
Effet du carbonate sur le comportement mécanique de l'argile de Mormoiron

Hanène Souli* — Diep Nguyen** — Zohra Guellati** —
Jean-Marie Fleureau **

* *Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes (LTDS), Ecole d'Ingénieurs de Saint-Etienne & CNRS UMR 5513, 48 rue Jean Parot, 42053 Saint-Etienne, France, hanene.souli@enise.fr*

** *Laboratoire de Mécanique des Sols, Structures & Matériaux (LMSSMat), Ecole Centrale Paris & CNRS UMR 8579, Grande voie des vignes, 92295 Châtenay Malabry, thi-ngoc-diep.nguyen@ecp.fr, jean-marie.fleureau@ecp.fr,*

RÉSUMÉ. L'article présente les résultats d'essais d'identification, d'essais hydriques et mécaniques sur le sol du site pilote de Mormoiron. Le matériau est composé d'un mélange d'argile gonflante et de phases non gonflantes, dont un fort taux de carbonate. Pour étudier l'influence de la cimentation due au carbonate sur le comportement, les essais de drainage-humidification et triaxiaux ont été également réalisés sur le matériau remanié sous forme de pâte. Les résultats mettent en évidence l'influence relativement limitée de ce paramètre, qui s'apparente à une surconsolidation mécanique, dans le sol de Mormoiron.

ABSTRACT. The paper presents the results of identification, hydric and mechanical tests on the soil of the Mormoiron study site. The material is made of a mixture of swelling clay and non swelling phases, among which a high percentage of lime. To study the influence of cementation due to carbonate on the behaviour, drying-wetting and triaxial tests have also been performed on remoulded soil prepared as a slurry. The results highlight the relatively small influence of this parameter, which is similar to mechanical overconsolidation, on the behaviour of the Mormoiron soil.

MOTS-CLÉS: Argile gonflante, carbonate, essais triaxiaux, drainage-humidification.

KEYWORDS: Swelling clay, carbonate, triaxial, drying-wetting tests

1. Introduction

Le gonflement des sols argileux, par décompression et/ou apport d'eau, est la cause de nombreux dommages : soulèvement de fonds de fouilles, destruction de chaussées, fissuration de bâtiments, etc. (Stamatopoulos et al., 1989, Hachichi et Fleureau, 1999). Aussi, le phénomène de gonflement a-t-il fait l'objet de nombreuses études, tant in-situ qu'en laboratoire, avec deux objectifs concomitants: comprendre les mécanismes du gonflement du point de vue hydro-mécanique (Alonso et al., 1989) et modéliser le phénomène afin d'être capable de le prendre en compte dans le calcul des fondations et des ouvrages, et mesurer les paramètres du modèle en laboratoire (Musso, 1989).

On considère généralement que le caractère "gonflant" d'une argile est lié en premier lieu à la présence de certains minéraux, tels que la montmorillonite. De nombreux facteurs, tels que la microstructure du sol, sa densité, sa teneur en eau initiale, etc. peuvent affecter de manière significative la pression de gonflement ou la déformation de ces argiles (Souli et al., 2004).

En revanche, dans le cas des sols réels, peu de travaux ont été consacrés à l'étude de l'influence des phases non argileuses (carbonate, quartz...) et de leur répartition. A l'échelle macroscopique, les travaux de différents chercheurs (Serratrice et Soyez, 1996...) ont montré que la présence de ces matériaux était susceptible de diminuer sensiblement l'amplitude des déformations du sol lors de variations des conditions hydriques, surtout si elles présentaient un caractère cimentant comme le carbonate. Les études réalisées à l'échelle microscopique ont mis en évidence la complexité des phénomènes qui interviennent dans ce cas (Souli et al., 2009). Le but de l'étude présentée dans cet article est d'étudier l'effet de la cimentation due au carbonate sur les propriétés mécaniques et hydriques d'un sol argileux soumis au phénomène de retrait gonflement.

2. Matériau et méthodes

Les études ont été réalisées sur des échantillons prélevés sur le site de Mormoiron (Vaucluse) où de nombreux désordres ont été observés sur des maisons. Sur ce site, le BRGM réalise un suivi des teneurs en eau et des tassements-gonflements en différents points en fonction des conditions météorologiques. Les échantillons utilisés proviennent de deux blocs de 50 kg prélevés en avril 2006 à environ 1,85 m de profondeur. Ces échantillons ont été caractérisés du point de vue géotechnique par leurs limites d'Atterberg, leur granulométrie, leur teneur en eau, leur valeur de bleu et leur pourcentage de carbonate. La caractérisation physico-chimique a été réalisée à partir d'essais de diffraction des rayons X et d'analyse thermogravimétrique. Les essais mécaniques effectués sur les matériaux ont consisté en essais de drainage-humidification et essais triaxiaux consolidés non drainés. Ces essais ont été réalisés à la fois sur le matériau intact et sur le matériau remanié.

2.1. Identification géotechnique du matériau

Tous les essais d'identification ont été effectués selon les procédures des normes AFNOR. Les principales caractéristiques de plasticité et granulométrie, indiquées dans le tableau 1 montrent que le sol peut être classé dans les sols moyennement à fortement gonflants. La teneur en eau naturelle des échantillons est de $26 \pm 2\%$, ce qui est cohérent avec la teneur en eau moyenne du sol à la période où le matériau a été prélevé (mesures in-situ réalisées par le BRGM). L'indice des vides initial est de $0,93 \pm 0,1$ et le degré de saturation de $0,8 \pm 0,1$.

Les mesures de calcimétrie conduisent à un taux de carbonate global compris entre 50 et 75%, qui correspond à la fois à la présence de granules dont la taille peut atteindre plusieurs millimètres et de calcaire mélangé à la structure de l'argile et participant à sa cimentation. Si l'on retire les granules, le pourcentage revient à environ 25 à 55%, ce qui traduit une dispersion importante de la composition du sol. On peut considérer que ce taux de carbonate correspond à la cimentation entre les grains.

| Plasticité | | | | Granulométrie | | Dens. des grains |
|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------|---------------|-------------|------------------|
| w _L % | w _P % | I _P % | Valeur de Bleu | < 80 μm % | < 2 μm % | G _s |
| 52-58 | 22-28 | 30 | 6,5-6,7 | 95 | 76,8 | 2,72 |

Tableau 1. Identification géotechnique du matériau

2.2. Caractérisation physico-chimique du sol

Les essais de diffraction de rayons X ont été faits directement sur des échantillons placés sur le porte-objet, sans préparation particulière. Les résultats (Figure 1) confirment la présence importante de carbonate (sous la forme de calcite et de dolomite) et de quartz et, pour la fraction argileuse, celle de smectite et d'illite.

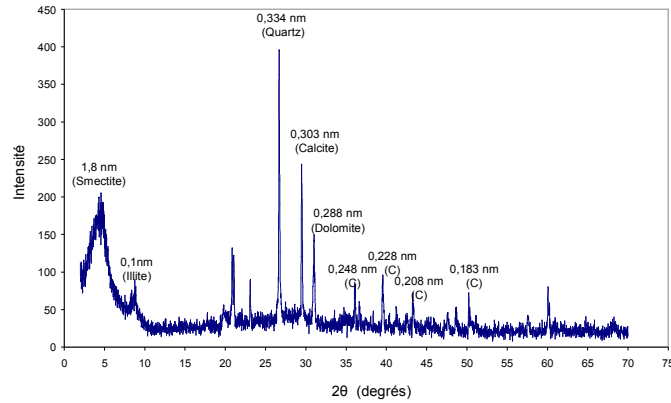


Figure 1. *Diffraction de rayons X du matériau de Mormoiron*

L'analyse thermogravimétrique du matériau (Figure 2) met en évidence trois pertes d'eau : 17% à 93°C, 1,9% à 492°C et 16% à 780°C, correspondant respectivement à l'eau libre, la déshydroxylation et la décomposition des carbonates.

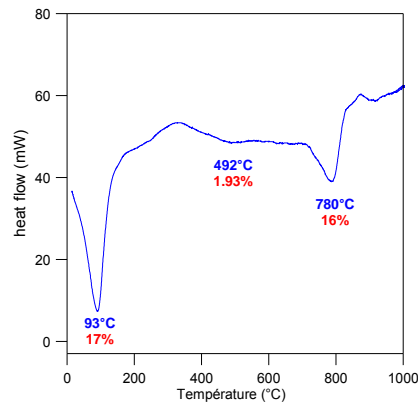


Figure 2. *Analyse thermogravimétrique du matériau intact*

2.3. Mode opératoire des essais de drainage-humidification

Les essais de drainage-humidification ont été réalisés en imposant différentes valeurs de succion ($s = u_a - u_w$, où u_a est la pression interstitielle de l'air et u_w , celle de l'eau) et en mesurant les caractéristiques (volume total et teneur en eau) des échantillons à l'équilibre. Pour réaliser les essais, les techniques suivantes ont été utilisées : (1) plaques tensiométriques pour les succions de 0,3, 8 et 25 kPa (2) solutions osmotiques (PEG 20000) pour les succions de 200, 700 et 1400 kPa (3)

solutions salines pour les succions de 22.5 MPa (KCl), 56.2 MPa (NaNO₂), 158.5 MPa (CaCl₂). Ces différentes techniques sont détaillées dans de nombreux articles (par exemple, Verbrugge et Fleureau, 2002). Les essais ont été effectués sur le sol intact et sur le sol remanié, préparé à partir du sol séché, broyé, puis ré-humidifié à une teneur en eau initiale égale à 1,5 fois la limite de liquidité. A l'état initial de prélèvement, la teneur en eau des échantillons intacts est comprise entre 24 et 28% et la succion d'environ 50 à 100 kPa.

2.4. Mode opératoire des essais triaxiaux

Les essais triaxiaux consolidés isotropiquement et drainés (CID) ou non drainés (CIU) comportent les phases suivantes : (a) prélèvement et mise en place des échantillons, (b) saturation par contre-pression, (c) mesure du paramètre de Skempton B, (c) consolidation isotrope, (d) écrasement, (e) démontage et détermination des caractéristiques finales.

Le matériau intact est prélevé dans le gros bloc de marne au moyen d'un carottier à paroi mince de 35 mm de diamètre intérieur et 100 mm de hauteur. L'échantillon est ensuite extrait du carottier, placé sur un support et les extrémités de la carotte sont recoupées de façon à avoir un échantillon de 70 mm de hauteur environ. Les plus gros grains visibles de calcaire sont enlevés et remplacés par du matériau fin. Si les grains sont trop gros, l'échantillon est éliminé. Après mise en place de l'échantillon sur le piédestal de la cellule et application des conditions initiales, la saturation par contre-pression se fait de façon continue en augmentant simultanément la pression de confinement et la contre-pression, en maintenant une différence de 20 kPa entre les deux, jusqu'à $\sigma_3 = 470$ kPa et $u = 450$ kPa.

A la fin de la consolidation isotrope, l'écrasement monotone drainé ou non drainé est réalisé à une vitesse inférieure ou égale à 0.020 mm/min.

Au total, cinq essais drainés et sept essais non drainés ont été réalisés sur le matériau intact. En outre, quatre essais consolidés isotropiquement et non drainés ont été faits sur le matériau remanié, préparé initialement sous forme de pâte à une teneur en eau égale à 1,5 fois la limite de liquidité puis préconsolidés dans un oedomètre sous une contrainte verticale de 100 kPa. Une fois la consolidation oedométrique terminée, la procédure est la même que pour les échantillons intacts.

3. Résultats

3.1. Essais de drainage-humidification

Les résultats des essais de drainage-humidification sont représentés sur la Figure 3. Notons que, pour le matériau intact, la dispersion des teneurs en eau est beaucoup plus élevée que celle des indices des vides ou des degrés de saturation, ce qui est le contraire de ce que l'on observe habituellement.

Dans le plan [teneur en eau – indice des vides], on obtient, aussi bien pour le sol intact que remanié, une limite de retrait de l'ordre de 8%. Cette valeur sensiblement inférieure à la limite de plasticité (28%) pourrait indiquer un état de consolidation relativement important. Dans le plan [suction - indice des vides], on note que les chemins de drainage et d'humidification sont sensiblement linéaires. On ne peut pas mettre en évidence de palier de retrait dans ce plan, ce qui correspond à un résultat assez habituel dans les argiles dites gonflantes.

Le domaine de variation de l'indice des vides, entre 1.2 et 0.2, est très important pour ce type de matériau et pourrait conduire à une déformation maximale de retrait du matériau quasi-saturé de 45%, la déformation maximale de gonflement du matériau sec étant de 79%. Ces valeurs constituent une indication très significative des potentiels de retrait et gonflement du sol. On observe également que le matériau est très difficile à saturer, même au bout d'un temps très long, ce qui traduit à la fois sa très faible perméabilité et un mouillage difficile des solides par l'eau, sans doute provoqué par la présence du carbonate.

Le chemin de drainage du sol remanié apparaît un peu décalé par rapport aux corrélations de Biarez et Favre (1975) avec la limite de liquidité, mais le parallélisme des courbes reste bon.

Le matériau intact apparaît donc comme un sol légèrement surconsolidé, avec une contrainte de surconsolidation comprise entre 500 kPa et 5 MPa si l'on considère la suction du chemin de drainage NC correspondant à l'indice des vides initial des matériaux intacts. Cette surconsolidation peut naturellement provenir d'une contrainte géologique exercée sur la couche de terrain, mais aussi, dans le cas présent, des cycles de suction subis par le sol et de la cimentation due au carbonate.

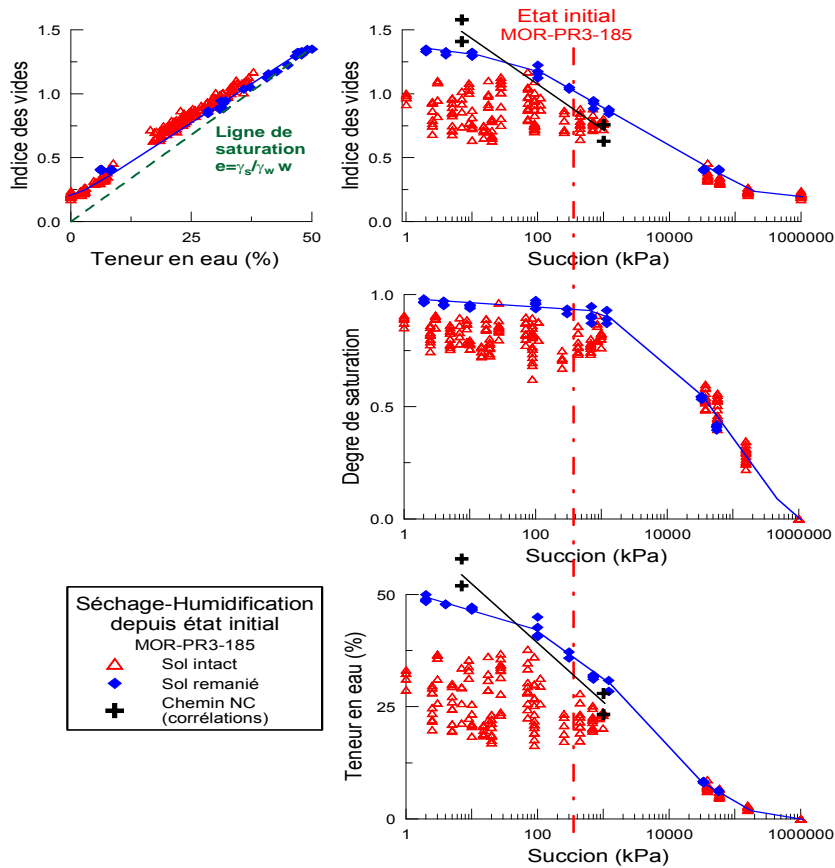


Figure 3. Chemins de drainage-humidification sur le matériau de Mormoiron intact (triangles) et remanié (losanges). Comparaison avec les corrélations de Biarez & Favre (1975)

Des mesures complémentaires du taux de carbonate ont été faites sur des échantillons intacts soumis à une succion imposée, de manière à délimiter empiriquement des domaines de taux de carbonate dans le comportement des échantillons (Figure 4). Bien entendu, ces limites sont très imprécises et ne doivent être considérées que comme des indications d'une tendance générale. A ces mesures, nous avons ajouté le chemin de drainage du sol remanié, donc sans cimentation, que l'on pourrait assimiler à un taux de carbonate nul. On peut en déduire que la présence du carbonate se traduit par une surconsolidation du sol, d'autant plus importante que le taux est plus élevé. Même si les lignes tracées sont très imprécises, on peut voir que la présence du carbonate correspond à des contraintes de consolidation comprises entre quelques MPa et près de 100 MPa.

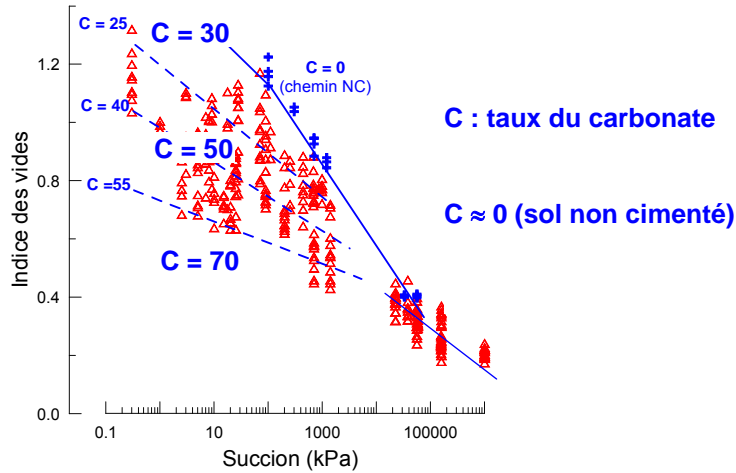


Figure 4. Effet du taux de carbonate sur le chemin de séchage du sol

3.2. Essais triaxiaux

Les résultats des 12 essais, drainés et non drainés, effectués sur le matériau sont représentés sur les figures 5 à 7.

Dans le plan [déformation axiale, déviateur de contraintes] (Figure 5), on observe un comportement assez particulier caractéristique des matériaux cimentés, qui se traduit par une augmentation quasi-verticale du déviateur, avec une déformation axiale très faible, suivie d'une sorte de palier où la déformation axiale augmente à déviateur quasi-constant. Ensuite, l'essai se poursuit comme dans le cas d'un sol ordinaire. La première partie de l'essai indique un comportement de sol raide cimenté. Les liaisons entre les grains se rompent pour un déviateur compris entre 50 et 150 kPa en moyenne (à l'exception d'un essai à 40 kPa et d'un autre à 250 kPa) et l'essai se poursuit comme dans le cas d'un sol plastique plutôt surconsolidé. Ce comportement se retrouve dans le plan [déformation axiale, variation de pression interstitielle] (Figures 6) où la première phase de l'essai se traduit par de faibles variations des paramètres qui évoluent ensuite de la façon habituelle des sols déformables. La plupart des échantillons ont un comportement contractant ou présentent une augmentation de pression interstitielle, à une ou deux exceptions près. On observe en effet une tendance à la dilatance pour un échantillon non drainé à 150 kPa de contrainte de confinement.

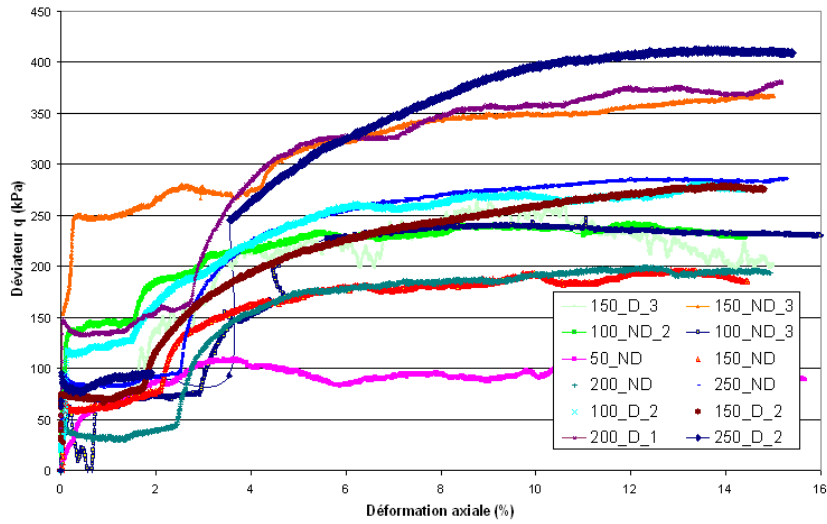


Figure 5. Courbes contraintes-déformations pour les essais drainés et non drainés à différentes valeurs de σ_3

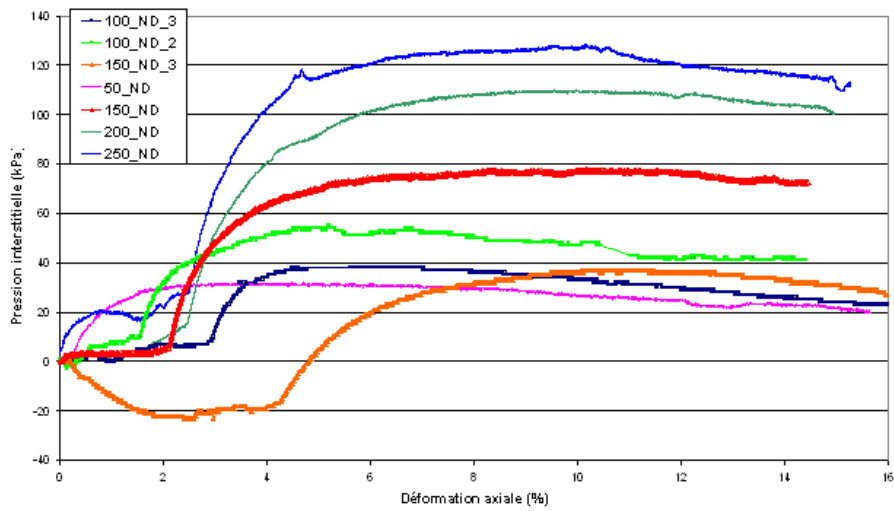


Figure 6. Courbes pressions interstitielles-déformations axiales pour les essais non drainés à différentes valeurs de σ_3

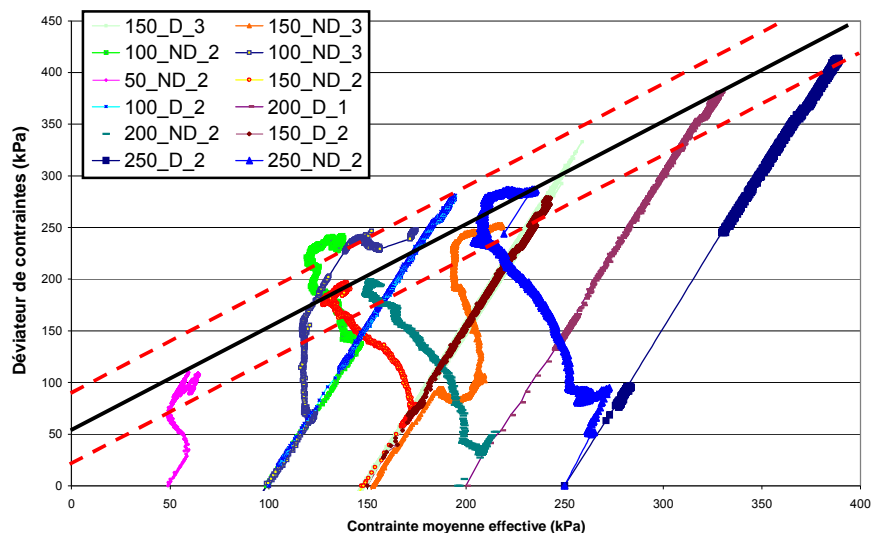


Figure 7. Chemins de contrainte et critère de rupture pour les essais drainés et non drainés à différentes valeurs de σ_3

Dans le plan [contrainte moyenne effective p' – déviateur q] (Figure 7), on voit apparaître un changement de comportement des échantillons non drainés au delà d'un seuil, au dessous du seuil, l'échantillon est quasiment rigide, son volume (en drainé) ou sa pression interstitielle (en non-drainé) ne varie que très peu alors qu'au delà du seuil, on retrouve le comportement non drainé habituel, avec une forte augmentation de la pression interstitielle. Cela signifie qu'il existe bien une cimentation entre les grains, mais que celle-ci est rapidement détruite par le déviateur.

Dans le plan de Mohr déduit du plan [p' , q], on peut définir un critère de rupture « moyen » avec une cohésion de l'ordre de 30 kPa et un angle de frottement de 25° environ ($M = 1,0$). Pour l'ensemble des essais, on peut estimer que la cohésion varie entre 15 et 45 kPa, avec toujours le même angle de frottement interne. Cet angle est plutôt celui d'une kaolinite que d'une smectite, probablement en raison du taux élevé de carbonate.

Des essais triaxiaux CIU ont également été effectués sur le matériau remanié, consolidé à partir de la pâte afin de voir le rôle joué par la cimentation due au carbonate dans le comportement du sol. Les résultats obtenus conduisent à un critère de rupture de pente M voisine de 1 (soit $\phi' = 25^\circ$), comme pour le matériau intact, et de cohésion nulle. Par conséquent, si l'on compare le critère de rupture du sol remanié à celui du sol intact, on constate que celui-ci est parallèle et pratiquement confondu avec la limite basse du critère de rupture du sol intact.

5. Conclusion

L'ensemble des essais effectués sur le matériau de Mormoiron montre qu'il s'agit d'un sol dont le potentiel de gonflement est moyen à fort. La présence d'un fort pourcentage de carbonate n'affecte finalement qu'assez peu cette caractéristique, les liaisons créées par le carbonate se cassant assez rapidement sous l'effet d'une contrainte ou d'un changement de succion. La comparaison des résultats sur matériau intact et remanié permet de mettre en évidence l'influence limitée du carbonate sur le comportement du sol sur chemins de drainage-humidification, et triaxial. La présence du carbonate se traduit concrètement par une faible surconsolidation du sol qui augmente avec le pourcentage.

6. Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet « Analyse du Retrait-Gonflement et de ses Incidences sur les Constructions » - ARGIC, financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) - Réseau Génie Civil et Urbain (RGCU). Les auteurs remercient particulièrement M. Marc VINCENT, ingénieur au BRGM, coordinateur du projet.

7. Bibliographie

- Alonso E.E., Lloret A., Gens A., Battle F., « A new approach for the prediction of long term heave », *12th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng.*, Rio de Janeiro, Août 1989.
- Biarez J. & Favre J.L., « Parameters fitting and statistical analysis of data in soil mechanics », *2nd Int. Conf. on Application of Statistics and Probabilities in Soil Mechanics*, Aachen, Vol. 2, 1975, p. 249-264.
- Fleureau J.M., Kheirbek-Saoud S., Soemitro R. & Taibi S., « Behaviour of clayey soils on drying-wetting paths », *Canadian Geotechnical Journal*, 30, n° 2, 1993, p. 287-296.
- Hachichi A. et Fleureau J.M., « Caractérisation et stabilisation de quelques sols gonflants d'Algérie », *Revue Française de Géotechnique*, **86**, 1999, pp. 37-51.
- Musso A., « Restrained rebound of saturated clay », *11th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng.*, San Francisco, 1, 1989, p. 629-633.
- Serratrice J.F. et Soyez B., « Les essais de gonflement », *Bull. Liaison des Ponts et Chaussées*, 204, 1996, p. 75-85.
- Souli H., Fleureau J.-M., Kbir-Arighuib N. et Trabelsi-Ayadi M., « Changes in the fabric of a Tunisian clayey soil during wetting », *Clay Minerals*, à paraître en 2009.
- Stamatopoulos A.C., Gassios E.C., Christodoulis J.C., Hiannaros H.C., « Recent experiences with swelling soils », *12th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng.*, Rio de Janeiro, 1, 1989, p. 655-658.