

Behavior of Soil-structure interfaces under cyclic loading for large numbers of cycles: Application to piles

Comportement des interfaces sol-structure sous chargement cyclique à grand nombre de cycles : Application aux pieux

Hadj Bekki¹✉, Brahim Tali², Jean Canou², Jean-Claude Dupla², Ali Bouafia³

¹ Université Ibn Khaldoun de Tيارت, Algérie

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

³ Université Saâd Dahleb de Blida, Algérie

The present paper was presented at the 'Workshop CMG14, Caractérisation et Modélisation des Géomatériaux' Biskra, 25-26 February 2014
Published online: 27 June 2014

Keywords

Calibration chamber
Pile
Soil
Interface
Skin friction
Cyclic loading

Abstract: Pile foundations are usually subjected to cyclic loading which can be either environmental or industrial. Loading and unloading sequences of the pile cause very significant variation in the behavior of the pile-soil system and generate degradation of the bearing capacity and an accumulation of irreversible displacement. The paper presents a study of the behavior of piles subjected to axial cyclic loading for large numbers of cycles using a physical modeling approach in a calibration chamber. To focus on the degradation of the friction in soil-pile interface, the experiments are carried out in two-way displacement-controlled tests. Firstly, The experimental set-up was presented, then the typical results of the evolution of skin friction under cyclic loading. The results indicate that the application of a large number of cycles to the pile, the skin friction decrease initially then increase continually up to the end of the cyclic sequence. It can be concluded that the phase of friction reinforcement is due to a partially constrained dilatancy phenomenon of the sand within the interface zone.

© 2014 The authors. Published by the Faculty of Sciences & Technology, University of Biskra. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>)

Résumé : Généralement les pieux sont soumis à des sollicitations cycliques qui peuvent être de type environnemental ou industriel. Le chargement et le déchargement du pieu provoquent une évolution très significative du comportement du système pieu- sol et engendrent une dégradation de la capacité portante ainsi que l'accumulation des déplacements irréversibles. L'article présente une étude du comportement des pieux chargés axialement, par une modélisation physique en chambre d'étalonnage, sous l'effet d'un chargement cyclique à grand nombre de cycles. Les essais ont été réalisés à déplacement contrôlé de type alterné afin de mettre en évidence le phénomène de dégradation du frottement à l'interface sol-pieu. On présente tout d'abord le dispositif expérimental utilisé, puis les résultats typiques sous l'effet du chargement cyclique en s'intéressant, plus particulièrement, à l'évolution du frottement au niveau de l'interface sol-pieu. L'analyse des résultats trouvés nous a permis de conclure qu'en appliquant un chargement cyclique à grand nombre de cycles sur le pieu, le frottement latéral subira au début une dégradation puis une augmentation qui continuera jusqu'à la fin de la séquence cyclique. Ce renforcement observé du frottement latéral est dû à la forte dilatance partiellement empêchée de la zone d'interface sol-pieu.

Mots clés : Chambre d'étalonnage, pieu, sol, interface, frottement latéral, chargement cyclique, dégradation.

1. Introduction

Généralement les pieux sont soumis à des sollicitations cycliques qui peuvent être de type environnemental (vent, houle, marées, séismes, etc.) ou de type industriel (machines tournantes, presses, ponts roulants, trafic ferroviaire, routier, aéroportuaire, etc.). Les séismes sont caractérisés par des petits nombres de cycles et des charges très variables dans le temps. Les autres sollicitations entraînent des charges approximativement systématiques et répétées provoquant le phénomène de fatigue (Koreck et Schwarz 1988). Ces actions variables peuvent avoir une influence significative sur le comportement et la stabilité des ouvrages, à moyen et à long terme, et peuvent entraîner des pathologies et des désordres importants allant jusqu'à la rupture de l'ouvrage. Les sollicitations variables du type environnemental telles que le vent et la houle sont caractérisées par un nombre de cycle moyen, de l'ordre de 100 à 10 000 cycles, d'amplitude moyenne à forte et de période de quelques secondes (fréquences de 0,01Hz à 0,1Hz). Les sollicitations du type industriel correspondent à une série importante d'amplitudes, de fréquences et de nombre de cycles, allant de petits nombre de cycles de grande amplitude (presses, ponts roulants, etc.) à des grands nombre de cycles de faible amplitude (machines tournantes, trafic ferroviaire, etc.). Le chargement et déchargement du pieu provoquent une évolution très significative du comportement du système pieu- sol (dégradation de la capacité portante et accumulation des déplacements irréversibles). La dégradation du frottement latéral a été observée par plusieurs auteurs, en faisant des essais in situ et sur des modèles réduits en laboratoire (Chan et Hanna 1980 ; Poulos 1981 ; Andersen et al. 1988 ; Lee et Poulos 1990 ; Al Douri 1992 ; Karlsrud et al. 1992 ; Randolph et al. 1996 ; Jardine et Chow 1996).

Pour mettre en évidence le phénomène de dégradation du frottement latéral, les essais à effectuer sont de type alterné à déplacement contrôlé (Evgin et Fakharian 1997). La plupart des travaux expérimentaux consacrés à l'étude du comportement des interfaces sous sollicitations cycliques présentent des essais réalisés avec des nombres de cycles petits ou moyens (jusqu'à quelques centaines, voire des milliers). Dans la littérature, il y a peu de résultats qui ont été publiés sur les essais à grand nombre

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

de cycles (plusieurs dizaines ou centaines de milliers de cycles). La présente étude est une contribution expérimentale pour élucider l'influence de ce paramètre.

L'étude est focalisée sur 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 à amplitude de déplacement contrôlée. L'essai présenté concerne un grand nombre de cycles ($N=100\ 000$ cycles).

Pour l'étude de la dégradation du frottement latéral, on utilise le facteur de dégradation intermédiaire (Poulos et Chan 1986 ; Le Kouby 2003), défini comme suit :

$$D_{\tau,i} = q_{s,max,i} / q_{s,max,1} \quad (1)$$

Avec : $q_{s,max,i}$: Frottement latéral maximum mesuré lors du cycle i .

$q_{s,max,1}$: Frottement latéral maximum mesuré lors du premier cycle.

2. Matériau et Dispositifs d'essai

2.1. Matériau utilisé

Pour la réalisation des essais, on a utilisé le sable de Fontainebleau, essentiellement siliceux de grains sub-arrondis, dont les caractéristiques physiques sont récapitulées dans le tableau 1.

2.2. Description des Dispositifs Expérimentaux

La chambre d'étalonnage utilisée (Dulpa 1995 ; Dupla et Canou 2003), nous permet de fabriquer des massifs de sol de 524 mm de diamètre et d'une hauteur de 700 mm. La technique de fabrication des massifs de sable est analogue à celle utilisée pour fabriquer une éprouvette triaxiale, le sable est mis en place, à l'intérieur d'une membrane en néoprène de 2 mm d'épaisseur grâce à un moule de maintien. Les éléments principaux de la chambre d'étalonnage comprennent un piston pour l'application de la pression verticale (Dispositif de pressurisation verticale du massif), une enceinte métallique (pour l'application de la contrainte de consolidation horizontale), deux embases (inférieure et supérieure) et un couvercle (Figure 1) (Le Thiet 2005).

Le dispositif d'installation et de chargement de modèles de pieux est composé d'un seul bâti à quatre colonnes sur lequel est fixé deux vérins hydrauliques, à savoir un vérin longue course (1 m) situé à la partie supérieure du bâti et installé à l'avant sur deux colonnes, pour le fonçage des inclusions, et un servovérin fixé sur la traverse principale du bâti est destiné aux opérations de chargement des inclusions (Figure 2).

Tableau 1. Caractéristiques physiques du sable de Fontainebleau

$D_{50}(\text{mm})$	C_u	C_c	e_{max}	e_{min}	$\rho_s(\text{g/cm}^3)$	$\rho_{dmin}(\text{g/cm}^3)$	$\rho_{dmax}(\text{g/cm}^3)$
0,22	1,49	1	0,882	0,551	2,65	1,41	1,71

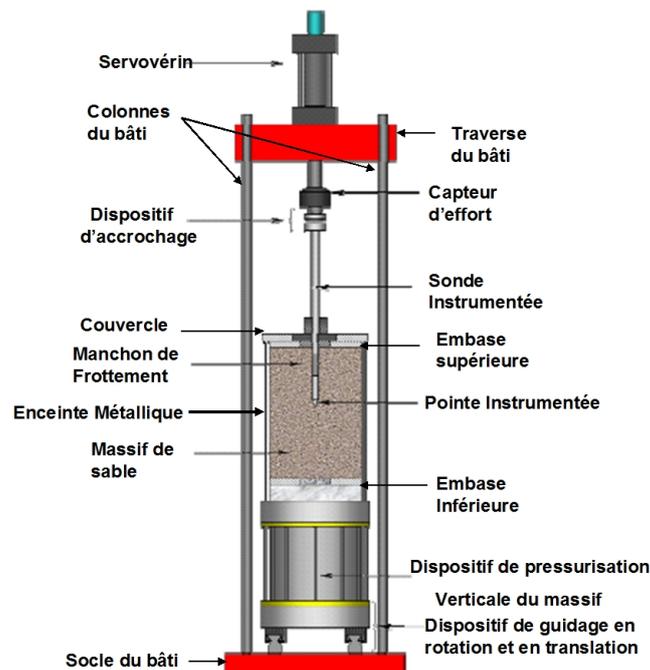


Fig. 1. Schéma de principe du dispositif d'essai.



Fig. 2. Vue d'ensemble du dispositif.

2.3. Modèle de pieu utilisé

Le modèle de pieu utilisé est une sonde de type « pénétromètre » de 36 mm de diamètre et de longueur 950 mm. La sonde est équipée en pointe d'un capteur d'effort miniature, et d'un manchon de frottement situé à une distance de 240 mm de la pointe, permettant d'avoir accès, sur le même modèle, à la mesure de la résistance en pointe ainsi qu'à celle du frottement latéral, mesurées de manière indépendante. La rugosité normalisée R_n du manchon de la sonde est égale à 1, ce qui est suffisante pour mobiliser complètement le frottement latéral (Tabucanon et Airy 1992).

2.4. Procédure d'essai

La mise en place de sable est effectuée par pluviation en utilisant un grand modèle de pluviateur, conçu spécialement pour la chambre d'étalonnage (Dupla 1995). Pour la mise sous contraintes des massifs de sable, on a appliqué un niveau de contraintes faible ($\sigma_v = 125\text{kPa}$; $\sigma_h = 50\text{kPa}$), soit un coefficient de pression de terre K_0 égal à 0,40. On procède après à l'installation du modèle de pieu instrumenté dans le massif sur une hauteur de 500 mm.

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 proprement dit et enfin un chargement monotone final pour l'évaluation de la nouvelle capacité portante, obtenue suite au chargement cyclique.

Après avoir prospecté plusieurs fréquences de chargement cyclique (domaine quasi-statique), il a été décidé de réaliser les essais à grand nombre de cycles avec une fréquence de l'ordre de 1Hz, ce qui permettra de simuler les sollicitations répétées réelles, d'une part et de pouvoir réaliser des essais à grand nombre de cycles dans un temps raisonnablement faisable, d'autre part.

3. Présentation des résultats expérimentaux et interprétation

Les trois phases de l'essai, chargement monotone initial, chargement cyclique et chargement monotone post-cyclique sont présentés sur la figure 3.

3.1. Chargement Monotone Initial

On observe l'apparition d'un palier marqué à 1,5 mm environ d'enfoncement. Lorsque la rupture est atteinte, la valeur de la charge se maintient constante, ce qui rend compte d'une plasticité parfaite à l'interface, et la surface de frottement active n'évolue plus avec l'enfoncement.

3.2. Chargement Cyclique

Sur la figure 4, on présente la réponse du frottement latéral suite à l'application d'un déplacement alterné ($\rho_c = \pm 0,5\text{ mm}$). En vue de mieux visualiser l'évolution du frottement latéral, on présente sur la figure 5 la courbe d'évolution de cette grandeur mesurée par le biais d'un facteur qui caractérise à la fois la dégradation et l'augmentation, noté $F_{e\tau_i}$ au lieu de D_{τ_i} . La légère augmentation du frottement latéral au cours des premiers cycles est attribuée à la redistribution des contraintes autour du pieu (Jardine et Standing 2000).

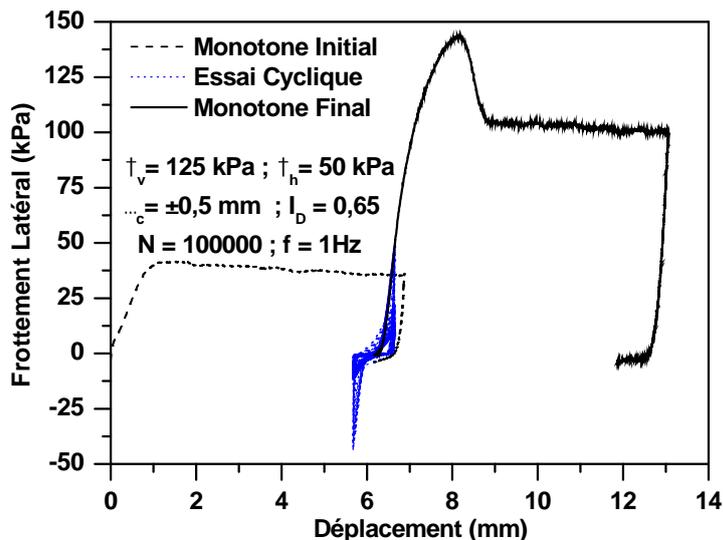


Fig. 3. Réponse du frottement latéral au cours de chargements monotones et cyclique.

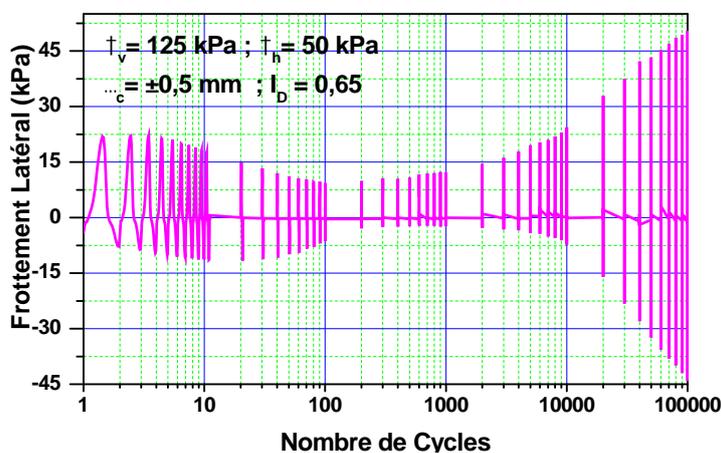


Fig. 4. Réponse du frottement latéral en fonction du nombre de cycles.

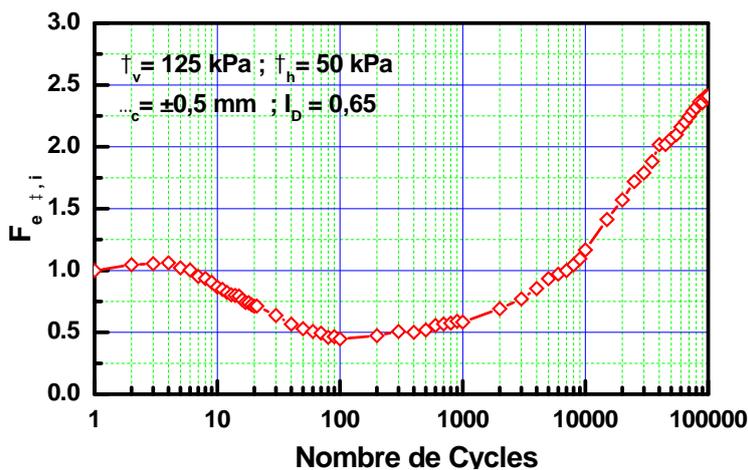


Fig. 5. Facteur d'évolution du frottement latéral en fonction du nombre de cycles.

La dégradation initiale observée est un phénomène classique, elle a été observée par plusieurs chercheurs (Lee et Poulos 1990 ; Chin et Poulos 1996 ; Al-Douri et Poulos 1995, Le Kouby 2003). Par contre, la réaugmentation des facteurs de dégradation est un phénomène nouveau qui n'a pas été observé auparavant puisque les essais cycliques qu'on a trouvé dans la littérature concernent quelques centaines jusqu'à quelques milliers de cycles. L'interprétation des deux phases dégradation puis renforcement est faite en utilisant un schéma conceptuel de comportement d'interface basé sur le principe de la rigidité constante du sol entourant le pieu représenté par un ressort de rigidité k_0 (figure 6).

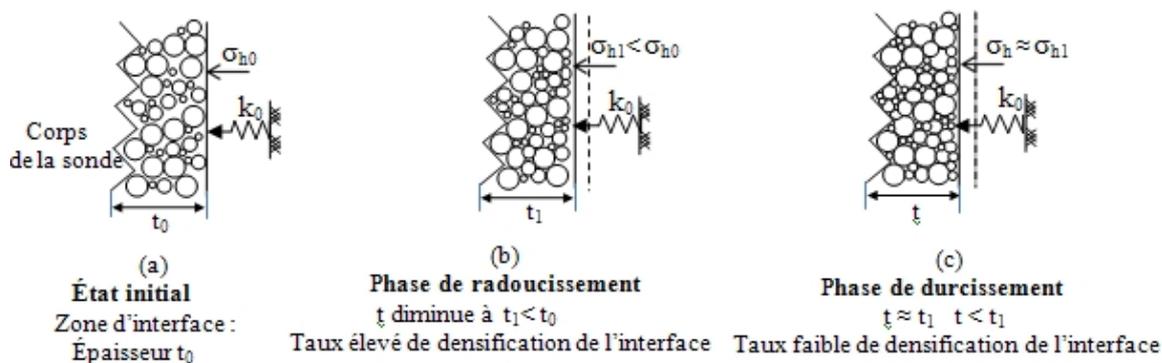


Fig. 6. Schéma conceptuel pour l'interprétation de l'évolution du frottement latéral au cours du chargement cyclique.

Ce modèle a été utilisé pour interpréter le comportement d'interfaces sous chargements monotones (Lehane et al. 1993 ; Lehane et White 2005) et la dégradation du frottement latéral sous sollicitations cycliques (White et Lehane 2004 ; Tali 2011).

La mobilisation du frottement latéral durant la séquence cyclique est le résultat de la combinaison de deux mécanismes en évolution: la dégradation progressive de la contrainte normale effective σ_h , due à la contractance cyclique (schématisé par l'élongation du ressort) et la densification du sable à l'intérieur de la zone d'interface produite également par la contractance cyclique. En fait, il y a une compétition des deux mécanismes, la diminution de σ_h induisant la dégradation cyclique du frottement latéral « radoucissement cyclique », d'une part et la densification du sol induisant un comportement dilatant « durcissement cyclique » résultant de la dilatance partiellement empêchée, d'autre part.

Dans la phase de radoucissement, la diminution de σ_h correspondant à la diminution de l'épaisseur de l'interface ($t < t_0$) est prédominant, 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). A partir de ce point, le sable dans la zone d'interface continue à se densifier mais à faible taux et le caractère dilatant augmente d'un cycle à un autre. Du fait que la dilatance est partiellement empêchée (Schlosser et Guilloux 1980 ; Boulon et Foray 1986 ; 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).

3.3. Chargement Monotone Final

Sur la figure 3, on observe une forte augmentation du frottement latéral après la séquence cyclique avec l'apparition d'un pic très marqué. En effet, le frottement a augmenté avec un rapport de 2,7 par rapport au chargement monotone initial, ce qui traduit la forte dilatance au niveau de l'interface sol-pieu.

4. Conclusions

Le travail consistait en l'étude du comportement de l'interface sol-pieu sous chargement cyclique à grand nombre de cycles en utilisant une modélisation physique en chambre d'étalonnage.

Il a été trouvé que, sous l'effet de chargement cyclique, le frottement ne continue pas à diminuer mais au contraire il se renforce de nouveau jusqu'à la fin de la séquence cyclique. Cette augmentation a été interprétée par un schéma conceptuel de comportement d'interface basé sur le principe de la rigidité constante du sol entourant le pieu. La première phase a été expliquée par le fait que la diminution de la contrainte normale à l'interface est engendrée par la diminution de l'épaisseur de cette zone (contractance cyclique). Quant à la phase de durcissement cyclique, cela a été expliqué par le phénomène de la dilatance partiellement empêchée du sol au niveau de l'interface.

Références

- Al-Douri, R.H. (1992) Behaviour of Single Pile and Pile groups in Calcareous Sediments. Ph.D. Thesis, University of Sydney. Australia.
- Al-Douri, R.H., H.G. Poulos (1995) Predicted and observed cyclic performance of piles in calcareous sand. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE* 121(1): 1-16.
- Andersen, K.H., A. Kleven, D. Heing (1988) Cyclic Soil Data for Design of Gravity Structures. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE* 114(5): 517-539.
- Boulon, M., P. Foray (1986) Physical and numerical simulation of lateral shaft friction along offshore piles in sand. *Proc. 3rd International Conference on Numerical methods in offshore piling, Nantes, France, pp. 127-147.*
- 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(1): 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 Centre d'Enseignement et de Recherche en Mécanique des Sols, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Dupla, J.C., J. Canou (2003) Cyclic pressuremeter loading and liquefaction properties of sands. *Soils and Foundations* 43(2): 17-31.

- Evgin, E., K. Fakharian (1997) Cyclic degradation of shaft resistance for piles embedded in Silica sand. Proceedings, 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hamburg, Germany, September 6-12 1997.
- Jardine, R., F. Chow (1996) New design methods for offshore piles. The Marine Technology Directorate LTD.
- Jardine, R., J.R. Standing (2000) Pile load performed for HSE cyclic loading study at Dunkirk (France). Offshore Technology Report, vol. 2, July 2000.
- Karlsrud, K., F. Nadim, T. Haugen (1992) Piles in clay under cyclic axial loading – Field tests and computational modelling. Publication N° 169, Norwegian Geotechnical Institute.
- Koreck, H.W., P.S. Schwarz (1988) Axial Cyclic Loaded Piles. Deep Foundations on Bored and Auger Piles, Van Impe, Belkema, Rotterdam.
- Lee, C.Y., H.G. Poulos (1990) Experimental investigations of axial capacity of model grouted piles in marine calcareous sediments. The University of Sydney, School of Civil and Mining Engineering, Research report No. R618.
- Le Kouby, A. (2003) Etude du comportement mécanique des micros pieux sous chargement monotones et cycliques verticaux, Application aux effets de groupe. Thèse de doctorat obtenue au Centre d'Enseignement et de Recherche en Mécanique des Sols, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Lehane, B.M., R.J. Jardine, A.J. Bond, R. Frank (1993) Mechanisms of Shaft Friction in Sand From Instrumented Pile Tests. Journal of Geotechnical Engineering 119(1): 19-35.
- Lehane, B.M., D.J. White (2005) Lateral Stress Changes and Shaft Friction for Model Displacement Piles in Sand. Can. Geotech. J. 42 : 1039-1052.
- 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.
- Le Thiet, T. (2005) Etude du processus de vibrofonçage d'inclusions cylindriques en chambre d'étalonnage. Application aux pieux. Thèse de doctorat obtenue au Centre d'Enseignement et de Recherche en Mécanique des Sols, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Poulos, H.G. (1981) Some aspects of skin friction of piles in clay under cyclic loading. Geotechnical Engineering, ASCE 12: 1- 17.
- Poulos, H.G., K.F. Chan (1986) Laboratory study of Pile Skin Friction in Calcareous Sand. Proceedings, Geotechnical Engineering Conference on Calcareous Sediments, Perth, Vol. 1, pp. 245-253.
- 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 may 1996.
- Schlosser, F., A. Guilloux (1980) Le frottement dans le renforcement des sols. Revue française de Géotechnique 16: 65-67.
- Tabucanon, J.T., D.W. Airy (1992) Interface tests to investigate pile skin friction in sands. School of Civil and mining engineering, Centre for Geotechnical Research. Research report, N°: R662, 23 pages.
- Tali, B. (2011) Comportement de l'interface sol-structure sous sollicitations cycliques – Application au calcul des fondations profondes. Thèse de Doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées de Paris.
- White, D.J., B.M. Lehane (2004) Friction Fatigue on Displacement Piles in Sand. Géotechnique 54(10): 645-658.