

# COMPORTEMENT HYDROMECHANIQUE D'UNE CRAIE MARINE ALTEREE

## HYDRO-MECHANICAL BEHAVIOUR OF A WEATHERED MARINE CHALK

Rawaz Dlawar MUHAMMED<sup>1,2,3</sup>, Jean CANOU<sup>1</sup>, Jean-Claude DUPLA<sup>1</sup>, Elisabeth PALIX<sup>4</sup>, Myriam DUC<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Université Paris-Est, Ecole des Ponts ParisTech, laboratoire Navier, Champs-sur-Marne, France

<sup>2</sup> Université Pierre et Marie Curie (UPMC), Paris, France

<sup>3</sup> Université de Koya, Koya, Irak

<sup>4</sup> EDF Energies Nouvelles, Paris, France

<sup>5</sup> IFSTTAR, Champs-sur-Marne, France

**RÉSUMÉ** – Dans cette communication, on présente le comportement hydromécanique d'une craie marine. Une série d'essais triaxiaux statiques et cycliques de type non drainé ont été réalisés, sur des éprouvettes récupérées à partir de VibroCores de 100, 300 et 500 mm de diamètre. Lors des essais de chargements cycliques non drainés, le matériau développe progressivement des surpressions positives significatives accompagnées d'une accumulation assez importante de la déformation axiale.

**ABSTRACT** – In this paper, some of the hydro-mechanical properties of a specific marine chalk are discussed. A series of undrained static and cyclic triaxial tests carried out on specimens recovered from 100, 300 and 500 mm diameter VibroCore sections. Results show that, upon undrained cyclic tests, the material presents a progressive development of significant positive excess pore water pressures and relatively high values of axial strains.

### 1. Introduction

Dans le cadre du projet "Parc éolien en mer de Fécamp", un nombre important d'éoliennes offshore seront implantées au large de Fécamp (à 15 km au nord-ouest de la ville) couvrant une surface globale de 67 km<sup>2</sup>. À cet endroit, on retrouve une craie spécifique de densité moyenne et élevée, encore peu connue, contenant des nodules de silex. Les fondations utilisées, de type embases gravitaires, seront positionnées sur la couche supérieure de la craie altérée. Ces couches supérieures subiront alors différents types de chargement. La caractérisation des premiers mètres de ce matériau altéré est un enjeu fondamental pour le projet.

L'objectif de cette communication est de présenter le comportement hydromécanique de cette craie marine afin de mieux comprendre le comportement de ce matériau sous différents types de chargements afin de fournir les données nécessaires à la conception et au dimensionnement des embases gravitaires.

### 2. Caractéristiques principales du matériau utilisé

La craie altérée est définie comme une craie de grade D selon la norme CIRIA C574 (Lord et al., 2002). Elle est principalement composée de calcite. La composition de la craie altérée peut changer d'un endroit à l'autre, selon la formation géologique et le diamètre de l'échantillon récupéré. Des nodules de craie ou de silex de différentes tailles (jusqu'à 300 mm) peuvent être trouvés dans les VibroCores récupérés. Ils sont entourés d'une matrice de craie graveleuse, marneuse ou sableuse. La figure 1 montre une vue d'un échantillon LDVC (LDVC pour un échantillon VibroCore de grand diamètre) à l'échelle macroscopique

ainsi qu'à l'échelle microscopique (images réalisées à l'aide d'un microscope électronique à balayage environnemental). Les observations montrent que les nodules de craie sont plus denses et mieux organisés par rapport à la matrice de craie qui semble être plus lâche et assez désagrégée.

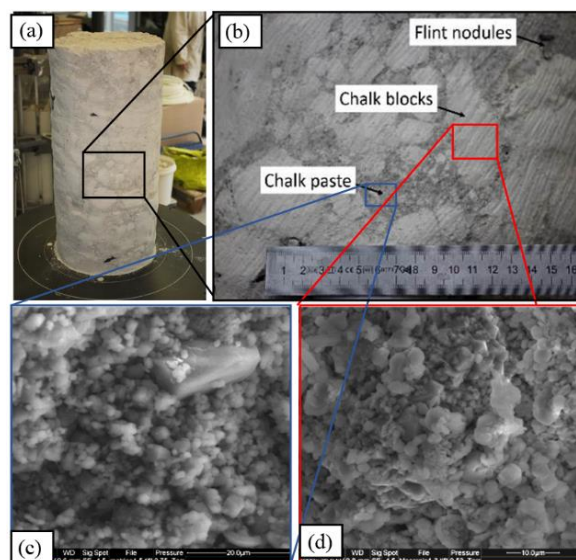


Figure 1. Vue d'un échantillon de LDVC - Craie sénonienne : (a) après la découpe manuelle ; (b) zoom général ; (c) matrice de craie (Mag 5000x) ; (d) nodule de craie (Mag 5000x).

Dans certains cas, la proportion de blocs (de craie ou de silex) dont le diamètre est supérieur à 100 mm peut dépasser 30 à 40 % de la masse totale des échantillons. La teneur en eau de la craie altérée est d'environ 20 % en moyenne. Le tableau 1 donne quelques propriétés d'indice de la craie altérée.

Tableau 1. Quelques caractéristiques de la craie marine de Fécamp (Palix et al., 2017)

	W	W <sub>L</sub>	I <sub>P</sub>	$\rho$	$\rho_d$
	Teneur en eau	Limite de liquidité	Indice de plasticité	Densité apparente	Densité sèche
	(%)	(%)	(%)	(Mg/m <sup>3</sup> )	(Mg/m <sup>3</sup> )
Min	12.0	22	5	1.81	1.53
Max	25.9	32	11	2.29	2.04
Moy	20.2	26	7	2.08	1.73

### 3. Dispositifs d'essai et protocoles expérimentaux

#### 3.1. Dispositifs d'essai

Deux appareils d'essais triaxiaux avancés ont été utilisés pour effectuer les essais monotones et cycliques en conditions non drainées. Le premier permet de tester des échantillons de 100 mm de diamètre et le second permet de tester des échantillons de 300 mm de diamètre. La figure 2 présente une vue générale des deux dispositifs utilisés ainsi que leur système d'acquisition de données. Pour l'appareil triaxial de 100 mm, la force axiale est appliquée à l'aide d'une presse électromécanique d'une capacité de 50 kN (TriScan). Un capteur de force interne (submersible) de 50 kN est utilisé pour mesurer la charge axiale. En ce qui concerne l'appareil triaxial de grande taille (300 mm), la force axiale est appliquée à travers un vérin servohydraulique d'une capacité de 500 kN, équipé d'un capteur de force interne de précision de même capacité. Pour les deux dispositifs, la mesure

de déformation axiale de l'échantillon est réalisée à l'aide de capteurs de déplacement type LVDT.

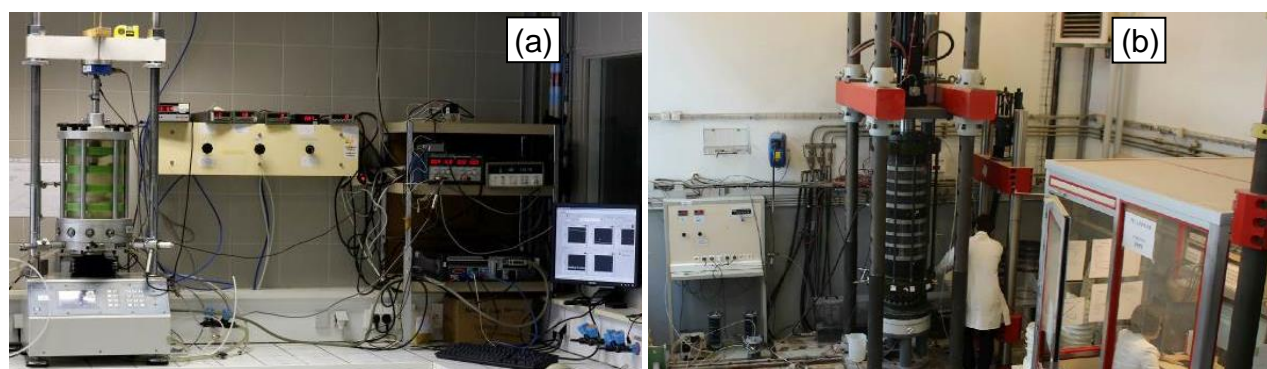


Figure 2. Dispositifs d'essai : (a) dispositif d'essai triaxial ( $\varnothing$  100 mm); (b) dispositif d'essai triaxial servohydraulique de grande taille ( $\varnothing$  300 mm)

### 3.2. Protocoles expérimentaux

#### 3.2.1. Prélèvement d'échantillons de craie

Différentes techniques de prélèvement (forage ou VibroCore) ont été utilisées pour récupérer des échantillons de craie *in situ*. Le carottage rotatif conventionnel (Geobor-S) a été combiné, quand cela était nécessaire avec le *push-in sampling* et les VibroCores de 100 mm. Dans cet article, des VibroCores de 100 mm de diamètre, appelés VC, des VibroCores de grand diamètre de 300 mm, appelés LDVC et des très grands VibroCores de 500 mm, nommés XLVC, ont été utilisés pour réaliser les essais triaxiaux. Plus de détails sur les techniques de récupération d'échantillons sont donnés par Palix et al. (2017).

#### 3.2.2. Préparation des échantillons et protocole d'essai

Nous avons adopté une procédure spécifique pour la préparation des éprouvettes. Pour les VCs et les LDVCs, les échantillons ont été récupérés directement à partir des sous-sections fournies par notre partenaire EDF-EN. Une découpe précise de la section a été nécessaire pour amener l'échantillon à la longueur prédéfinie (200 mm pour les VCs et 600 mm pour les LDVCs) (figures 3(a) et 3(b)). Pour les XLVCs, un protocole spécifique a été développé permettant de tailler et de conditionner des éprouvettes de craie cylindriques de 300 mm de diamètre et 600 mm de hauteur à partir de tronçons de carottes de 470 mm de diamètre et 600 mm de hauteur. Une découpe de l'éprouvette est réalisée en trois passes successives d'environ 20 cm de hauteur chacune, depuis le haut vers le bas du tronçon de la carotte. Cette opération est réalisée manuellement à l'aide de différentes scies à main, couteaux et spatules. Un processus de séchage contrôlé de la craie a été initié avant de procéder à la découpe manuelle.

Le processus de découpe est très délicat et prend du temps en raison de la présence d'une quantité importante de nodules de silex incorporés dans le matériau calcaire. Lorsqu'un nodule de silex est rencontré lors de la découpe, il est progressivement dégagé sur toute sa périphérie puis sectionné à l'aide de la disqueuse-meuleuse équipée d'un disque diamanté. En revanche, les observations visuelles montrent que la découpe manuelle peut donner des échantillons de meilleure qualité, par rapport aux spécimens VCs ou LDVCs. En effet, lors de la découpe manuelle, la zone perturbée par les vibrations de faible amplitude et par le mouvement du tube (quelques millimètres adjacents à la paroi du tube) est éliminée. La figure 3 montre différentes étapes impliquées dans la procédure de préparation des échantillons pour la cellule triaxiale.

Après le processus de découpe, l'échantillon est transporté avec son embase. L'ensemble est positionné sur la base de la cellule triaxiale. La membrane de confinement

en néoprène est alors ajustée sur l'éprouvette à l'aide d'un tendeur de membrane et on procède ensuite aux phases ultérieures de conditionnement de l'éprouvette (saturation, consolidation, application de la contre-pression) en vue de la réalisation de l'essai de cisaillement.

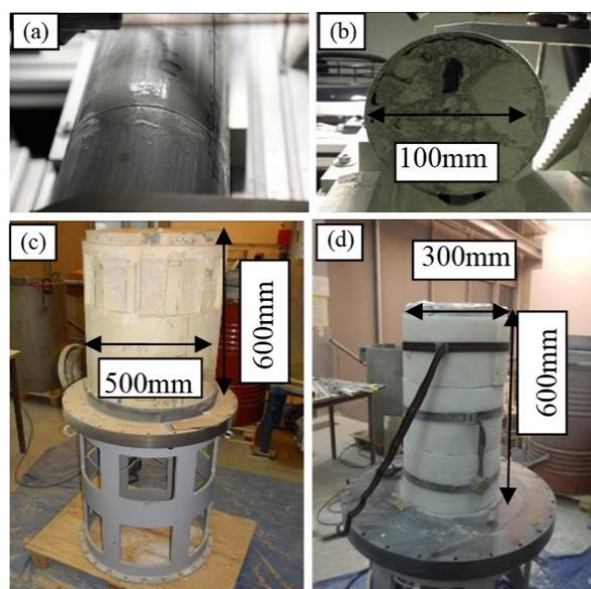


Figure 3. Préparation des échantillons : (a) découpage de la section d'un VC à la scie à fil – 100 mm de diamètre ; (b) vue de la section d'un VC après le découpe ; (c) Un XLVC durant le découpage manuel – 470 mm de diamètre; (d) vue de XLVC après la découpe – 300 mm de diamètre.

Pour la phase de saturation, l'échantillon a été saturé dans la cellule triaxiale en utilisant de l'eau salée désaérée (25 g/l) après une consolidation initiale à 50 kPa. Le coefficient de perméabilité de l'échantillon est ensuite mesuré selon la norme française NF P 94-512-11. Une contre-pression, pouvant aller jusqu'à 400 kPa dans certains cas, a été appliquée dans l'échantillon afin d'améliorer la saturation. Une saturation complète a été supposée lorsque le coefficient de Skempton  $B$  mesuré était supérieur à 0,90. Après la saturation, les éprouvettes de sol ont été consolidées à la pression de confinement finale et les essais triaxiaux ont été réalisés conformément aux normes françaises NF P 94-070 et NF P 94-074 (essai à l'appareil triaxial).

## 4. Comportement hydromécanique de la craie altérée

### 4.1. Réponse non-drainée sous cisaillement statique (CU+u)

Le comportement non drainé de la craie a été étudié à partir des essais triaxiaux de type consolidé non drainé avec mesure de la surpression interstitielle. Un nombre important d'essais statiques a été réalisé sous différents niveaux de contrainte de consolidation correspondant soit aux conditions *in situ*, soit aux conditions après l'installation de l'embase gravitaire (GBS). Différents diamètres d'éprouvettes ont également été utilisés.

La figure 4 montre l'évolution du déviateur normalisé et de la surpression interstitielle normalisée en fonction de la déformation axiale pour différents diamètres d'échantillons. Nous pouvons constater une grande dispersion des résultats, probablement due à l'hétérogénéité de la craie altérée.

Cependant, une bonne cohérence peut être observée entre les différents essais effectués sur des échantillons de diamètre 100 mm et 300 mm. Le matériau présente essentiellement un comportement dilatant (après une phase initiale de contractance) et



gène généralement des surpressions interstitielles négatives au cours du cisaillement (plus ou moins prononcées selon le type d'échantillons).

Le comportement dilatant du matériau entraîne, dans certains cas, des valeurs de déviateur de contrainte assez élevées puisque la résistance au cisaillement continue d'augmenter avec la diminution de la surpression interstitielle, classiquement observée dans les sols dilatants. Dans certains cas, une stabilisation progressive de la surpression interstitielle est observée à de grandes déformations. Cela est probablement lié à la localisation et à la formation des bandes de cisaillement (visible sur la figure 5), ce qui entraîne également une stabilisation du déviateur de contrainte. Cette stabilisation peut être également liée à la présence de nodules de silex dans les échantillons.

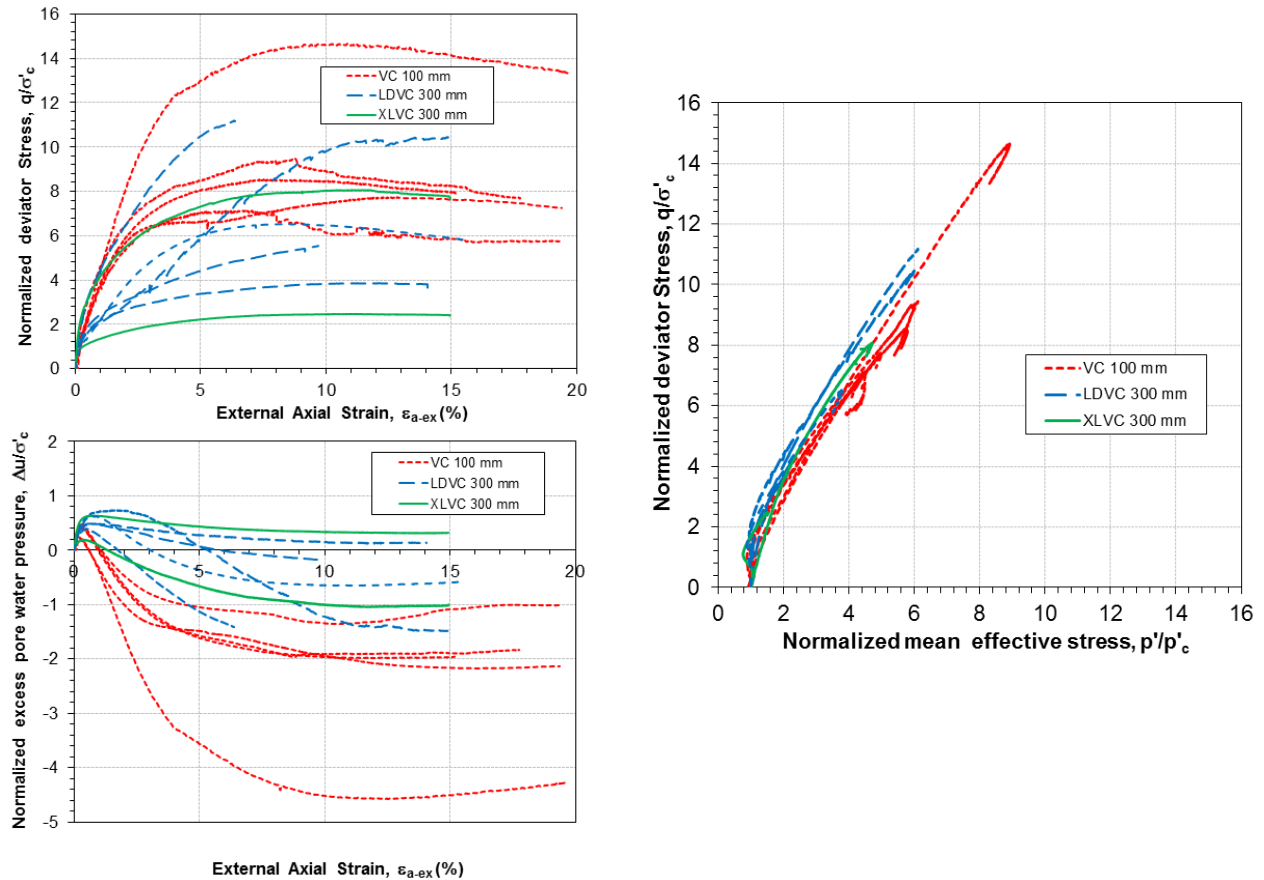


Figure 4. Résultats des essais CU+u statique : (a) évolution du déviateur des contraintes ; (b) évolution des surpressions interstitielles ; (c) chemins des contraintes effectives

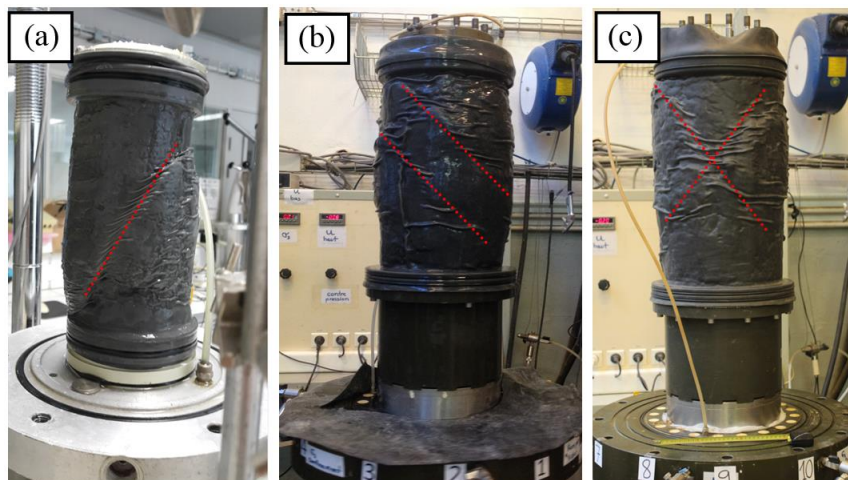


Figure 5. Vue des éprouvettes après l'essai de cisaillement statique : (a) VC (Ø 100 mm) ; (b) LDVC (Ø 300 mm) ; (c) XLVC (Ø 300 mm)

Si on compare les réponses obtenues à partir des différents types d'échantillons, on peut observer que les valeurs enregistrées pour les échantillons type VC 100 mm, dans le plan déviateur-déformation, se situent dans la partie supérieure de la plage des données par rapport aux réponses des LDVCs ou XLVCs. Ceci peut être attribué au comportement dilatant du matériau qui semble être plus prononcé dans le cas des échantillons VC 100 mm. Cela pourrait provenir du fait que ces échantillons ont été davantage influencés par les vibrations du fait de leur diamètre plus faible.

En ce qui concerne le chemin des contraintes effectives, on peut observer une bonne cohérence entre la forme des chemins de contraintes effectives et les valeurs d'angle de frottement interne. Tous les essais suivent à peu près une ligne d'état critique cohérente (CSL). La variation correspondante des angles de frottement est limitée à quelques degrés et la cohésion apparente est assez limitée. Le CSL est atteint après quelques pour cent de déformation axiale. L'augmentation du déviateur de contrainte à la rupture est liée au comportement dilatant de l'échantillon.

#### 4.2. Réponse non-drainée sous cisaillement cyclique

Plusieurs essais cycliques avancés sont réalisés sur des éprouvettes de 300 mm de diamètre (LDVC et XLVC). Ils ont pour objectif de mieux comprendre le comportement de la craie sous différentes conditions et charges cycliques. Nous pouvons constater, sur tous les essais réalisés, que le matériau développe progressivement des surpressions interstitielles positives assez importantes, sous chargement cyclique non drainé. Dans certains cas, cette accumulation peut atteindre des valeurs proches de la contrainte de consolidation effective. Cependant, les échantillons ne présentent pas des valeurs de déformation axiale élevées correspondant à un ramollissement important du matériau dû à l'accumulation des surpressions. Pour les valeurs élevées à très élevées du déviateur cyclique, une accumulation relativement élevée des déformations axiales peut être observées (supérieure à 5 à 6 %), mais sans initiation de phénomène de type liquéfaction.

Les résultats montrent également que l'augmentation de la surpression interstitielle et de la déformation axiale avec le nombre de cycles était significativement moins importante si un drainage est réalisé entre deux séquences cycliques (dissipation de la surpression interstitielle).

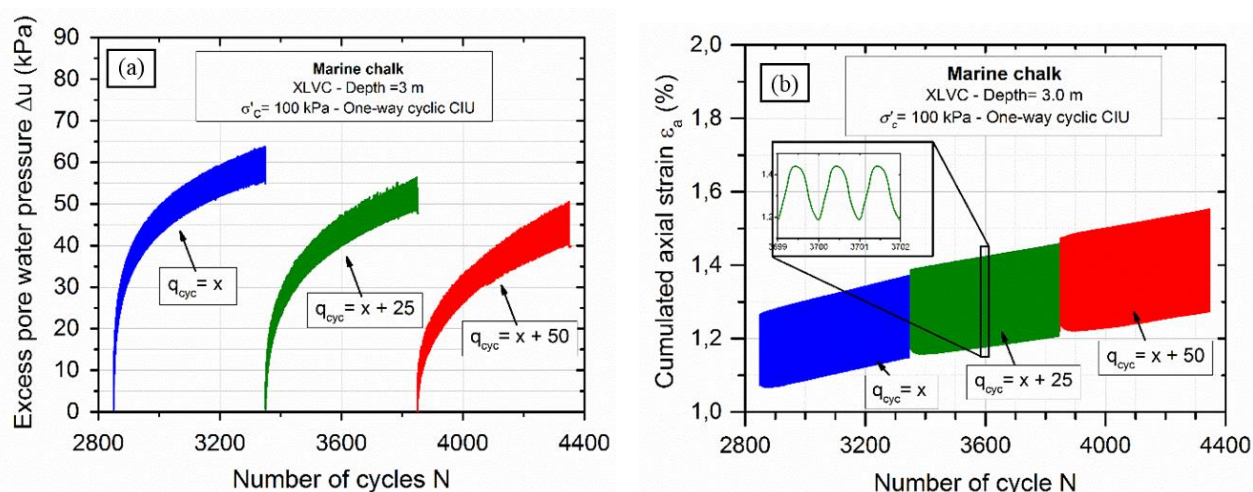


Figure 6. Réponse non drainée sous chargement cyclique : (a) évolution des surpressions interstitielles ; (b) évolution de la déformation axiale

La figure 6 présente l'évolution de la déformation axiale et de la surpression interstitielle au cours des trois dernières séquences consécutives de 500 cycles effectués dans une cellule triaxiale de 300 mm. Le drainage était autorisé entre les séquences de cycles. Malgré

le fait que le déviateur des contraintes appliqué était chaque fois augmenté de 25 kPa, on a remarqué que le taux d'augmentation de la surpression interstitielle, après un drainage, était moins important que pour la séquence précédente.

Ces résultats montrent que la dissipation des surpressions interstitielles lors de l'étape de drainage peut entraîner une densification du matériau et améliorer la résistance du sol au chargement cyclique.

En ce qui concerne le type de chargement cyclique, nous avons observé que l'augmentation de la déformation axiale était beaucoup plus prononcée dans les essais cycliques alternés.

## 4.2. Réponse statique post-cyclique

Des essais statiques post-cycliques ont été effectués afin d'évaluer la réponse post-cyclique de la craie altérée. Ces essais ont été réalisés uniquement lorsque les déformations axiales finales, après chargement cyclique, étaient inférieures à 7,5%. La dissipation complète de la surpression interstitielle, générée pendant le chargement cyclique, est permise avant chaque essai post-cyclique. La figure 7 montre les résultats des essais de cisaillements statiques non drainés pour XLVCs et LDVC effectués sur un échantillon donné avec l'essai statique post-cyclique correspondant effectué sur l'un échantillon venant de la même carotte avec les mêmes conditions initiales, mais à la profondeur attenante.

Une nette tendance de renforcement est observée. En effet, la réponse statique obtenue pour les essais post-cycliques est beaucoup plus dilatante et beaucoup plus rigide par rapport à la réponse initiale pour tous les échantillons. Cela entraîne des valeurs relativement plus élevées de la résistance au cisaillement non drainé pour un niveau de déformation donné. En effet, le fort durcissement cyclique induit par les cycles et la dissipation complète des surpressions interstitielles conduit à une densification du matériau. Cette densification résultera, lors d'un cisaillement statique post-cyclique, en une réponse plus dilatante conduisant à des valeurs plus élevées de résistance au cisaillement non drainé.

Dans le plan  $q$ - $p'$ , on observe que le critère de rupture est atteint pour une valeur de déviateur de contrainte plus élevée, ce qui confirme l'effet bénéfique du préchargement cyclique.

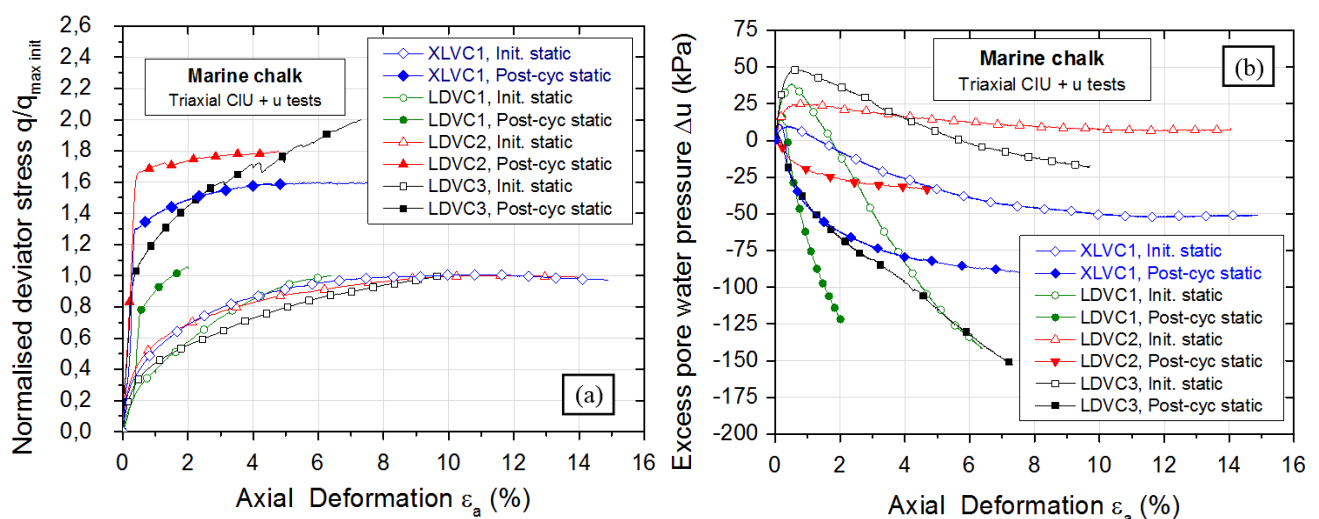


Figure 7. Effet du chargement cyclique sur le comportement statique post-cyclique : (a) déviateur des contraintes normalisées ; (b) évolution des surpressions interstitielles

Afin de quantifier l'influence des cycles et de la dissipation des surpressions interstitielles sur la perméabilité du matériau, une mesure de perméabilité a été également réalisée sur

chaque échantillon juste avant l'essai statique post-cyclique. Dans la plupart des cas, une diminution significative de la perméabilité a été observée probablement due à la densification du matériau, au colmatage des fissures ou des chemins d'écoulement préexistants pendant le chargement cyclique et à la dissipation de la surpression interstitielle après l'application des cycles (reconsolidation).

## 5. Conclusions

Un ensemble d'essais triaxiaux a été réalisé sur la craie marine de Fecamp en utilisant des échantillons de diamètres et de tailles différents (100x200 et 300x600 mm) pour étudier le comportement hydromécanique de ce matériau spécifique. On peut en déduire les conclusions suivantes :

- En raison de l'hétérogénéité du matériau, les résultats d'essais obtenus sur la craie altérée peuvent varier en fonction du type d'échantillon et de son emplacement.
- Une bonne cohérence peut être observée entre les différents essais réalisés sur des éprouvettes de diamètre 100mm et 300mm dans le sens où le matériau présente essentiellement un comportement dilatant (après une phase initiale de contraction) et génère des surpressions interstitielles négatives pendant le cisaillement non drainé. La comparaison entre les résultats des échantillons de 100 et 300 mm de diamètre a permis d'avoir plus de confiance dans l'utilisation des données obtenues sur les VCs de 100 mm de diamètre et d'obtenir une base de données complémentaire aux essais de cisaillement sur le site.
- Durant les essais de chargement cyclique non drainé, le matériau accumule des surpressions interstitielles positives assez importantes, mais sans l'accumulation des déformations axiales élevées.
- Durant les essais statiques post-cycliques, des valeurs plus élevées de résistance au cisaillement non drainé sont atteintes (pour un niveau de déformation donné) par rapport à la capacité statique initiale. Ceci est dû à l'effet de la densification du matériau après la dissipation complète des surpressions interstitielles et à la reconsolidation du matériau.

## 6. Références bibliographiques

- Lord J. A., Clayton C. R. I. & Mortimore R. N. (2002). CIRIA C574, Engineering in Chalk. Published by CIRIA.
- NF P 94-074 (1994). Essais à l'appareil triaxial de révolution.
- NF P94-070 (1994). Sols : reconnaissance et essais - Essais à l'appareil triaxial de révolution - généralités - définitions, 21 p.
- NF P94-512-11, 26 (2005). Reconnaissance et essais géotechniques. Essai de laboratoire sur les sols. Partie 11 : Détermination de la perméabilité à charge constante et à charge variable décroissante.
- Palix E., Souviat B. & Muhammed R. D. (2017). Effect of sampling on behaviour of weathered Chalk with flints, Offshore Site Investigation & Geotechnics Committee 8th International Conference, 12-14 September 2017, London.