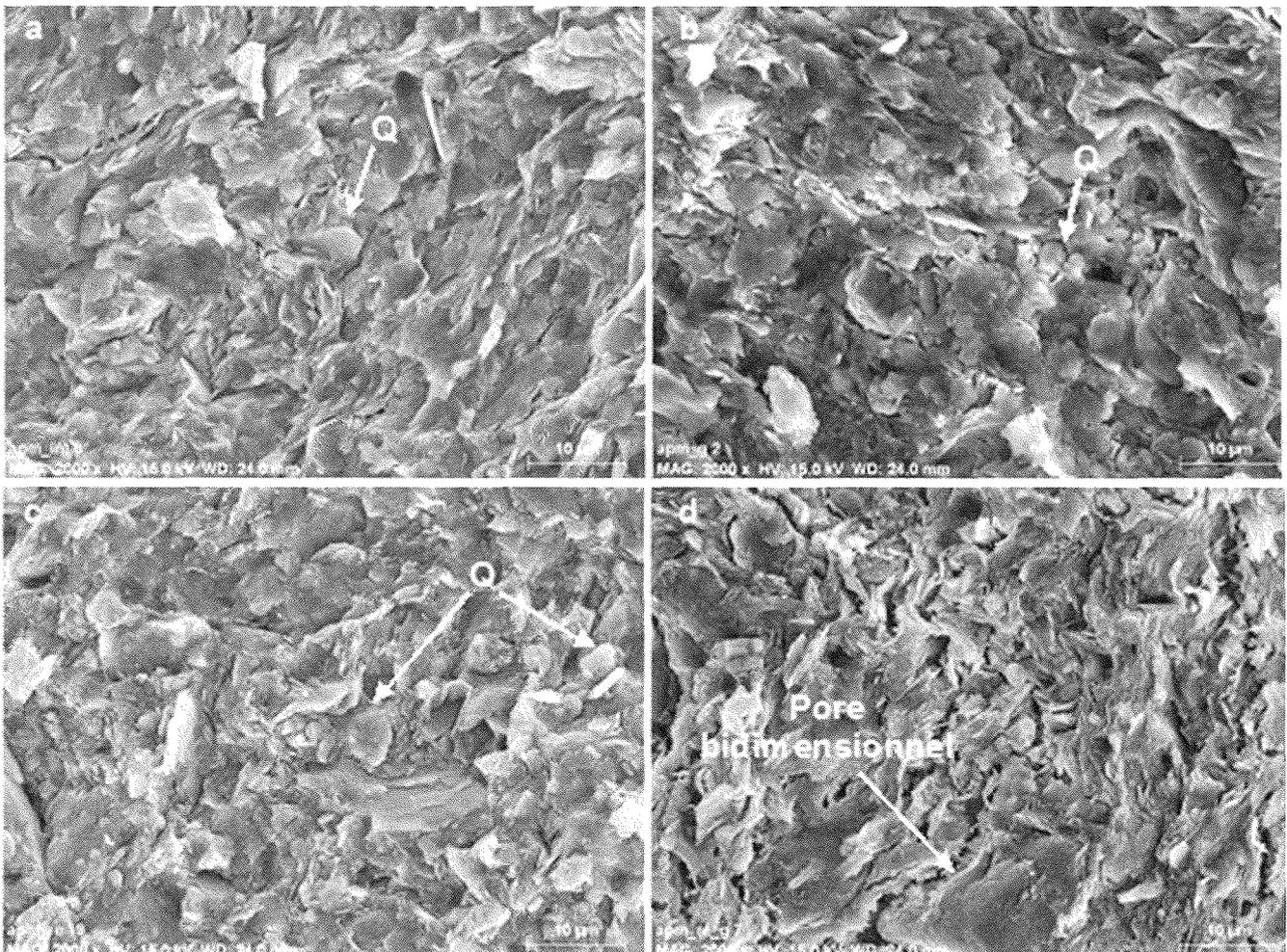


FIG. 3 APM. Échantillon intact : a) état initial ; b) après gonflement. Échantillon remanié : c) état initial ; d) après gonflement.

APM. Natural sample : a) initial stat ; b) after swelling. Remoulded sample : c) initial stat ; d) after swelling.

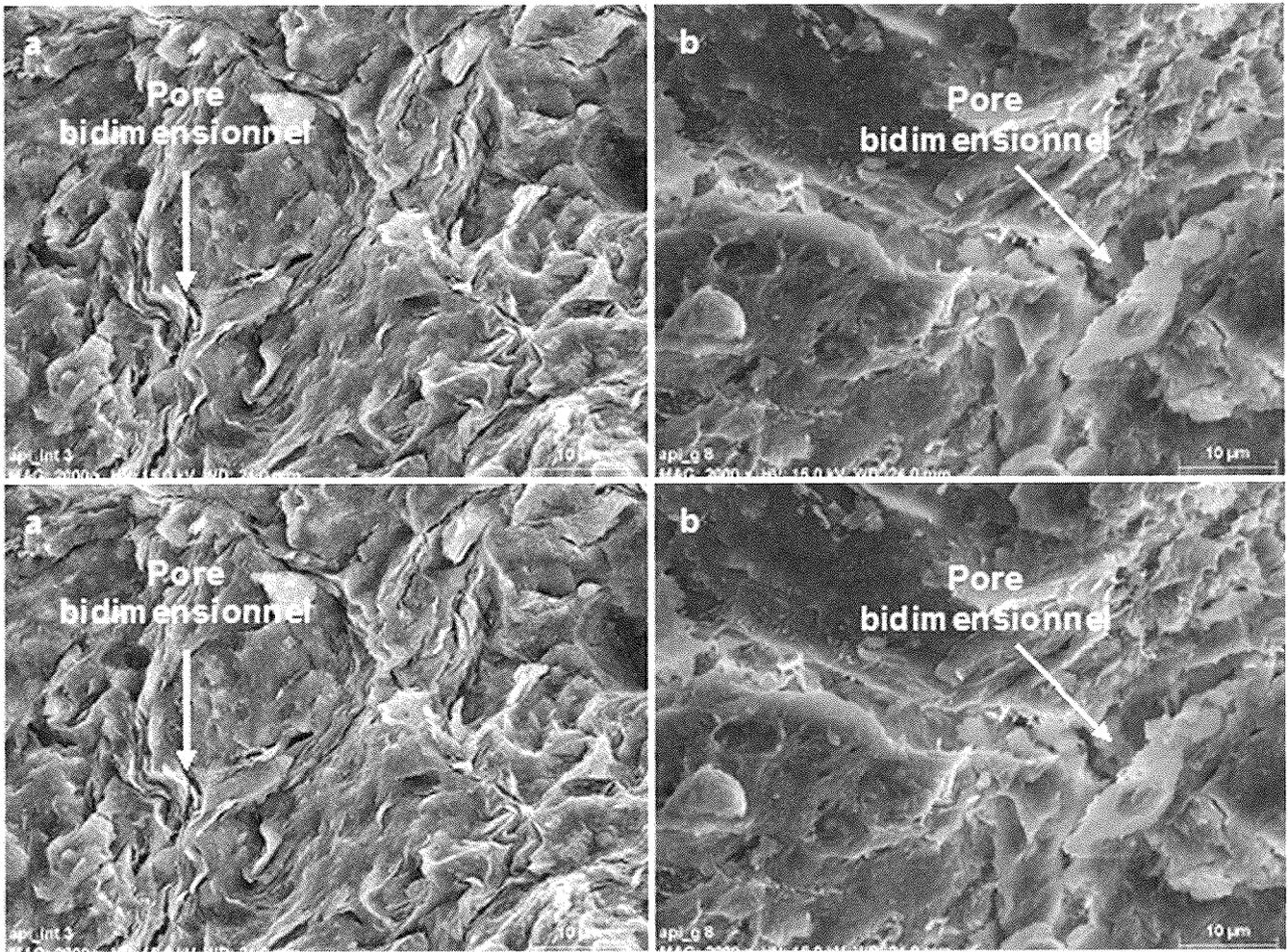


FIG. 4

API. Échantillon intact : a) état initial ; b) après gonflement. Échantillon remanié : c) état initial ; d) après gonflement.

API. Natural sample : a) initial state ; b) after swelling. Remoulded sample : c) initial state ; d) after swelling.

– la microstructure : pour un pourcentage en carbonates ou en quartz donné, la sensibilité au gonflement est plus importante pour le sol remanié au laboratoire que pour le sol intact. En effet, le remaniement détruit, au moins partiellement, des éléments de microstructures qui contrariaient le gonflement : ponts carbonatés entre agrégats argileux dans les sols argileux carbonatés, amas de grains de quartz insensibles au gonflement dans les sols argileux riches en quartz.

REMERCIEMENTS

Les auteurs présentent leurs remerciements au ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie pour le financement de la présente étude, qui s'inscrit dans le cadre du projet ARGIC 2 « Sécheresse et constructions ».

Bibliographie

- Ahmed S., Lovell C.W., Diamonds S. – Pore sizes and strength of compacted clay. *ASCE J. Geotechnical Eng.*, 100, 1974, p. 407-425.
- ASTM – Standard test methods for one dimensional swell or settlement potential of cohesive soils. *ASTM D 4546-85*, 1986.
- Audiguier M., Delage P. – Étude microscopique et porosimétrique de sols fins naturels dans une perspective géotechnique. *Actes de la VI^e Réunion internationale de Micromorphologie des sols*, Paris, juillet 1985, ss la dir. N. Fedoroff, L.M. Bresson et M.A. Courty, AFES, 1987, p. 493-500.
- Audiguier M., Geremew Z., Laribi S., Cojean R. – Caractérisation au laboratoire de la sensibilité au retrait-gonflement des sols argileux. *Revue française de géotechnique*, n° 120-121, 2007, p. 67-82.
- Audiguier M., Geremew Z., Cojean R. – Relations entre les microstructures de deux sols argileux de la région parisienne et leur sensibilité au retrait-gonflement. In : J.-P. Magnan, R. Cojean, Y.-J. Cui, P. Mestat (eds.). *SEC 2008, Symposium international Sécheresse et Constructions*, 2008, p. 235-243.
- Barden L. – Macro and microstructure of soils. Pusch R. (ed). *Proceedings of International Symposium on Soil Structure*. Göteborg (Sweden), vol. 1. Swedish Geotechnical Institute, Stockholm, 1973, p. 21-26.
- Collins K., McGown A., Barden L. – Microstructural features of some Israeli expansive soils. *Proceedings of 3rd International Conference Expansive Soils*, Haifa, Israel, 1973, p. 27-34.
- Cui Y.J., Loiseau C., Delage P. – Microstructure changes of a confined swelling soil due to suction controlled hydration. In : *Proc 3rd Int. Conf. on Unsaturated Soils, UNSAT2002*. Recife, Brazil, Balkema, 2002, p. 593-598.
- Cuisinier O., Laloui L. – Fabric evolution during hydromechanical loading of a compacted silt. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 28 (6), 2004, p. 483-499.
- Delage P., Lefebvre G. – Study of the structure of a sensitive Champlain clay and its evolution during consolidation. *Can. Geotech. J.*, 21 (1), 1984, p. 21-35.
- Delage P., Audiguier M., Cui Y.J., Howat M.D. – Microstructure of a compacted silt. *Can. Geotech. J.*, 33, 1996, p. 150-158.
- Romero E., Simms P.H. – Microstructure investigation in unsaturated soils : a review with special attention to contribution of mercury intrusion porosimetry and environmental scanning electron microscopy. *Geotech. Geol. Eng.*, 26, 2008, p. 705-727.
- Simms P.H., Yanful E.K. – Predicting soil-water characteristic curves of compacted plastic soils from measured pore-size distributions. *Géotechnique*, 52 (4), 2002, p. 269-278.
- Tessier D., Lajudi A., Petit J.C. – Relation between the macroscopic behaviour of clays and their microstructural properties. *Appl. Geochem.*, 1 (Suppl), 1992, p. 151-161.
- Tovey N.K. – Quantitative analysis of electron micrographs of soil structure. In : Pusch G.R. (ed). *Proceedings of International Symposium on Soil Structure*, vol. 1. Swedish Geotechnical Institute, Stockholm, 1973, p. 50-57.