

Influence of the cyclic loading of very large number of cycles on the pile capacity

Influence du chargement cyclique à grand nombre de cycles sur la capacité portante des pieux

Hadj Bekki^{1✉}, Brahim Tali², Jean Canou², Jean-Claude Dupla², Ali Bouafia³

1 Université Ibn khaldoun de Tiaret, Algérie

2 École Nationale des Ponts et Chaussées, Univ. Paris-Est, UR Navier, CERMES, France

3 Université Saâd Dahleb de Blida, Algérie

Received 20 November 2015

Revised 26 may 2016

Accepted 01 June 2016

Published online: 09 August 2016

Keywords

Calibration chamber

Pile model

Soil

Interface

Bearing capacity

Cyclic loading

Abstract: The paper presents a study of the bearing capacity of a pile model in calibration chamber, under a cyclic axial loading, up to very large number of cycles. The experimental study is aimed to the evolution of the bearing capacity of pile obtained after a cyclic loading up to 10^5 cycles. Firstly, we present briefly the experimental device and then the results of cyclic tests performed on the pile model in the calibration chamber. Several parameters which have a significant influence on the cyclic behavior of piles have been investigated, such as the cyclic displacement amplitude and the density of the soil. The analysis of results indicated that the mechanism of densification of the soil around the pile leads to improve pile capacity.

© 2016 The authors. Published by the Faculty of Sciences & Technology, University of Biskra. This is an open access article under the CC BY license.

Résumé: L'article présente une étude de la capacité portante des pieux chargés axialement, par une modélisation physique en chambre d'étalonnage, sous l'effet d'un chargement cyclique à grand nombre de cycles. L'étude expérimentale est consacrée à l'évolution de la capacité portante des pieux obtenue après l'application d'un chargement cyclique à grand nombre de cycles. On présente brièvement le dispositif expérimental utilisé, puis les résultats d'essais cycliques réalisés dans la chambre d'étalonnage sur un modèle de pieu, en analysant les effets de la densité et de l'amplitude cyclique. Il a été trouvé que, d'une façon générale, la capacité portante des pieux augmente considérablement suite à l'application d'un chargement cyclique à grand nombre de cycles. Ceci est dû au phénomène de la densification du sol au niveau de l'interface pieu-sol.

Mots clés : Chambre d'étalonnage; Pieu; Sol; Interface; capacité portante; chargement cyclique.

1. Introduction

Les pieux sont soumis, durant leur durée de vie, à des sollicitations cycliques qui sont induites par différentes actions telles que le vent, la houle, les marées, le trafic routier et ferroviaire, etc. Ces actions engendrent la dégradation de la capacité portante des pieux, on parle souvent de la dégradation du frottement latéral. Plusieurs travaux de recherche ont été entrepris depuis le début des années quatre-vingt pour comprendre les mécanismes de dégradation, on cite entre autres les travaux de Chan et Hanna (1980), Andersen et al. (1980) et Poulos (1981). La plus part des travaux expérimentaux, que ce soit in situ ou en laboratoire, consacrés à l'étude du comportement des interfaces sous sollicitations cycliques présentent des essais pour un nombre de cycles petit ou moyen (jusqu'à quelques centaines ou quelques milliers). Cependant, les sollicitations réelles sont des actions répétitives de l'ordre de plusieurs centaines de milliers de cycles, telles que les fondations

des éoliennes ou des structures off-shore. Le chargement et le déchargement du pieu provoquent une évolution très significative du comportement du système pieu sol (dégradation de la capacité portante et accumulation des déplacements plastiques). La dégradation du frottement latéral a été observée par plusieurs auteurs, en faisant des essais in situ et sur des modèles réduits au laboratoire (Chan et Hanna 1980; Poulos 1981; Andersen et al. 1988; Chin et Poulos 1996; Randolph et al. 1996; Fakharian 2001; White 2005; Gavin et O'Kelly 2007).

L'étude de la dégradation du frottement latéral en utilisant un modèle de pieu en chambre d'étalonnage (développée au Centre d'Études et de Recherches en Mécanique de Sols à l'École Nationale des Ponts et Chaussées de Paris) sous l'effet d'un chargement cyclique de type alterné, à déplacement contrôlé, a mis en évidence une variation très significative du frottement latéral au niveau de l'interface sol-pieu, en particulier, pour un nombre de cycles élevé (Bekki et al. 2014).

✉ Corresponding author. E-mail address: abekkihadj@yahoo.fr

L'étude de l'évolution de la capacité portante consiste à faire une comparaison entre les résultats obtenus pour un chargement monotone initial pré-cyclique et un chargement monotone post-cyclique pour estimer l'évolution de la capacité portante des pieux. Certains paramètres clés ont été étudiés, notamment: l'amplitude de déplacement cyclique ainsi que la densité du massif de sol.

Pour étudier l'évolution de la capacité portante des pieux, les facteurs de dégradation globale en terme de résistance en pointe et de frottement latéral ont été définis comme suit (Al-Douri 1992; Le Kouby 2003).

$$D_q = q_{p,final} / q_{p,initial} \tag{1}$$

$$D_\tau = f_{s,final} / f_{s,initial} \tag{2}$$

Avec:

$q_{p,final}$: Résistance en pointe limite mesurée lors du chargement monotone final;

$q_{p,initial}$: Résistance en pointe limite mesurée lors du chargement monotone initial;

$f_{s,final}$: Frottement latéral limite mesuré lors du chargement monotone final;

$f_{s,initial}$: Frottement latéral limite mesuré lors du chargement monotone initial.

2. Dispositifs expérimentaux et procédure d'essai

La chambre d'étalonnage utilisée a été développée à l'UR Navier-CERMES de l'ENPC (Dupla & Canou, 2003; Bekki & al. 2009). Le dispositif permet de fabriquer des massifs de sol de 524 mm de diamètre et de 700 mm de hauteur (Figure 1).

Le sable utilisé est le sable de Fontainebleau NE 34, essentiellement siliceux de grains sub-arrondis, ses principales caractéristiques sont résumées dans le tableau 1. La mise en place du massif de sol pour essai est réalisée en utilisant la technique de pluviation (Dupla 1995).

Pour la mise sous contraintes des massifs de sable, on a appliqué un niveau de contraintes faible ($\sigma_h = 50\text{kPa}$; $\sigma_v = 125\text{kPa}$), soit un coefficient de pression de terre K_0 égal à 0,40.

Le modèle de pieu utilisé est une sonde de type pénétrométrique de diamètre (d) 36 mm et de 950 mm de longueur. La sonde est instrumentée par deux capteurs d'effort, permettant des mesures découplées; l'un placé dans la pointe ayant une capacité de 20 kN et l'autre placé à une distance de 240 mm de la pointe et constituant le manchon de frottement latéral ayant une capacité de 5 kN (Figure 1). La rugosité normalisée du manchon du modèle de pieu est égale à 1, ce qui permet de mobiliser complètement le frottement. Le modèle de pieu est installé dans le massif de sable jusqu'à une profondeur de 500 mm, avec une vitesse d'enfoncement de l'ordre de 1 mm par seconde.

Tableau 1. Caractéristiques physiques du sable de Fontainebleau

D_{50} (mm)	C_U	C_C	e_{max}	e_{min}	ρ_s (g/cm ³)	ρ_{dmin} (g/cm ³)	ρ_{dmax} (g/cm ³)
0,22	1,49	1	0,882	0,551	2,65	1,41	1,71

Le chargement du pieu s'effectue selon trois étapes : on réalise tout d'abord un chargement monotone pour évaluer la capacité portante initiale du pieu, puis le chargement cyclique à grand nombre de cycles et enfin un chargement monotone final pour l'évaluation de la nouvelle capacité portante obtenue suite à l'application d'une séquence cyclique.

3. Essai Typique

La figure 2 montre la réponse du pieu suite à l'essai complet, conduit sur le massif de référence M0, réalisé à un état de densité moyenne ($I_p=0,65$), un niveau de contraintes faible ($\sigma_h = 50\text{kPa}$; $\sigma_v = 125\text{kPa}$) et une amplitude de déplacement cyclique $\rho_c = \pm 0,5$ mm.

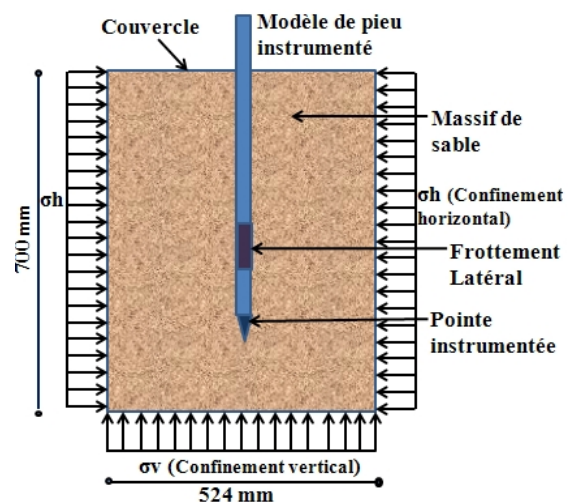
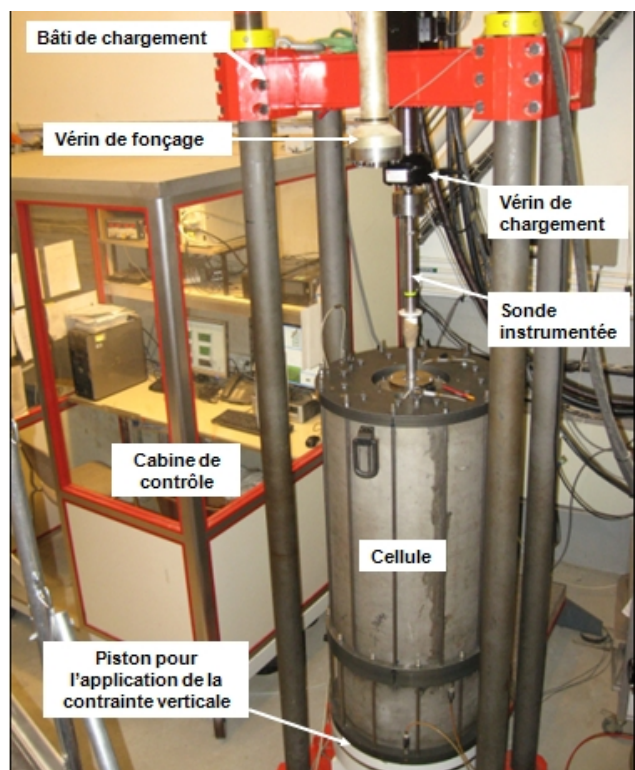


Fig 1. Dispositif d'essai en chambre d'étalonnage pour la modélisation physique des pieux.

L'essai est effectué en trois étapes:

(a) Chargement monotone initial

La résistance en pointe (Figure 2.a) se mobilise à partir d'une valeur résiduelle positive, ensuite évolue vers un palier à la fin de chargement. Par contre, le frottement latéral (figure 2.b) se mobilise à partir d'une valeur négative. La capacité portante globale initiale est de 8 kN; la pointe reprend 77% de l'effort appliqué, une telle valeur est très proche à celle trouvé par Chin et Poulos (1996). Le frottement ne reprend donc que 23%, du fait de l'élançement du pieu (évalué à 14).

(b) Chargement cyclique

La figure 3.a montre l'évolution des boucles relatives au frottement latéral. On remarque bien la dégradation de la capacité portante à partir du premier cycle. En effet, sur les 10 premiers cycles, on enregistre une dégradation de l'ordre de 13%. Cette dégradation cyclique continue jusqu'au cycle 100, puis le frottement latéral augmente en continu jusqu'à la fin de l'essai.

Dans la phase de radoucissement (dégradation), σ_h diminue du fait de la diminution de l'épaisseur de l'interface pieu-sol, ce qui se traduit par un comportement de type radoucissement cyclique. Ce comportement se poursuit jusqu'à un point où on atteint la dégradation maximale du frottement latéral (Chin et Poulos 1996). À partir de ce point, le sable dans la zone d'interface continue à se densifier mais à faible taux et le

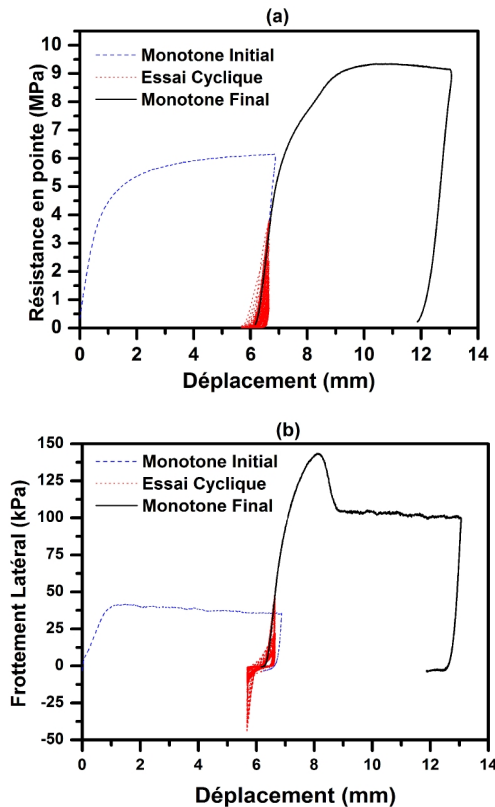


Fig. 2. Essai Monotone initial, essai cyclique et essai monotone post-cyclique réalisés sur la massif M0 ($I_b=0,65$; $\sigma_h=50kPa$; $\sigma_v=125kPa$): (a) Résistance en pointe; (b) Frottement latéral.

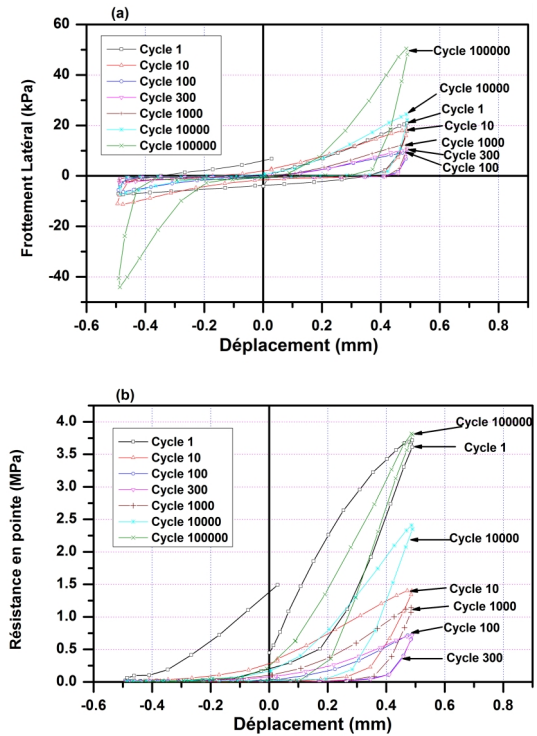


Fig. 3. Essai cyclique à déplacement contrôlé ($p_c = \pm 0,5$ mm) réalisé sur la massif M0 ($I_b=0,65$; $\sigma_h=50kPa$; $\sigma_v=125kPa$): (a) Frottement latéral; (b) Résistance en pointe.

caractère dilatant augmente d'un cycle à un autre. Du fait que la dilatance est partiellement empêchée (Schlosser et Guilloux 1980; Lerat et al. 1997), ce phénomène devient prédominant par rapport à la diminution de σ_h et provoque un durcissement progressif de l'interface avec des valeurs maximales du frottement mobilisé et ce jusqu'à la fin de la séquence cyclique, pour un nombre élevé de cycles (Bekki et al. 2013).

Pour la résistance en pointe (figure 3.b), la dégradation est plus prononcée sur les premiers cycles. En effet, on enregistre une forte dégradation de l'ordre de 62% sur les 10 premiers cycles. Ceci s'explique par le fait que le sol sous la pointe est fortement densifié suite à l'installation de l'inclusion et au chargement monotone. Ainsi, au cours de chargement cyclique, celui-ci provoque une diminution du champ de contraintes sous la pointe, durant la phase arrachement (demi cycle négatif), le sol est relâché, durant le demi cycle positif (phase compression), le déplacement imposé n'est pas assez grand pour remobiliser la résistance en pointe, mais au fur et à mesure que le chargement se poursuit, le sol occupe de plus en plus l'espace libéré par le déplacement et il commence à se densifier suite à la compaction de la masse de sable sous la pointe, ce qui provoque une augmentation de la résistance en pointe.

(c) Chargement monotone post-cyclique

La figure 2 montre bien l'amélioration importante de la capacité portante engendrée par le chargement cyclique. En effet, l'augmentation de la capacité portante globale est de l'ordre de 50%, une telle amélioration est due au fait que le chargement cyclique a provoqué une densification du sol au voisinage du

pieu. L'amélioration du frottement latéral est très importante, qui est de l'ordre de 170%, s'expliquant par le fait que le chargement cyclique a engendré une densification du sol autour du manchon du pieu, qui est d'ailleurs plus marqué par rapport à la densification du sol sous la pointe, où il a été enregistré 46% d'augmentation de la résistance en pointe.

4. Étude paramétrique

4.1. Amplitude cyclique

Pour les différentes amplitudes cycliques testées, il a été trouvé que le chargement cyclique améliore la capacité portante du pieu après un grand nombre de cycles (100 000 cycles), en effet, les facteurs de dégradation globale sont tous supérieurs à l'unité (Figure 4a). Pour la petite amplitude de $\rho_c = \pm 0,1$ mm, les facteurs de dégradation globale sont nettement améliorés, mais ils restent relativement faibles par rapport à ceux obtenus pour les autres amplitudes, du fait que cette amplitude ne permet qu'une légère densification du sol autour du pieu.

Par contre, pour la deuxième amplitude ($\rho_c = \pm 0,25$ mm), les facteurs de dégradation sont pratiquement doublés, cela est dû au fait que cette amplitude provoque une densification importante par un meilleur réarrangement des grains et par conséquent un serrage du sol autour du pieu. Tandis que pour la 3^{ème} amplitude ($\rho_c = \pm 0,5$ mm), les facteurs de dégradation ont légèrement diminué par rapport à ceux obtenus pour la 2^{ème} amplitude, ceci peut être dû au fait que cette amplitude cyclique ne permet pas un meilleur réarrangement des grains (réarrangement et désorganisation des grains)

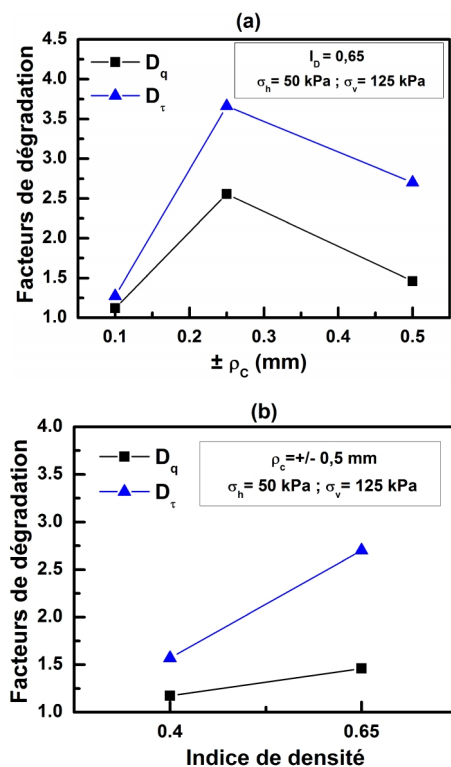


Fig. 4. Variation des facteurs de dégradation globale de la résistance en pointe et du frottement latéral en fonction de : (a) Amplitude cyclique ; (b) Indice de densité du massif.

4.2. Densité du massif

La figure 4b montre que pour le massif le plus dense, il y aura une amélioration importante de la capacité portante (pour un niveau de contraintes faible), en particulier pour le frottement latéral. Ceci s'explique par la densification additionnelle de l'interface engendrée par le chargement cyclique qui a provoqué un serrage du sol autour du pieu. Le faible taux d'accroissement de la résistance en pointe nous laisse dire que l'effet de la densité agit plus sur le frottement (par un serrage du sol au tour du manchon) que sur la pointe (diminution du champ de contraintes sous la pointe suite au mouvement alterné du pieu).

5. Conclusion

Les essais réalisés sur modèle réduit de pieu en chambre d'étalonnage montrent que le chargement cyclique alterné à grand nombre de cycles (100 000 cycles) produit, en général, une amélioration de la capacité portante tant en résistance en pointe qu'en frottement latéral.

Il a été trouvé que le taux d'amélioration de la capacité portante varie en fonction de la densité du massif et de l'amplitude cyclique. Le taux de variation du frottement latéral est plus important par rapport à celui de la résistance en pointe, ce qui montre que le frottement latéral est plus sensible aux paramètres de chargement cyclique.

L'analyse des résultats trouvés nous permet de dire que le phénomène de densification de l'interface pieu-sol est le mécanisme qui donne une explication à l'amélioration de la capacité portante suite à un chargement cyclique à grand nombre de cycles.

References

- Al-Douri, R.H. (1992) Behaviour of Single Pile and Pile groups in Calcareous Sediments. Ph.D. Thesis, University of Sydney. Australia.
- Andersen, K. H., W. F. Rosenbrand, S. F. Brown, & J. H. Pool (1980) Cyclic and Laboratory tests on Drammen Clay. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE 106(5): 499-529.
- Andersen, K.H., Kleven, A. & Heien, D. (1988). Cyclic Soil Data for Design of Gravity Structures. Journal of Geotechnical Engineering. ASCE, 114(5): 517-539.
- Bekki H., A. Aperi, Canou J., J. C. Dupla, B. Tali & A. Bouafia (2009) Expérimentation en chambre d'étalonnage sur modèles réduits de pieux. Colloque International sur le développement de la géotechnique au Maghreb, Casablanca (Maroc).
- Bekki, H., J. Canou, B. Tali, J. C. Dupla, & A. Bouafia, (2013) Evolution of local friction along a model pile shaft in calibration chamber for large number of loading cycles. Comptes Rendus Mécanique, 341(6): 499-507.
- Bekki, H., J. Canou, B. Tali, J. C. Dupla & A. Bouafia (2014) Behavior of Soil-structure interfaces under cyclic loading for large numbers of cycles: Application to piles. Journal of Applied Engineering Science & Technology, 1(1): 11-16.
- Chan, S.F. & T. H. Hanna (1980) Repeated Loading On Singles Piles in Sand, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE 106(2): 171-188.

- Chin, J.T. & H.G. Poulos (1996) Tests on Model Jacked Piles in Calcareous Sand. *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, 19 (2): 164-180.
- Dupla J. C (1995) Application de la sollicitation d'expansion de cavité cylindrique à l'évaluation des caractéristiques de liquéfaction d'un sable. Thèse de doctorat obtenue au CERMS, ENPC, 321-376.
- Dupla, J. C., & J. Canou (2003) Cyclic pressuremeter loading and liquefaction properties of sands. *Soils and Foundations*, 43 (2): 17-31.
- Fakharian, K. (2001) Friction Pile-Soil Interaction Subjected to Cyclic Axial Loads. *Proceedings of the Eleventh International Offshore and Polar Engineering Conference Stavanger, Norway*, pp. 17-22.
- Gavin, K.G. & B. C. O'Kelly (2007) Effect of Friction Fatigue on Pile Capacity in Dense Sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 133 (1): 63-71.
- Le Kouby, A. (2003). Étude du comportement mécanique des micros pieux sous chargement monotones et cycliques verticaux, Application aux effets de groupe. Thèse de doctorat obtenue au CERMS, ENPC, 229- 319.
- Lerat, P., M. Boulon & F. Schlosser (1997) Étude expérimentale de l'interface sol-structure dans les milieux granulaires. *Revue Française de Génie Civil*, 1 (2): 345-366.
- Poulos, H.G. (1981) Some aspects of skin friction of piles in clay under cyclic loading. *Geotechnical Engineering, ASCE*, 12, 1- 17.
- Randolph, F.M., H. A. Joer, M.S Khorshid & A.M. Hyden (1996) Field and Laboratory Data from Pile Load Tests in Calcareous Soil. *The 28th Offshore Technology Conference, Texas, U.S.A*, 6-9.
- Schlosser, F. & A. Guilloux (1980) Le frottement dans le renforcement des sols. *Revue française de Géotechnique*, 16: 65-67.
- White, D. J. (2005) A General Framework For Shaft Resistance on Displacement Piles in Sand *Proc. Int. Symp. On Frontiers in Offshore Geotechnics*, pp. 697-703.