



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>



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**

Introduction en Français

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 - France

1 Introduction

Cette thèse implique une étude expérimentale multi-échelles des argiles remaniées saturées et non saturées. L'objectif général est d'examiner l'influence des chemins de contrainte triaxiaux sur le comportement mécanique et l'évolution microstructurale au niveau de contrainte donné, d'identifier le mécanisme microscopique du phénomène de dilatance dans de l'argile remaniée et d'étudier la résistance au cisaillement et le changement de volume d'argile non saturée sur des chemins différentes de contrainte-succion.

2 Propriétés matérielles et méthodes expérimentales

2.1 Propriétés matérielles

Deux argiles, à savoir Kaolin K13 et M35, ont été étudiées. Les propriétés physiques sont résumées dans le tableau 1. La boue d'argile avait la teneur en eau initiale de 1.5 w_L et a été préconsolidée sous une contrainte effective verticale de 120 kPa. Après la préconsolidation, des échantillons cylindriques ont été extraits.

Tableau 1 Propriétés physiques des matériaux étudiés (Hammad, 2010; Zhao, 2017)

Matériau	Gravité spécifique G_s	Limite liquide w_L (%)	Limite de plasticité w_p (%)	Indice de plasticité I_p (%)	Surface spécifique S_s (m ² /g)
Kaolin K13	2.63	42	21	21	27
M35	2.67	82	30	52	/

2.2 Programmes expérimentaux

2.2.1 Expériences sur argile saturée

L'objectif est d'examiner l'influence des chemins de contraintes sur le comportement mécanique et la microstructure de l'argile, puis d'essayer d'identifier le mécanisme de dilatance. Les expériences comprenaient à la fois des essais mécaniques et des essais microscopiques, ainsi que montré à la Figure 1.

2.2.2 Expériences sur argile non saturée

Le but est d'étudier la résistance au cisaillement et le changement de volume d'argile non saturée sur des chemins différentes de contrainte-succion. Les expériences comprenaient à la fois des essais macroscopiques et des essais mésoscopiques (Figure 2).

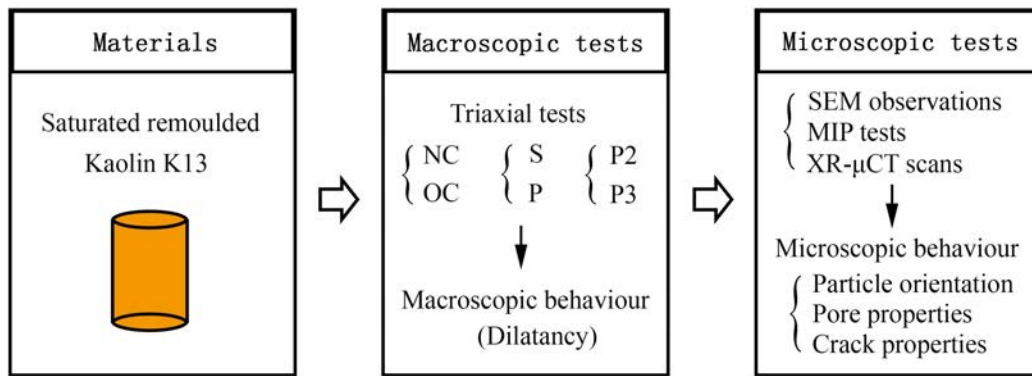


Figure 1 Programme expérimental sur argile remaniée saturée

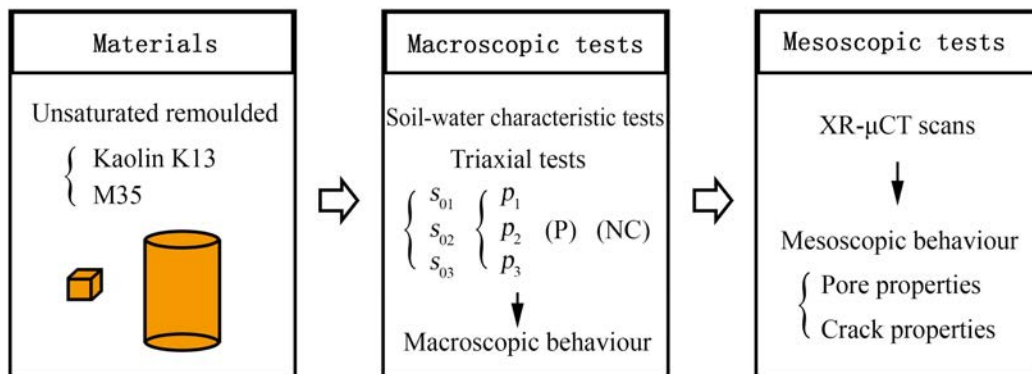


Figure 2 Programme expérimental sur argile remaniée non saturée

3 Comportement à multi-échelle de l'argile Kaolin K13 saturée

3.1 Résultats macromécaniques

La figure 3 montre les résultats d'essais triaxiaux drainés consolidés sur de l'argile Kaolin K13 saturée remaniée.

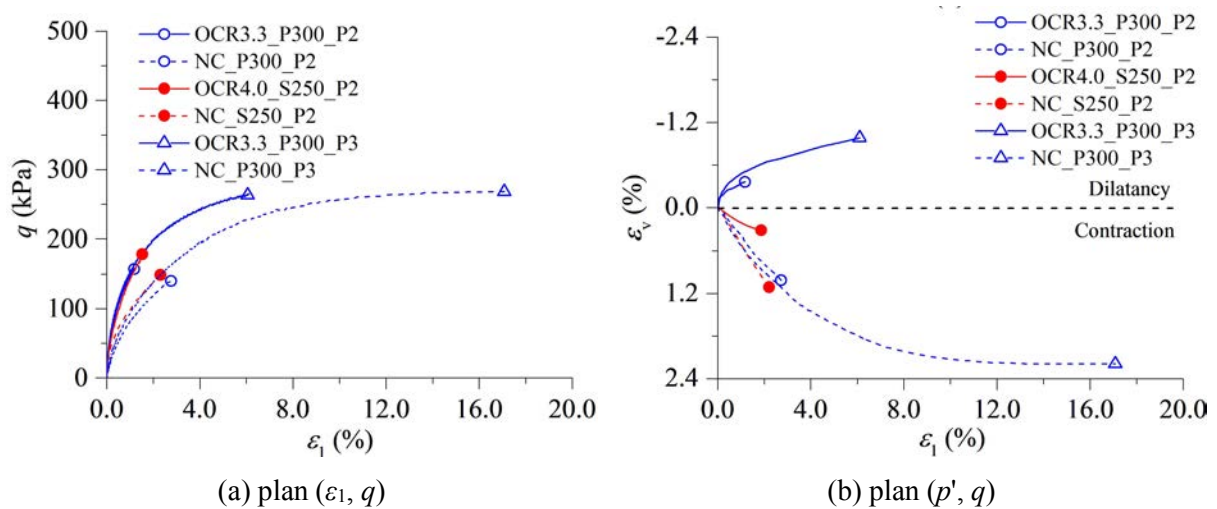


Figure 3 Résultats des essais triaxiaux CD sur de l'argile Kaolin K13 saturée remaniée

En ce qui concerne les échantillons au niveau de contrainte (P2) sur des chemins différents de contrainte, on observe que les courbes de contrainte-déformation manifestent un comportement évident d'écroutissage. En outre, tous les échantillons normalement consolidés se contractent sous une contrainte triaxiale. D'autre part, l'échantillon surconsolidé OCR4.0_S250_P2 présente une déformation volumétrique positive, tandis que l'échantillon OCR3.3_P300_P2 présente une déformation volumétrique négative en raison du mécanisme de dilatance. Sur le chemin à $p' = \text{constante}$, pour les échantillons normalement consolidés, un niveau de contrainte plus élevé entraîne une déformation volumétrique plus grande. Pour les échantillons surconsolidés, cela montre qu'un niveau de contrainte plus élevé accentue le phénomène de dilatance.

3.2 Résultats microstructuraux

3.2.1 Orientation globale des particules

La figure 4 montre les courbes d'orientation globale de particules de différents spécimens. Pour les échantillons au niveau de contrainte P2 sur des chemins différents de contrainte, il est observé que les courbes d'orientation de tous les échantillons normalement consolidés et du spécimen surconsolidé sur le chemin à $\sigma_3 = \text{constante}$ sont caractérisées par des pics prononcés indiquant une orientation préférentielle évidente. En revanche, le pic de la courbe d'orientation de l'échantillon surconsolidé sur le chemin à $p' = \text{constante}$ est plus faible et plus lisse. De plus, il apparaît que les éprouvettes cisailées sur des chemins différents de contrainte ont différentes formes de courbes d'orientation de particules.

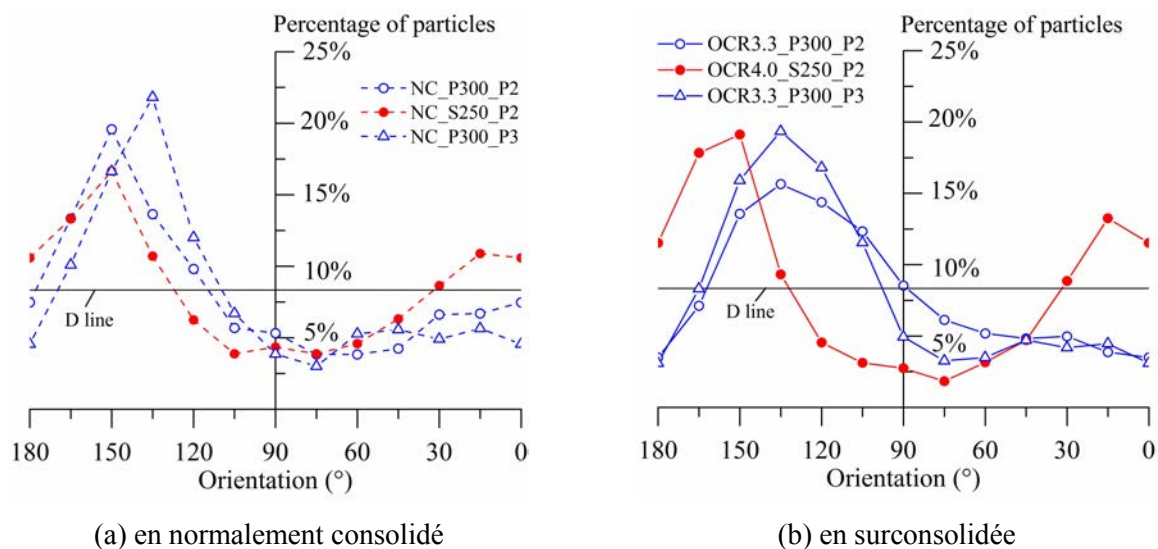


Figure 4 Orientation globale des particules d'échantillons d'argile sur des chemins différents de contrainte triaxiales

Pour les éprouvettes cisailées suivant le chemin à $p' = \text{constante}$ à différents niveaux de contrainte, il est noté que la forme de la courbe d'orientation des particules au niveau de contrainte (P3) semble correspondre à celle au niveau de contrainte (P2). Cependant, un niveau de contrainte plus élevé améliore l'orientation préférentielle des particules d'argile.

3.2.2 Rondeur des pores

La figure 5 présente la distribution de la rondeur des pores de différents spécimens. On observe que toutes les courbes présentent des distributions unimodales avec une arrondie dominante de 0.4, ce qui indique que la plupart des pores des échantillons d'argile soumis à une charge triaxiale ont une forme plus ou moins elliptique. Pour les éprouvettes normalement consolidées, les courbes sont très similaires et assez proches de celle de l'éprouvette surconsolidée sur le chemin à $\sigma_3 = \text{constante}$. Pour ces échantillons présentant un comportement contractant, les formes des pores apparaissent plutôt étroites. En revanche, pour les spécimens surconsolidés présentant un phénomène de dilatance, les courbes se décalent vers la droite et les pics apparaissent plus lisses. Cela signifie que les pores d'un échantillon dilaté ont une forme plus ouverte que ceux d'un échantillon contractant.

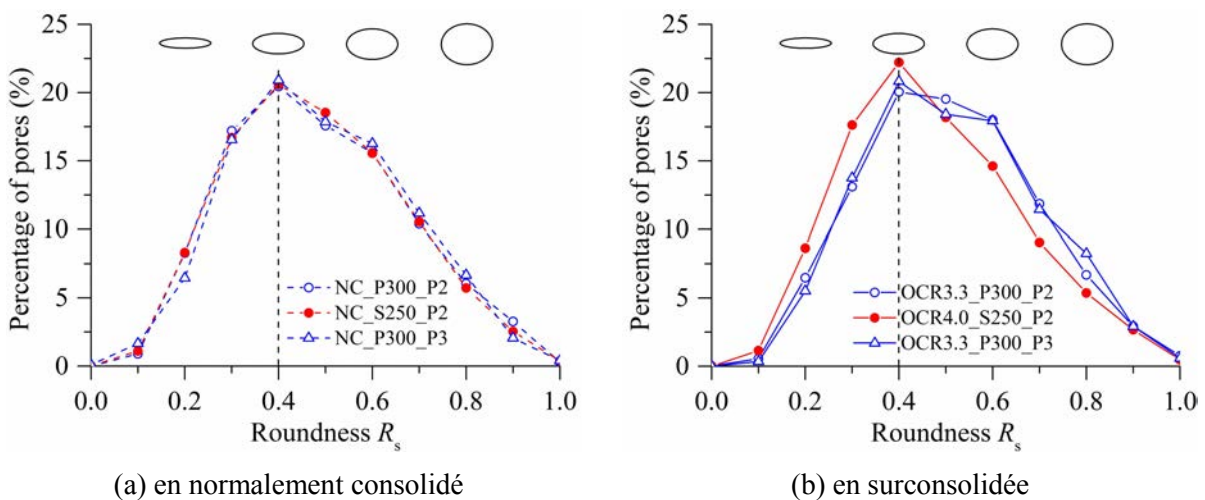


Figure 5 Rondeur des pores des échantillons d'argile sur des chemins différentes de contrainte triaxiales

3.2.3 Distribution de la taille des pores

La figure 6 montre la distribution de la taille des pores de quatre spécimens au niveau de contrainte (P2). On observe que les diamètres de pores estimés par la méthode de MEB-stéréoscopie se situent dans la plage allant de 0.25 μm à 10 μm avec une valeur moyenne de 4.0 μm . En revanche, les diamètres de pores mesurés par PIM montrent une plage

relativement large allant de $0.01 \mu\text{m}$ à $100 \mu\text{m}$ avec une valeur moyenne de $0.15 \mu\text{m}$.

De plus, on peut noter que l'échantillon dilatant (par exemple, OCR3.3_P300_P2) a plus de grands pores (par exemple, $D \geq 4 \mu\text{m}$) que l'échantillon contractant correspondant (par exemple, NC_P300_P2) par rapport aux courbes de PSD mesurées via la MEB-stéréologie. Ceci est probablement dû à l'ouverture induite de larges pores dans un échantillon surconsolidé avec un comportement de dilatance.

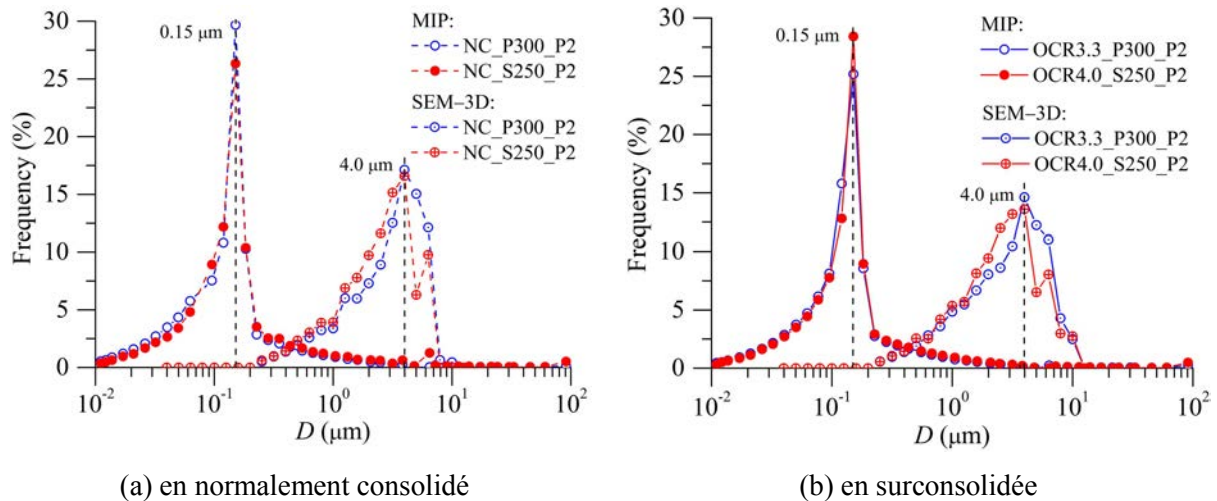


Figure 6 PSD d'échantillons d'argile au niveau de contrainte (P2) sur des chemins différentes de contrainte

3.2.4 Fissures microscopiques et mésoscopiques

Les images au MEB mettent en évidence l'existence de microfissures dans les spécimens normalement consolidés et surconsolidés. Les microfissures apparaissent généralement entre les groupes de particules adjacentes fortement orientées parallèles, qui sont formées à partir de l'assemblage de plusieurs particules avec des contacts face à face.

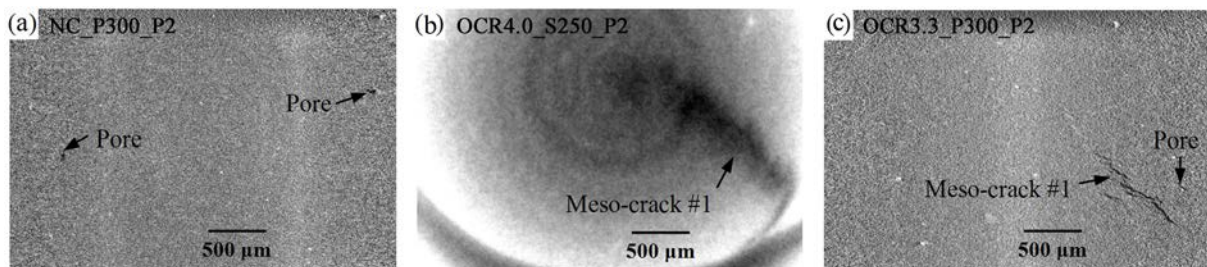


Figure 7 Projections et coupes XR- μ CT d'échantillons d'argile remaniée

Les images XR- μ CT présentées à la figure 7 montrent une différence majeure des structures mésoscopiques entre les spécimens normalement consolidés et les échantillons surconsolidés. Seuls quelques pores de taille moyenne sont observés dans les échantillons

normalement consolidés (par exemple, NC_P300_P2). En revanche, de nombreuses mésocracks ouvertes sont identifiées dans les spécimens surconsolidés. Les résultats confirment l'hypothèse raisonnable selon laquelle certaines des microfissures peuvent se propager jusqu'à l'échelle méso.

4 Comportement hydromécanique de l'argile remaniée non saturée

Dans cette section, seuls les résultats de l'argile Kaolin K13 sont présentés en raison de contraintes d'espace.

4.1 Caractéristiques sol-eau de l'argile non saturée

Les caractéristiques sol-eau de l'argile Kaolin K13 sur le trajet de séchage sont présentées à la figure 8. Les résultats de l'argile Kaolin P300 obtenus par Indarto (1991) et Wei (2013) sont tracés à des fins de comparaison.

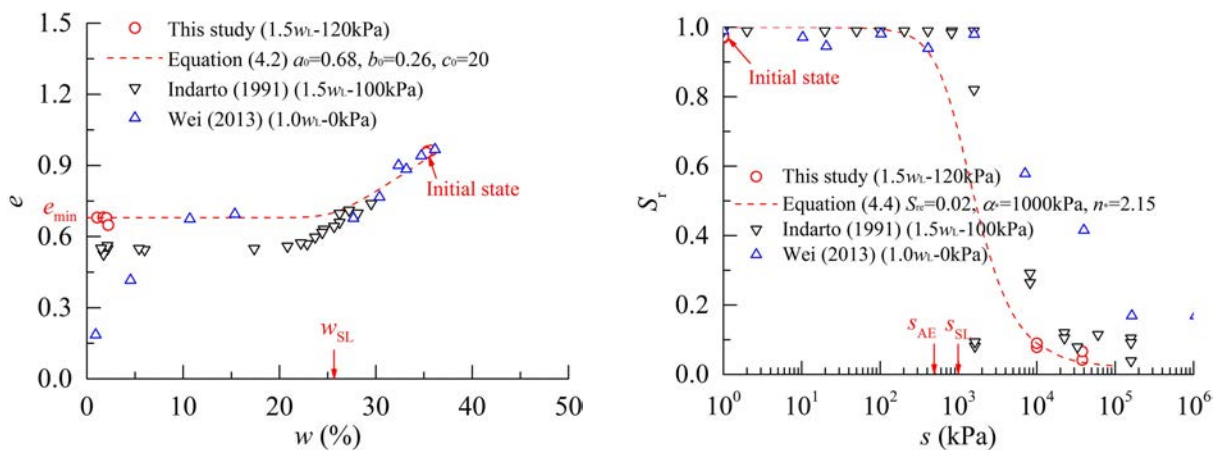


Figure 8 Courbes caractéristiques sol-eau des argiles kaoliniques remaniées

La courbe de retrait estimée montre une tendance similaire à celle des résultats d'Indarto (1991). Cependant, le taux de vide minimal ($e_{min} = 0.68$) et la limite de retrait ($w_{SL} = 26\%$) de cette étude sont plus grands que ceux rapportés par Indarto (1991). La courbe caractéristique sol-eau montre que, sur le trajet de séchage, l'argile reste quasi saturée jusqu'à ce que la succion atteigne la valeur d'entrée d'air ($s_{AE} = 500$ kPa), puis le degré de saturation décroît rapidement et tend enfin vers une valeur résiduelle d'environ 0.02.

4.2 Comportement mécanique de l'argile Kaolin K13 remaniée

4.2.1 Résultats d'argile saturée affectée par la contrainte effective moyenne

La figure 9 présente les résultats d'essais triaxiaux drainés consolidés sur l'argile saturée de

Kaolin K13 sous différentes contraintes effectives moyennes sur le chemin à $p' = \text{constante}$.

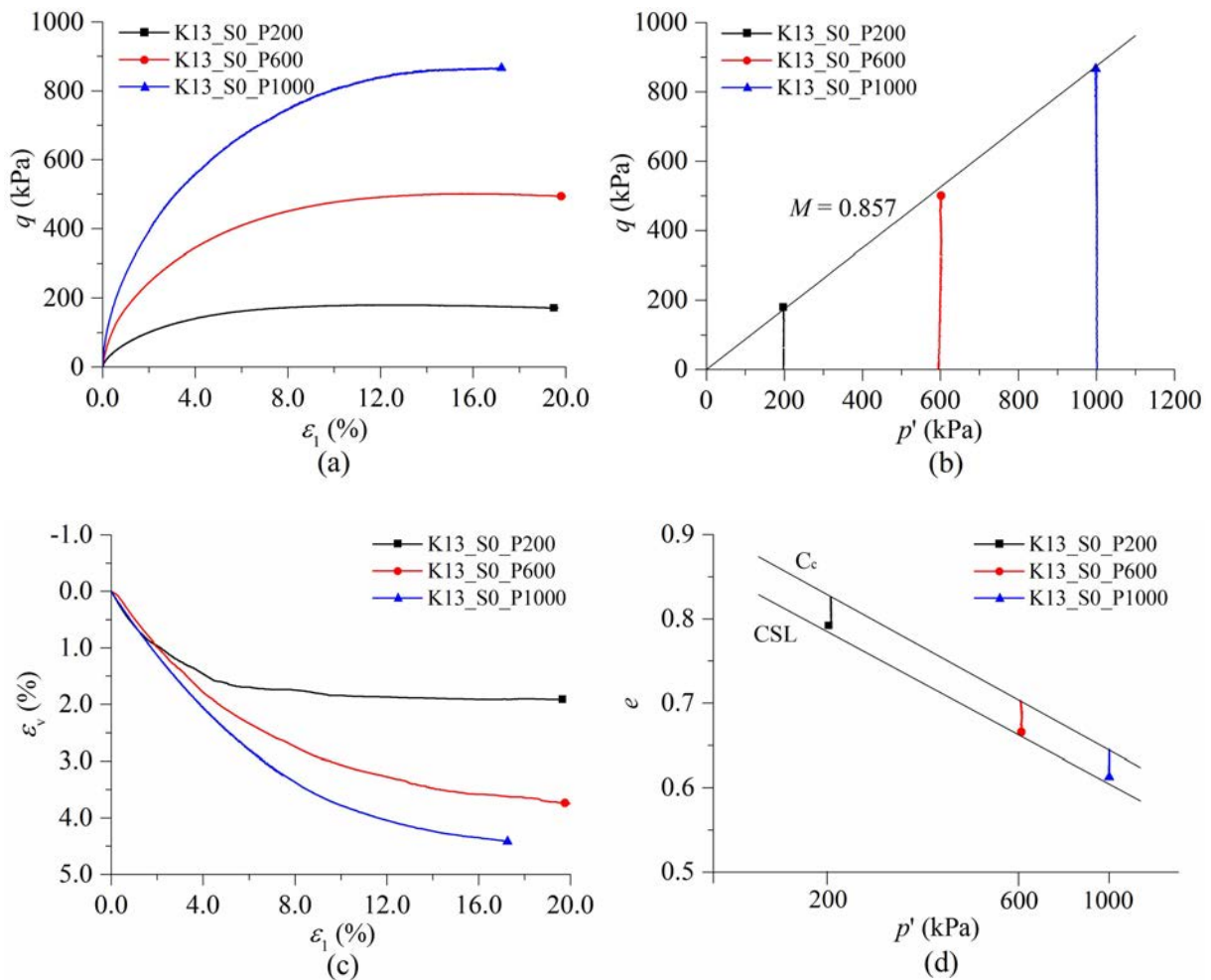


Figure 9 Comportement mécanique de l'argile Kaolin K13 saturée

On peut noter que les contraintes déviatoriques de tous les échantillons augmentent avec l'augmentation des déformations axiales, présentant un comportement de durcissement sous contrainte. Le module initial et la résistance au cisaillement augmentent à mesure que p' augmente. On trouve que le rapport de contrainte critique est $M = 0.857$. Tous les spécimens d'argile sont contractants et la déformation volumétrique maximale augmente à mesure que p' augmente. De plus, les taux de vide de tous les échantillons diminuent de la ligne de compression vers le bas pour s'approcher de la ligne d'état critique (CSL) dans le plan $(\log p', e)$.

4.2.2 Résultats des argiles non saturées affectées par la contrainte moyenne

Les figures 10 à 11 présentent les résultats d'essais triaxiaux non-consolidés non-drainés sur de l'argile non saturée de Kaolin K13 sous des succions initiales données (c'est-à-dire, $s_0 = 10$ MPa et 38 MPa) et différentes contraintes moyennes. On voit sur les figures 10a et 11a

que la contrainte déviatorique de tous les échantillons montre d'abord une augmentation significative suivie d'une légère diminution et enfin un plateau avec une déformation axiale croissante. En outre, plus la contrainte moyenne est importante, plus le module initial et la résistance au cisaillement. Cela signifie que la résistance au cisaillement de l'argile non saturée dépend fortement de la contrainte moyenne appliquée.

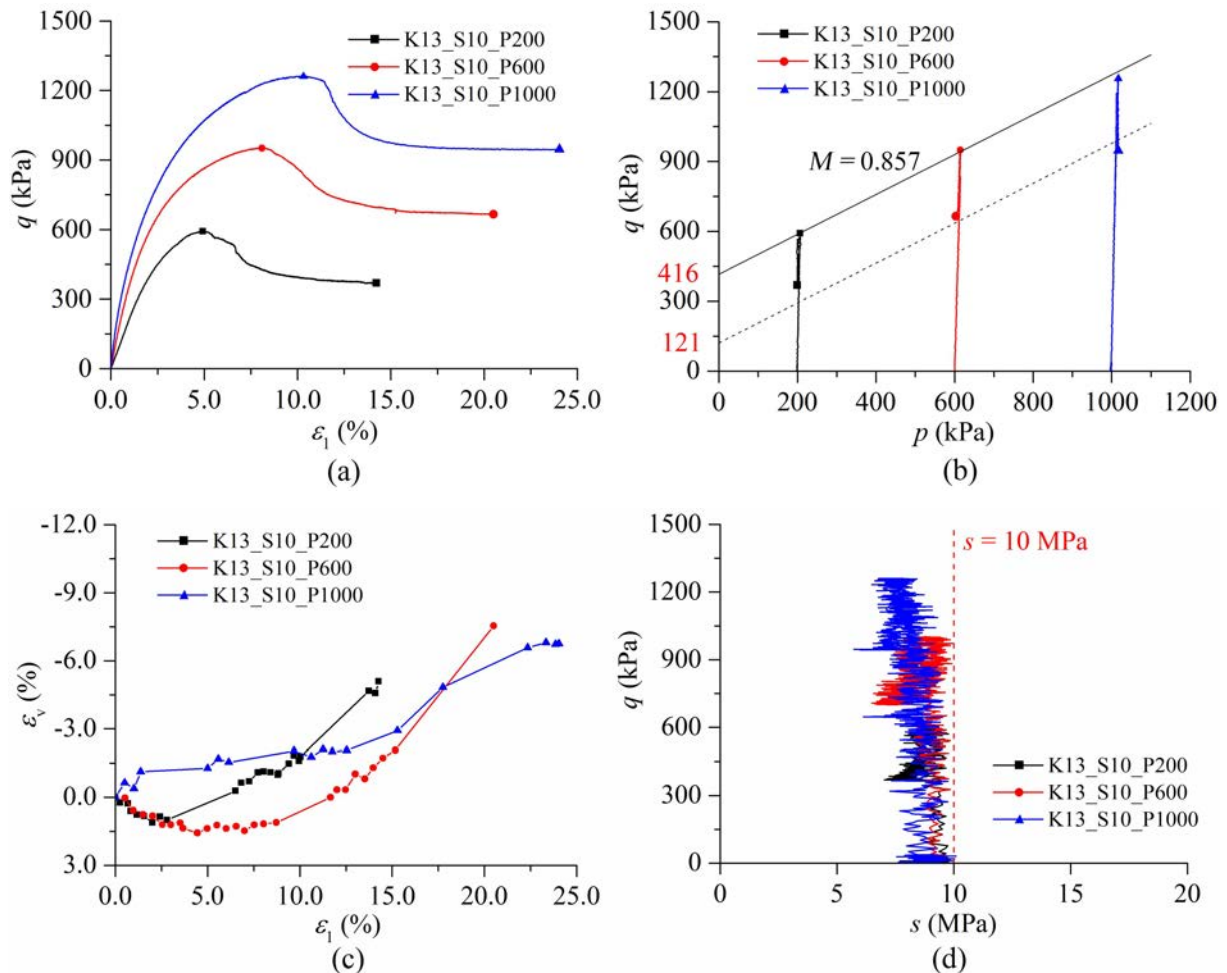
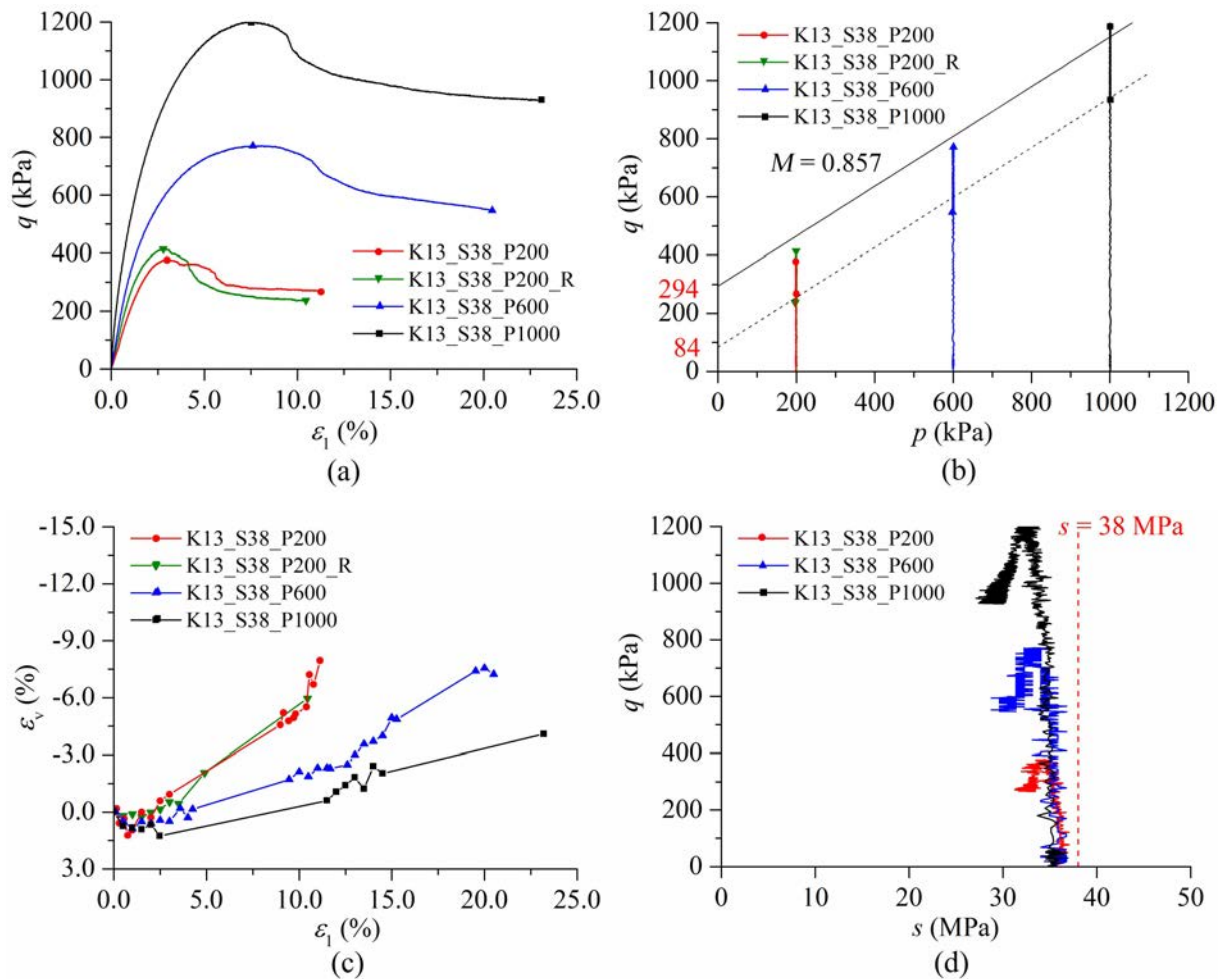


Figure 10 Comportement mécanique de l'argile Kaolin K13 non saturée sous $s_0 = 10$ MPa

Cependant, on peut noter que les résistances au cisaillement des échantillons à $s_0 = 38$ MPa sont inférieures à celles des échantillons à $s_0 = 10$ MPa. Cela semble dû à l'existence de fissures locales initiales dans les échantillons en cours de séchage à très forte succion.

Les figures 10c et 11c montrent que les échantillons à $s_0 = 10$ MPa et à 38 MPa présentent généralement un comportement contractant puis un comportement dilatant quelles que soient les contraintes moyennes. En outre, plus le stress moyen est important, moins le phénomène de dilatance est évident. On voit sur les figures 10d et 11d que la succion totale diminue légèrement à mesure que les déformations axiales augmentent et que cette tendance persiste jusqu'à la fin des essais dans tous les cas.

Figure 11 Comportement mécanique de l'argile Kaolin K13 non saturée à $s_0 = 38$ MPa

4.3 Calcul théorique des cohésions apparentes

La résistance à la traction isotrope en tant que partie de la contrainte effective d'un sol non saturé est appelée contrainte de succion par Lu et Likos (2004). En revanche, si la résistance à la traction isotrope est remplacée par la contrainte capillaire de Taibi (Taibi, 1994), la cohésion capillaire peut être calculée.

Tableau 2 Comparaison entre les cohésions apparentes calculées et mesurées

Matériau	s (MPa)	Cohésion mesurée c (kPa)		Cohésion calculée c (kPa)	
		Résistance maximale	Résistance résiduelle	Cohésion succion	Cohésion capillaire
Kaolin K13	38	623	178	261	29
	10	881	256	283	27

Le tableau 2 compare les cohésions apparentes calculées avec celles mesurées. Il est à noter que les cohésions calculées à partir des contraintes de la succion sont d'un ordre de grandeur

supérieur à celles calculées à partir des contraintes capillaires. Cependant, on peut noter que les cohésions calculées à partir des contraintes de la succion sont très proches des valeurs mesurées correspondant aux résistances résiduelles au cisaillement. De plus, les cohésions calculées à partir des contraintes de la succion montrent une légère baisse lorsque la succion totale augmente de 10 MPa à 38 MPa, ce qui est cohérent avec la tendance des données mesurées.

5 Conclusions

Les conclusions suivantes peuvent être tirées de cette étude:

- Sous chargement triaxiale, au niveau de contrainte donné, les spécimens surconsolidés peuvent présenter un comportement volumétrique différent en fonction du trajet de contrainte.
- Cinq modes d'orientation conceptuelle des particules d'argile sont proposés. L'activation de ces modes d'orientation dépend fortement de l'historique des contraintes de l'argile remaniée.
- Les caractéristiques de forme et d'orientation des pores diffèrent entre les échantillons contractant et les échantillons dilatant.
- Les microfissures dans un échantillon dilatant semblent plus ouvertes et permettent de se propager, ce qui constitue le mécanisme local de base de la dilatance.
- À fortes succions totales, la contrainte déviatorique de l'argile remaniée augmente tout d'abord jusqu'à un pic puis diminue légèrement jusqu'à une certaine valeur résiduelle avec l'augmentation de la déformation axiale.
- La résistance au cisaillement augmente considérablement avec l'augmentation de la contrainte moyenne. La succion totale augmente considérablement la résistance au cisaillement de l'argile remaniée, principalement en augmentant la cohésion.
- À fortes succions totales, l'argile non saturée se contracte d'abord légèrement puis se dilate de façon marquée avec une déformation axiale. En général, l'échantillon a tendance à se compresser moins au début et à se dilater davantage à la fin à une succion initiale plus élevée.
- Après chargement triaxiale, tous les échantillons d'argile non saturés présentent des ruptures fragiles sans déformations apparentes en forme de tonneau.