



Thèse pour l'obtention du Grade de:

Docteur de l'Université de Lorraine

Présentée par:

Qian-Feng GAO

Spécialité: **Géotechnique**

**Approche micro-macro du phénomène de dilatance dans
les argiles remaniées - Etude du comportement en
condition saturé et non saturé**

Soutenue le 13 décembre 2018

Devant le jury composé de :

Philippe Cosenza	Professeur	Université de Poitiers	Rapporteur
Pierre Delage	Professeur	Ecole des Ponts ParisTech	Rapporteur
Cristina Jommi	Professeur	Delft University of Technology	Examineur
Zhenyu Yin	MCF-HDR	Ecole Centrale de Nantes	Examineur
Mohamad Jrad	MCF	Université de Lorraine	Examineur
Lamine Ighil Ameer	Docteur	Cerema de Blois	Examineur
Mahdia Hattab	Professeur	Université de Lorraine	Directeur de thèse
Jean-Marie Fleureau	Professeur	Université Paris Saclay CentraleSupélec	Co-directeur de thèse

Laboratoire d'Étude des Microstructures et de Mécanique des Matériaux

LEM3 UMR CNRS 7239 - Université de Lorraine

7 rue Félix Savart - F-57070 Metz Cedex 03 - France

Résumé

L'argile est abondamment distribuée à la surface de la Terre, c'est un matériau très largement utilisé dans la domaine Génie Civil, comme matériaux de construction par exemple. L'argile est également utilisée comme des barrières naturelles dans les cœurs de barrages, mais aussi comme matrice pour le stockage des déchets radioactifs à cause de ses propriétés de rétention. La nature complexe de l'argile a amené les chercheurs à s'intéresser à son comportement mécanique en condition saturée et non-saturée. L'observation microscopique est un plus pour une meilleur compréhension de ce comportement.

L'objectif de cette recherche est d'étudier l'influence des chemins de contrainte triaxiaux sur le comportement mécanique et sur les mécanismes qui se produisent au niveau microstructural. L'étude est réalisée en considérant à un niveau de contrainte donné, le phénomène de dilatance est approché suivant des chemins de contraintes différents. Dans un deuxième temps, l'étude se porte sur l'influence de la succion sur le comportement.

Pour les argiles remaniées saturées, le comportement dilatant à un niveau de contrainte donné, atteint par deux chemins de contrainte différents (le chemin de constant σ'_3 et le chemins de contrainte purement déviatorique), a été finement analysé. L'influence du niveau de contrainte a été également abordée dans le cadre de cette étude. L'analyse microstructurale a été analysée à différentes échelles au moyen de différentes méthodes : la microscopie électronique à balayage, la porosimétrie par intrusion de mercure et la micro tomographie à rayons X.

Au niveau macroscopique, les résultats ont montré que, pour un niveau de contrainte donné, le comportement volumétrique est fonction du chemin de contrainte. La dilatance est activée dans le cas d'argiles surconsolidées principalement lorsque le chargement est purement déviatorique. Au niveau microscopique, les résultats mettent en évidence cinq modes d'orientation des particules qui pourraient être activés sous chargement triaxial. Les résultats révèlent que l'apparition de la dilatance dans les argiles remaniées fortement surconsolidées peut être attribuée à l'arrangement tortueux des particules d'argile, l'ouverture des micropores ainsi que la formation et l'ouverture de fissures mésoscopiques.

Pour les argiles remaniés non saturées, les études sont réalisés par les essais

macroscopiques et mésoscopiques sur l'argile Kaolin K13 (même matériau que pour les essais en condition saturée) et un mélange kaolinite-montmorillonite M35 (pour montrer l'influence de la minéralogie). L'évolution des succions a été mesurée au moyen d'hygromètres placés dans les extrémités supérieure et inférieure d'échantillon. Les résultats démontrent que la contrainte déviatorique d'argile non saturée, lorsque la succion est forte, commence par augmenter jusqu'à un sommet puis diminue pour rejoindre une valeur résiduelle. La résistance au cisaillement d'argile non saturée augmente généralement avec la contrainte moyenne et la succion. Cependant, dans nos essais à succion très élevée le développement d'une fissuration lors du séchage a conduit à perdre l'homogénéité du matériau et à réduire la résistance au cisaillement de l'éprouvette.

Mots-clefs: Argile Remaniée; Essai Triaxial; Dilatance; Microstructure; Succion; Résistance au Cisaillement

Abstract

Clay is extensively distributed on the Earth's surface. It is widely used in the field of Civil Engineering, for example as a building material. Furthermore, clay can be used as not only a natural barrier in the dam cores, but also a matrix for the storage of radioactive wastes because of its retention properties. The complex nature of clay has aroused great interest of researchers in its mechanical behaviour under saturated and unsaturated conditions. The microscopic observation is a necessary complement for a better understanding of this behaviour.

The objective of this research is to examine the influence of triaxial stress paths on the mechanical behaviour of remoulded clay and the mechanisms that occur at the microstructural level. The dilatancy phenomenon is particularly investigated considering a given stress level but different stress paths. In the second part, this study focuses on the influence of suction on the mechanical behaviour.

For the saturated remoulded clay, the dilative behaviour at a given stress level, reached by following two different stress paths (i.e., the constant σ'_3 stress path and the purely deviatoric stress path), was analyzed in detail. The influence of stress level was also examined in this study. The microstructural analysis was conducted at different scales by means of different methods: scanning electron microscopy (SEM), mercury intrusion porosimetry (MIP) and X-ray microtomography (XR- μ CT).

The macroscopic results of saturated clay show that, at a given stress level, the volumetric behaviour greatly depends on stress path. In the case of overconsolidated clay, the dilatancy is activated especially when triaxial shearing is performed following the purely deviatoric stress path. At the microscopic level, the results highlight five modes of particle orientation that could be activated under triaxial loading. The results also reveal that the appearance of dilatancy phenomenon in highly overconsolidated remoulded clay may be attributed to the tortuous arrangement of clay particles, the opening of micropores, and the formation and opening of mesocracks.

For the unsaturated remoulded clay, the studies were performed through many macroscopic and mesoscopic tests on Kaolin K13 clay (the same material as that for saturated tests) and a kaolinite-montmorillonite M35 mixture (to show the influence of mineralogy). The evolution

of suctions was measured using hygrometers placed near the upper and lower ends of clay specimens. The results show that, at a high suction level, the deviatoric stress of unsaturated clay increases to a peak and then decreases down to a residual value. The shear strength of unsaturated clay generally increases with increasing mean stress and suction. However, in our very high suction test, the development of cracks during drying led to the inhomogeneity of the material and thus resulted in a smaller shear strength of the specimen.

Keywords: Remoulded Clay; Triaxial Test; Dilatancy; Microstructure; Suction; Shear Strength