

ETUDE EN CHAMBRE D'ÉTALONNAGE DU FROTTEMENT SOL-PIEU DANS UNE ARGILE SATURÉE SOUS GRAND NOMBRE DE CYCLES

STUDY IN A CALIBRATION CHAMBER OF SOIL-PILE SHAFT FRICTION IN A SATURATED CLAY FOR LARGE NUMBERS OF CYCLES

Rawaz Dlawar MUHAMMED¹, Jean CANOU¹, Jean-Claude DUPLA¹, Hocine DELMI¹
¹ Ecole des ponts ParisTech, laboratoire Navier, Champs-sur-Marne, France

RÉSUMÉ – On étudie l'évolution, sous grands nombres de cycles (10^5 cycles) du frottement local sol-pieu mesuré sur une sonde-pieu mise en œuvre dans des massifs d'argile saturée reconstitués en chambre d'étalonnage. Après une description du dispositif expérimental et du protocole d'essai, on décrit un essai typique en mettant en évidence une phase de dégradation initiale du frottement suivie par une phase de renforcement.

ABSTRACT – The evolution, for high numbers of cycles (10^5 cycles), of local soil-pile shaft friction, as measured on an instrumented pile-probe tested in saturated clay specimens reconstituted in a calibration chamber, is studied. After describing the experimental setup and testing protocol, a typical test is described, showing an initial phase of local friction degradation followed by a phase of friction reinforcement.

1. Introduction

L'étude du frottement local pieu-sol constitue une problématique importante en géotechnique reliée à l'amélioration du calcul et du dimensionnement des pieux. Dans le cas des chargements cycliques, en particulier, le comportement au frottement est particulièrement complexe et nécessite encore des travaux de recherche, au plan théorique et expérimental.

En ce qui concerne la recherche expérimentale, l'approche du type modélisation physique basée sur l'utilisation des chambres d'étalonnage est intéressante en vue de mieux comprendre, dans des conditions de laboratoire bien contrôlées, les mécanismes de mobilisation du frottement local le long d'une interface sol-inclusion sous sollicitations axiales cycliques. Depuis le début des années 80, la recherche expérimentale s'est développée dans ce domaine, souvent en relation avec l'industrie pétrolière offshore et un nombre significatif de résultats/recherches, du type « modélisation physique » ont été présentés, basés sur l'utilisation de différents types de sondes mises en œuvre dans différents types de massifs. A la fois le cas des sables et des argiles a été abordé mais, de manière générale, pour des nombres de cycles relativement faibles (inférieurs à 10000). Dans le cas des argiles en particulier, on pourra se référer aux travaux de Poulos (1981), Matlock et al. (1982), Goulois et al. (1987) ou Procter and Khaffaf (1987).

En ce qui concerne les grands nombres de cycles (10^5 et plus) correspondant au comportement de type fatigue, il y a très peu de travaux publiés. Dans le cas des sables, on peut citer les travaux de Bekki et al. (2013) qui présentent des résultats concernant l'évolution du frottement local le long d'une sonde-pieu instrumentée mise en œuvre en chambre d'étalonnage dans un massif de sable confiné, pour des grands nombres de cycles à déplacement imposé (10^5 cycles). Les résultats obtenus permettent de mettre en évidence, après une phase initiale de dégradation du frottement, une phase de renforcement du frottement mobilisable, jusqu'aux très grands nombres de cycles. Dans

le cas des sols fins cependant (typiquement argiles saturées), on n'a rien trouvé d'équivalent dans la littérature.



Figure 1. Vue d'ensemble du dispositif d'essai en chambre d'étalonnage

Dans ce contexte, l'objectif de cette communication est de présenter un dispositif d'essai prototype et un protocole expérimental spécifique permettant d'étudier l'évolution du frottement d'interface sol-pieu dans le cas d'argiles saturées et pour de très grands nombres de cycles. Cette recherche a été développée dans le cadre du projet de recherche SOLCYP (projet ANR et volet PN, 2008-2015) consacré à l'amélioration des méthodes de calcul et de dimensionnement des pieux soumis à des sollicitations cycliques. Après une description du dispositif expérimental et du protocole d'essai développé, on présente les résultats d'un essai de chargement cyclique typique à grand nombre de cycles.

2. Dispositif expérimental et protocole d'essai

La chambre d'étalonnage permet de reconstituer et de mettre sous contrainte des massifs de sable ou d'argile cylindriques de 524 mm de diamètre et 700 mm de hauteur. Le massif vient en appui sur un piston de grand diamètre et il est contenu (latéralement) dans une membrane en néoprène. On peut appliquer au massif un état de contrainte horizontal et vertical de manière indépendante. La chambre d'étalonnage est fixée sur un support mobile en translation et en rotation sur des rails, ce qui permet, après reconstitution des massifs, de venir la positionner sous le bâti de chargement à quatre colonnes. La figure 1 montre une vue d'ensemble du dispositif, y compris la cabine de pilotage et d'acquisition des données.

Afin de reconstituer les massifs d'argile saturée, un consolidomètre prototype a été développé, permettant de préconsolider un massif d'argile à partir d'une boue préparée à une teneur en eau initiale élevée. Le consolidomètre est équipé d'un vérin de chargement qui permet d'appliquer progressivement, par paliers, la charge vertical désirée. La tige du vérin est équipée d'un capteur d'effort ainsi que d'un capteur de déplacement à fil qui permet d'enregistrer en fonction du temps le tassement du massif qui se développe au cours du phénomène de consolidation. Le dispositif est équipé d'un système de drainage vertical ainsi que d'un système de drainage radial qui peut être ou non activé.

La figure 2 présente une vue d'ensemble du dispositif de consolidation des massifs d'argile. Après la fin de la consolidation du massif, celui-ci est démoulé et ajusté sur le piston de la chambre d'étalonnage puis remis sous contrainte grâce aux systèmes de pressurisation horizontal et vertical du dispositif. On peut ensuite procéder à l'installation et au chargement de la sonde-pieu.

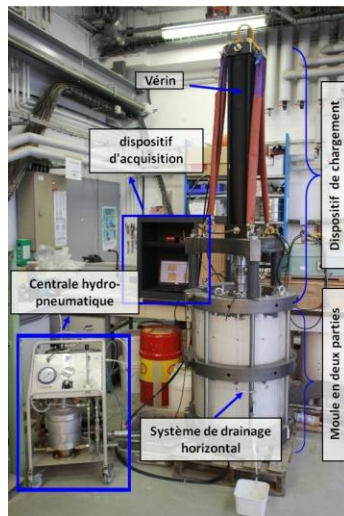


Figure 2. Vue d'ensemble du dispositif de consolidation des massifs d'argile

La sonde-pieu utilisée est une sonde prototype permettant de mesurer de manière indépendante une résistance en pointe mesurée sur une pointe conique instrumentée et un frottement latéral unitaire, mesuré sur un manchon de frottement lui aussi instrumenté. Les deux mesures sont indépendantes, le manchon de frottement étant situé suffisamment loin de la pointe pour s'affranchir des effets parasites correspondants. La sonde a été conçue sur un standard pénétrométrique avec une section droite de 10 cm^2 (diamètre de 36 mm). La pointe conique est équipée d'un capteur d'effort de 20 kN de capacité. Le manchon de frottement a une longueur de 11 cm et une surface frottante de $124,4 \text{ cm}^2$. Il est équipé avec un capteur d'effort de $\pm 5 \text{ kN}$. La surface du manchon de frottement ainsi que la surface d'une partie importante du corps de la sonde présentent une rugosité contrôlée obtenue par usinage (surface parfaitement rugueuse). La figure 3 présente une coupe simplifiée ainsi qu'une vue de la sonde utilisée.

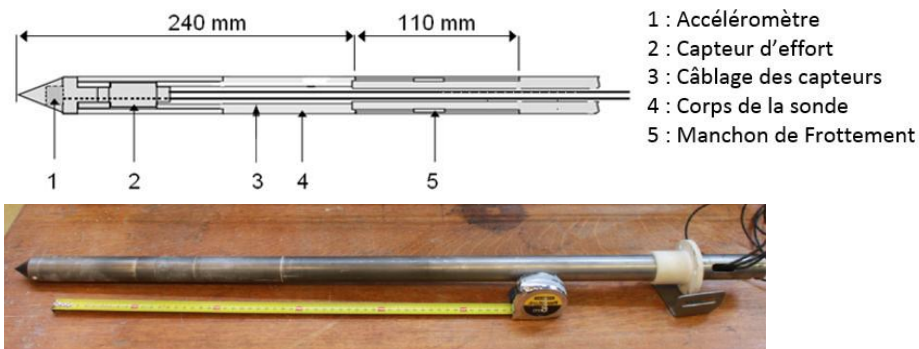


Figure 3. Coupe simplifiée et vue d'ensemble de la sonde-pieu utilisée

3. Description et analyse d'un essai typique

On présente et on analyse dans la suite les résultats d'un essai typique réalisé à partir du dispositif décrit ci-dessus.

3.1. Argile utilisée

Le sol mis en œuvre est une kaolinite spécifique, la Speswhite. C'est une argile de référence en France pour la géotechnique, utilisée, en particulier, pour reconstituer des massifs de sol testés ensuite en centrifugeuse ou en chambre d'étalonnage. Cette argile a une limite de plasticité de 28 et une limite de liquidité de 58 (indice de plasticité de 30).

3.2. Caractéristiques du massif mis en œuvre

Pour cet essai, le massif d'argile a été consolidé jusqu'à une valeur de la contrainte verticale effective σ'_{v0} de 125 kPa et une contrainte horizontale effective de 72 kPa, correspondant à une valeur estimée du coefficient des terres au repos de 0,58. Dans le consolidomètre, la consolidation du massif a été faite en quatre paliers, correspondant à des contraintes appliquées successives de 5, 15, 45 et 125 kPa.

3.3. Installation de la sonde-pieu

On procède dans un premier temps à l'insertion de la sonde-pieu par vérinage quasi-statique à l'aide d'un vérin hydraulique de longue course qui permet d'enfoncer la sonde à vitesse constante dans le massif d'argile. Ce mode d'installation est représentatif d'un pieu du type refoulant. La vitesse d'enfoncement est de 1 mm/s. La sonde est enfoncée dans le massif jusqu'à ce que le manchon de frottement soit centré verticalement dans le massif. La figure 4 présente les résultats de la phase d'installation de la sonde en termes de la résistance de pointe et du frottement sur le manchon en fonction de l'enfoncement de la sonde. Après une augmentation rapide, la résistance de pointe se stabilise assez rapidement après un enfoncement de l'ordre de 100 mm, rendant compte d'une bonne homogénéité du massif. Le frottement latéral commence à être mobilisé lorsque le manchon rentre dans le massif, pour un enfoncement de l'ordre de 240 mm de la pointe. Le frottement augmente ensuite progressivement jusqu'à atteindre une valeur presque stabilisée de l'ordre de 10 kPa pour l'enfoncement final de 460 mm.

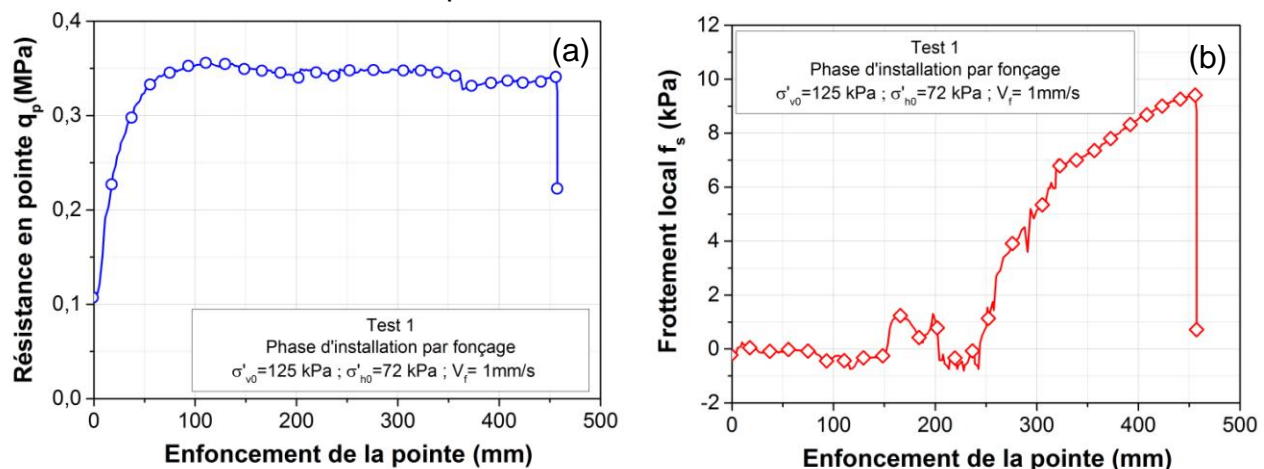


Figure 4. Phase d'installation de la sonde : (a) résistance de pointe ; (b) frottement local

3.4 Phases initiales de chargement statique

Après installation de la sonde, on laisse l'ensemble au repos pendant une période de 12 heures. Ensuite deux chargements monotones quasi-statiques sont réalisés à déplacement contrôlé, à l'aide du servovérin, jusqu'à rupture (4 mm de déplacement correspondant à environ 11% du diamètre de la sonde). Le premier chargement est réalisé à une vitesse de 30 microns par minute, le deuxième étant réalisé à une vitesse de 300 microns par minute, après avoir attendu 2 heures après le premier chargement. La figure 5 montre les résultats correspondants. En termes de résistance de pointe, la mobilisation initiale observée au deuxième chargement est plus rapide que pour le premier (rigidité supérieure). Par contre, les valeurs de plateau atteintes sont pratiquement les mêmes.

En termes de frottement local, la mobilisation est très rapide pour les deux chargements jusqu'à un plateau bien marqué de l'ordre de 17 kPa dans les deux cas, avec un léger pic

initial observé au deuxième chargement. Il est intéressant de noter que les valeurs de rupture obtenues sont très proches pour les deux chargements, le premier chargement n'ayant donc pas trop d'influence sur les mesures réalisées au deuxième chargement.

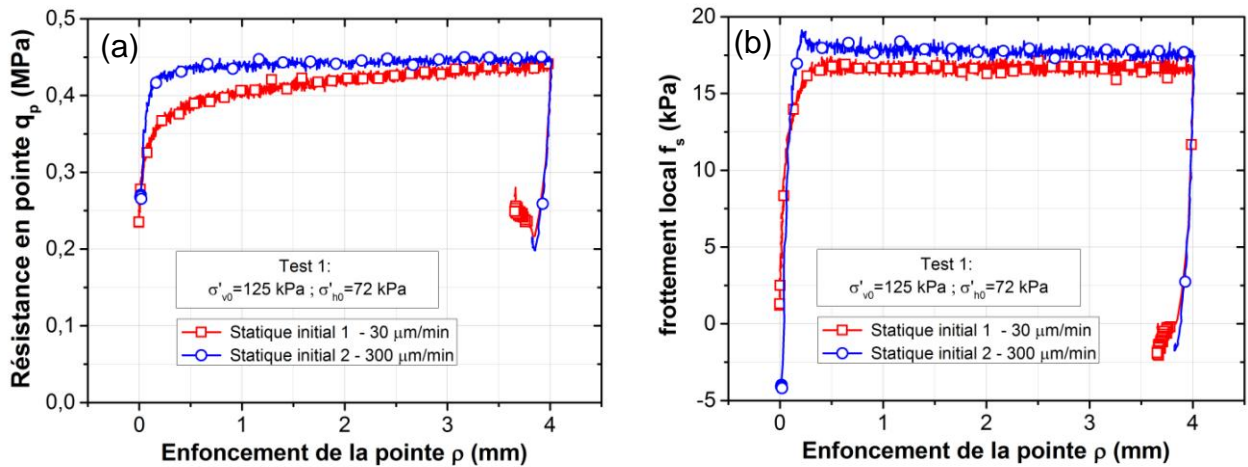


Figure 5. Chargements statiques initiaux : mobilisation de la résistance de pointe (a) et du frottement latéral (b)

3.5 Phase de chargement cyclique

Pour étudier l'influence de l'application de grands nombres de cycles sur la mobilisation du frottement local, on réalise des essais de chargement à déplacement contrôlé, ce qui permet d'évaluer l'évolution du frottement mobilisable au cours des cycles. Les principaux paramètres du chargement cyclique sont l'amplitude du déplacement cyclique (signal alterné ou non alterné), la fréquence des cycles, la forme du signal et le nombre de cycles appliqués. Dans l'essai présenté ci-dessous, on a réalisé 10^5 cycles, avec une amplitude de déplacement cyclique ρ_c égale à ± 250 microns (chargement alterné) et une fréquence de 1 Hz. La forme du signal est sinusoïdale.

La figure 6 présente les résultats obtenus en termes de sollicitation appliquée en déplacement, d'effort mesuré en tête de la sonde, de résistance en pointe et de frottement local en fonction du nombre de cycles appliqués. La sonde est par ailleurs considérée comme parfaitement rigide, le déplacement en tête étant supposé être le même qu'en tout point de la sonde. En terme de frottement local mobilisé, la figure 6-b permet de mettre en évidence une dégradation claire qui démarre dès le premier cycle de chargement jusqu'à environ cinquante cycles (ramollissement cyclique). Ensuite, le frottement mobilisable ré-augmente progressivement (durcissement cyclique) jusqu'à la fin de l'essai, au bout des 10^5 cycles, avec une légère rediminution relative entre les cycles 300 et 1000 environ. Le phénomène de dégradation initial est relativement classique et a déjà été décrit dans la littérature à la fois sur des essais sur modèle et des essais sur site (Chan and Hana, 1980 ; Poulos, 1981 ; Poulos, 1982, Matlock et al., 1982). La phase de renforcement observée ensuite est, par contre, moins commune et n'a, à notre connaissance, pas été décrite, si ce n'est dans le cas de sables secs (Bekki et al., 2013) pour de très grands nombres de cycles.

En termes de résistance de pointe, on observe une tendance analogue à celle observée pour le frottement latéral, l'évolution de la résistance mesurée en tête de la sonde étant la résultante du terme de frottement et du terme de pointe.

La figure 7 présente des cycles typiques en termes de frottement local mobilisé en fonction du déplacement imposé. La figure 7-a présente des cycles correspondant à la phase de dégradation du frottement. Une dégradation substantielle est observée entre le premier cycle et le cycle n° 50. La figure 7-b présente des cycles correspondant à la phase de renforcement qui se développe ensuite jusqu'à la fin de la séquence cyclique. Il

est intéressant de remarquer que, malgré le renforcement observé pendant cette phase, le frottement maximal mobilisable en fin de séquence reste inférieur au frottement mobilisé lors du premier cycle de chargement.

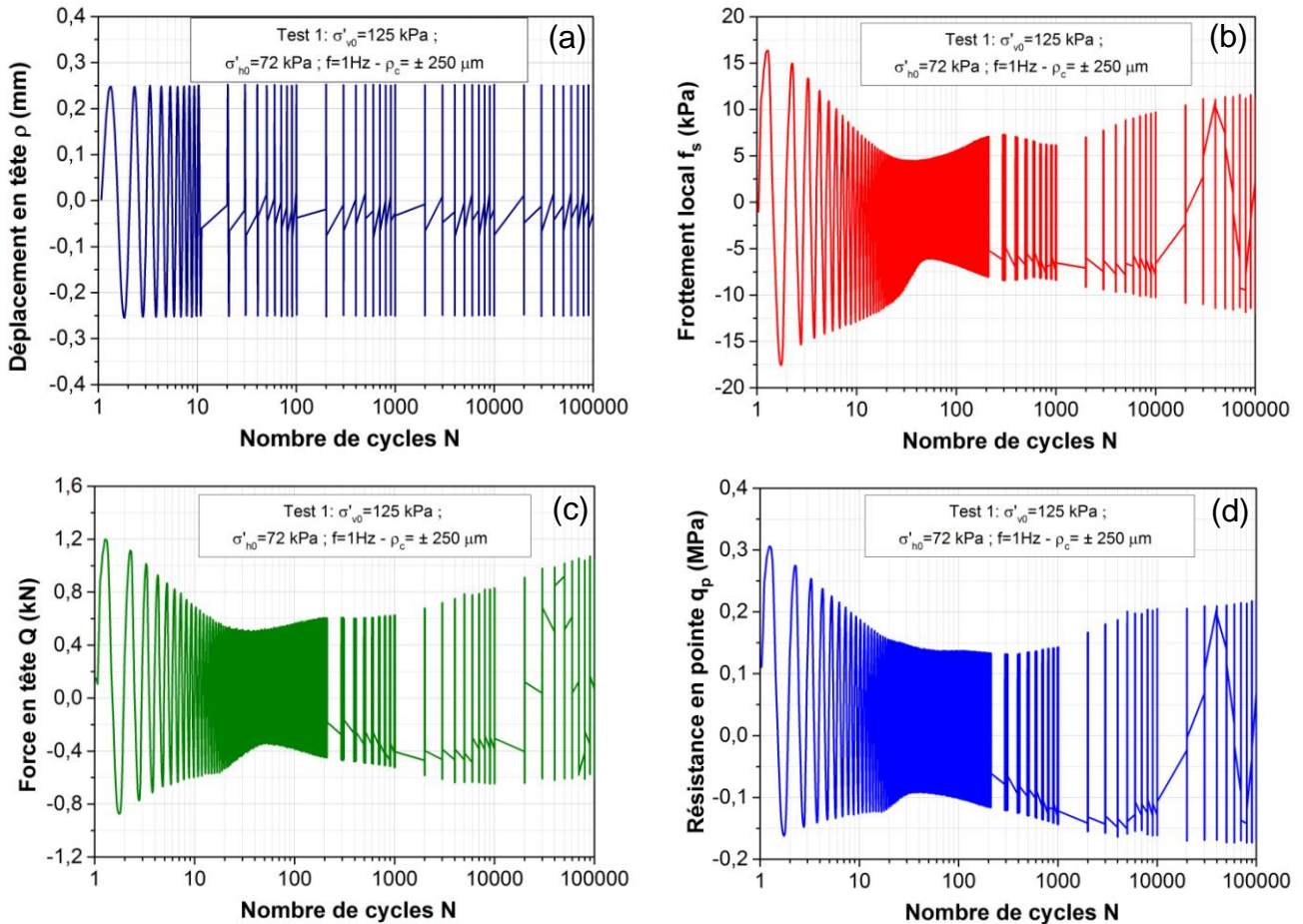


Figure 6. Phase de chargement cyclique à déplacement imposé : (a) signal de chargement ; (b) réponse en frottement local ; (c) force totale mesurée en tête ; (d) réponse en résistance de pointe

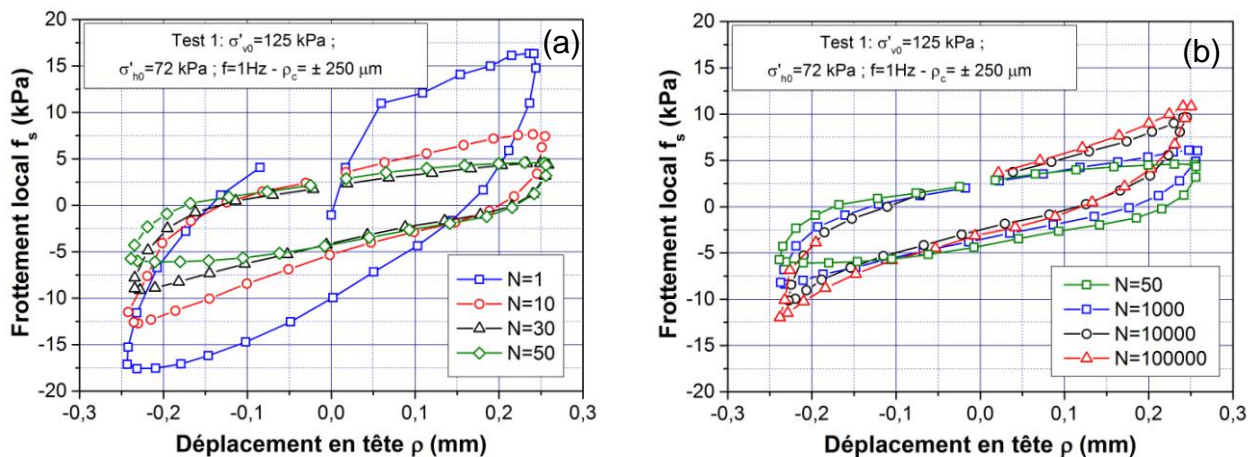


Figure 7. Cycles typiques décrits pendant la séquence cyclique : (a) phase de dégradation cyclique du frottement ; (b) phase de durcissement cyclique du frottement

3.6. Phase de chargement statique finale

Après la séquence cyclique, deux essais de chargement statique sont finalement réalisés pour évaluer l'influence de la séquence cyclique sur le frottement statique maximal

mobilisable après cycles, de manière similaire aux deux essais statiques réalisés avant la séquence cyclique. Pour l'essai présenté ici, les deux essais statiques ont été réalisés à la même vitesse de chargement de 300 microns par minute jusqu'à la rupture (4 mm de déplacement vertical). Le premier essai est réalisé tout de suite après la fin de la séquence cyclique alors que le deuxième est réalisé après une attente de deux heures après le premier. La figure 8 présente les résultats obtenus en termes de frottement local. On peut observer une différence significative entre les deux chargements (fig. 8-a). Pour le premier chargement, un pic marqué de frottement est observé (de l'ordre de 27 kPa) pour un déplacement relativement faible (de l'ordre de 800 microns) suivi par un radoucissement important avec stabilisation progressive du frottement aux grands déplacements (autour de 14 kPa). En ce qui concerne le deuxième chargement, on n'observe pas de pic de résistance mais une mobilisation très rapide (après environ 100 microns) du frottement maximum mobilisable, qui se maintient ensuite sur un plateau remarquablement constant, jusqu'aux grands déplacements. Cette deuxième réponse est qualitativement très semblable à celle observée lors des chargements statiques initiaux avant la séquence cyclique. Ceci montre que les cycles ont un effet de renforcement significatif en termes de frottement statique mobilisable au premier rechargement statique après la séquence cyclique.

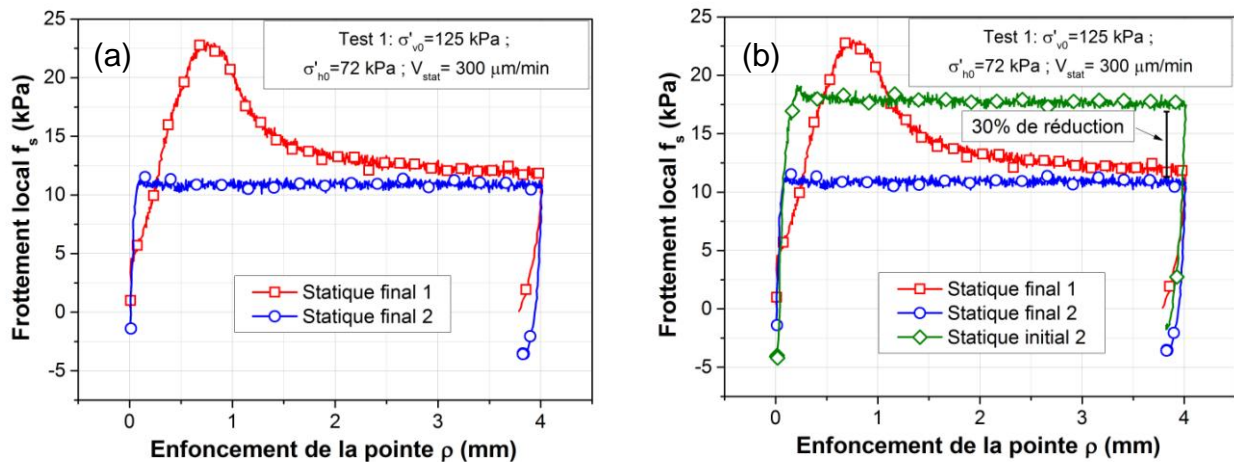


Figure 8. Mobilisation du frottement statique après cycles : (a) comparaison des deux chargements réalisés après cyclage ; (b) comparaison avec le chargement statique réalisé avant la séquence cyclique

Le deuxième chargement statique montre cependant que cet effet de renforcement est « fragile » et qu'il a disparu lors du deuxième chargement statique. La figure 8-b permet de comparer le frottement statique mobilisé lors du chargement statique avant et après la séquence cyclique.

3.7 Coefficient d'évolution du frottement

En vue de pouvoir quantifier l'évolution du frottement mobilisable lors de la séquence cyclique (dégradation ou renforcement), on introduit le coefficient d'évolution du frottement $C_{e,fs}$ de la manière suivante :

$$C_{e,fs} = \frac{f_{s,max(i)} - f_{s,min(i)}}{f_{s,max(1)} - f_{s,min(1)}} \quad (1)$$

où $f_{s,max(1)}$ et $f_{s,max(i)}$ sont les valeurs maximale du frottement mesurées au cycle 1 et i respectivement, $f_{s,min(1)}$ et $f_{s,min(i)}$ étant les valeurs minimales du frottement mesurées sur

ces mêmes cycles. Ce coefficient permet de visualiser de manière claire l'évolution de la mobilisation du frottement local au cours des cycles et de distinguer de manière simple les phases de dégradation (diminution de ce coefficient) et les phases de renforcement (augmentation du coefficient) et de quantifier, par la valeur du coefficient, l'importance de la dégradation ou du renforcement par rapport au premier cycle. La figure 9 montre les résultats obtenus pour l'essai présenté, où l'on peut clairement retrouver la phase de dégradation initiale jusqu'à une valeur minimale de l'ordre de 0,32 de ce coefficient, suivie par la phase de renforcement.

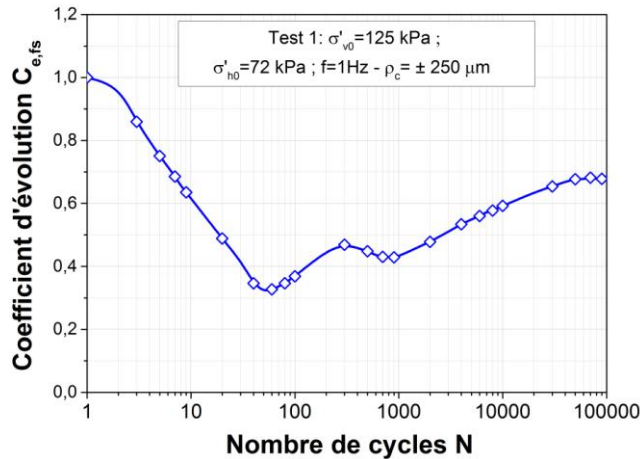


Figure 9. Coefficient d'évolution $C_{e,fs}$ fonction du nombre de cycles pour l'essai présenté

4. Conclusions

On a présenté un dispositif d'essai prototype ainsi qu'un protocole d'essai approprié pour étudier l'évolution du frottement local mobilisable le long d'une sonde-pieu pour de très grands nombres de cycles. L'essai présenté montre que l'on peut observer, après une phase initiale de dégradation du frottement, une phase de renforcement. Le protocole utilisé permet de mettre en évidence l'influence du chargement cyclique sur le frottement statique mobilisable après la séquence cyclique.

5. Références bibliographiques

- Bekki, H., Canou, J., Tali, B., Dupla, J.-C., and Bouafia, A. (2013), Evolution of Local Friction Along a Model Pile Shaft in a Calibration Chamber for a Large Number of Loading Cycles. *Comptes Rendus - Mécanique*, Vol. 341, No. 6, pp.499-507.
- Chan, S.-F. and Hanna, T.H. (1980). Repeated Loading on Single Piles in Sand. *J. Geotech. Engrg. Div.*, Vol. 106, No. 2, pp.171-188.
- Goulois, A., Whitman, R. V. and Høeg, K. (1987). Effects of Sustained Shear Stresses on the Cyclic Degradation of Clay. *NGI Publication*, Vol. 167, 16 p.
- Matlock, H., Bogard, D. and Cheang, L. (1982). A Laboratory Study of Axially Loaded Piles and Pile Groups Including Pore Pressure Measurements. *Proceeding of The Third International Conference on the Behavior of Offshore Structure (BOSS)*, Vol. 1, pp.105-121.
- Poulos, H.G. (1981). Some Aspects of Skin Friction of Piles in Clay Under Cyclic Loading. *Geotechnical Engineering*, 12 : pp. 1-17.
- Poulos, H.G. (1982). Influence of Cyclic Loading on Axial Pile Response". *University of Sydney*, 36 p.
- Procter, D.C. and Khaffaf, J.H. (1987). Cyclic axial displacement tests on model piles in clay. *Géotechnique*, Vol. 37, No. 4, pp.505-509.