

COMPORTEMENT DES PIEUX SOUS CHARGEMENT CYCLIQUE – CAS DES SABLES ..

BEHAVIOUR OF PILES UNDER CYCLIC LOADING – SANDY SOILS.

Alain LE KOUBY ¹,

¹ IFSTTAR, 14-20 boulevard Newton, 77447 Champs-sur-Marne - Marne-la-Vallée cedex

RÉSUMÉ – Dans le cadre du projet SOLCYP (SOLlicitations Cycliques sur les Pieux), des essais sur des pieux forés dans du sable ont été effectués dans la commune de Loon Plage. Les pieux ont été instrumentés à l'aide de l'extensomètre amovible de l'IFSTTAR dans le but de mesurer de manière indépendante les frottements latéraux et la résistance en pointe. Le programme d'essais comprenait des essais de chargement statiques et cycliques en traction et en compression. L'évolution de la distribution des efforts le long du pieu entre le premier et le dernier cycle permet de caractériser la réponse des pieux sous sollicitations cycliques. De même, une discussion sur la détermination des lois de dégradation inspirée du modèle de Matlock et Foo (1979) est proposée.

ABSTRACT – Within SOLCYP research project, pile load tests on bored piles were carried out in Loon Plage, North of France in a sandy soil zone. Piles were instrumented with the IFSTTAR removable extensometer in order to measure independently shaft friction and tip resistance. Pile response under cyclic loading was shown through load distribution. Experimental program consists in static and cyclic load tests in tension and compression. In addition, a discussion on the degradation law based on Matlock and Foo model is proposed .

1. Introduction

Un site sableux a été choisi pour effectuer les essais de pieux sur un site constitué principalement de sable.

Le site expérimental se situe sur la commune de Loon-Plage (59) près de Dunkerque dans le Nord de la France. Il se caractérise par une couverture de remblais récents (0-0.6m) et d'argile sableuse (0.6-2.2m) sous laquelle on rencontre la formation de sable des Flandres. La nappe phréatique au moment des essais se situait à environ 2m sous le niveau du terrain naturel.

La synthèse des sondages pressiométriques et pénétrométriques (CPT) est présentée sur la Figure 1. Une certaine homogénéité du site peut être observée en termes de valeurs de P_1^* et q_c obtenues. Le papier proposé présente certains résultats de la campagne d'essais de pieux sur site effectués sur des pieux forés soumis à des sollicitations statiques et cycliques en traction et en compression. De plus, quelques éléments de discussion sont proposés sur l'évaluation du facteur de dégradation à prendre en compte.

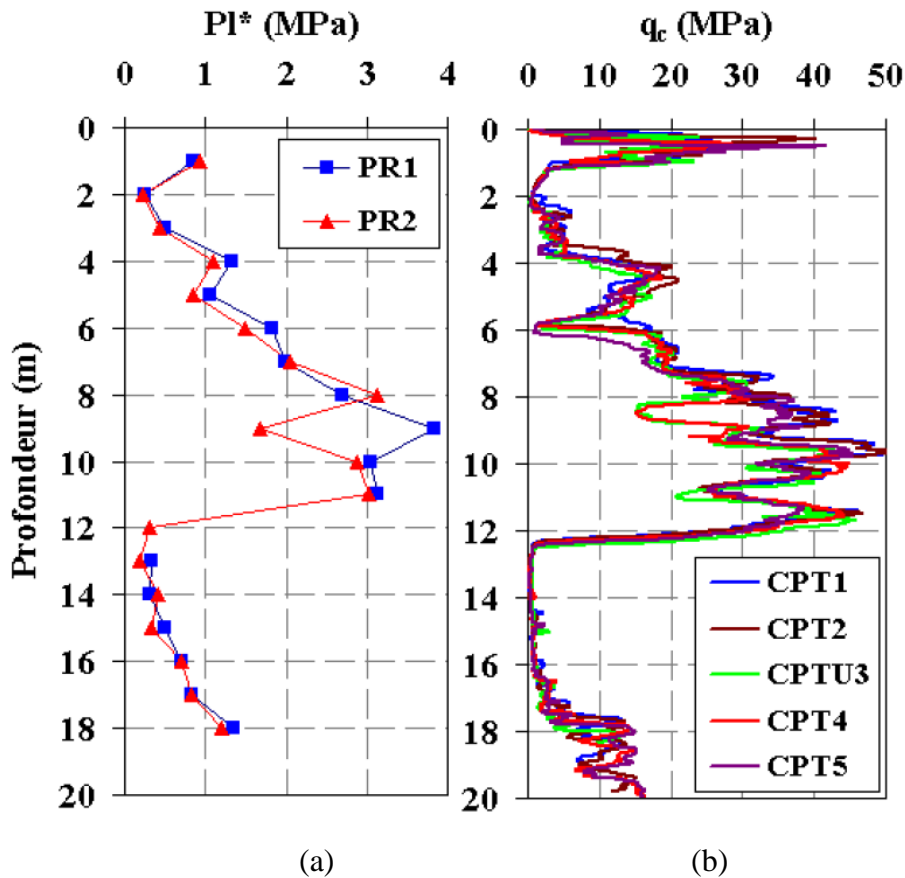


Figure 1 Sondages presiométriques (a) et sondages pénétrométriques effectués dans la zone d'essai de Loon Plage.

2. Programme d'essai, objectifs et instrumentation

2.1. Programme d'essai et objectifs

Lors du projet SOLCYP, deux pieux battus fermés de diamètre 406 mm ont été installés (B1, B2). De même, Cinq pieux forés de diamètre 420 mm, respectivement de longueur 8m pour les essais de compression et de 10,5m pour les essais de traction, ont été installés. Dans ce papier, seuls les essais sur les pieux F1, F2 (traction), F4 et F5 (compression) seront analysés.

Le Tableau 1 recense le descriptif des essais de pieux qui sont traités dans ce papier.

Les essais de pieux statique (TS et CS) ont été réalisés suivant les normes AFNOR NF-P94150-1 (compression) (1999a) ou 94150-2 (traction) (1999b) au début de leur histoire de chargement. Les essais statiques rapides (TR et CR) sont tels qu'ils sont effectués avec des montées en charge qui durent 20 secondes et des paliers qui durent seulement 180 s. Ce type d'essai a été choisi car il permet d'estimer la dégradation de la capacité portante après chaque série de cycles.

Ce choix a permis de réaliser plusieurs types d'essai : des essais où un chargement statique était effectué avant et après les séquences cycliques et des essais où les séquences cycliques étaient appliquées en premier puis un essai statique rapide. Pour déterminer un facteur de dégradation relatif à la capacité portante autant en termes de frottement latéral et de résistance en pointe, il est nécessaire de comparer la capacité portante avant et après cycles (Poulos, 1982).

Les séquences cycliques sont appliquées avec une fréquence de 0,5 Hz. Le détail des essais est décrit dans Benzaria et al. (2013).

Tableau 1. Projet SOLCYP – caractéristiques des pieux

Référence	Type d'essai	Statique (S)/ Cyclique (C)	Charge minimale (kN)	Charge maximale (kN)	Nombre de cycles
L-F1/TS1	T Traction	S		800	
L-F1/TC2	T Traction	C	40	279	126
L-F1/TR1	T Traction	S		234	
L-F1/TC3	T Traction	C	20	60	500
L-F1/TC4	T Traction	C	20	104	500
L-F1/TC5	T Traction	C	40	129	760
L-F1/TR2	T Traction	S		139 (16mm)	
L-F2/TC1	T Traction	C	75	555	367
L-F2/TR1	T Traction	S		439	
L-F2/TC2	T Traction	C	40	200	315
L-F2/TR2	T Traction	S		218	
L-F4/CS1	C - Compression	S		978	
L-F4/CC1	C - Compression	C	50	347	1879
L-F4/CR1	C - Compression	S		973	
L-F5/CC1	C - Compression	C	400	300	15
L-F5/CC2	C - Compression	C	300	100	5000
L-F5/CC3	C - Compression	C	400	200	280

L : Loon Plage, TC : chargement cyclique en Traction, CC : chargement cyclique en compression,
 TS et CS : respectivement chargement statique suivant les normes en traction et compression
 TR et CR : respectivement chargement statique suivant les normes en traction et compression

2.2. Instrumentation

La méthode d'instrumentation utilisée pour les essais de chargement est la méthode d'essais de pieu avec l'extensomètre amovible. Elle consiste à utiliser des jauges extensométriques collées sur un ruban métallique placé dans un tube-logement à l'intérieur du pieu. Cette technique assure que les jauges ne subissent pas de sollicitations excessives avant le début de la mesure. L'instrumentation des pieux est décrite dans Le Kouby et Rocher-Lacoste (2012) et Le Kouby et Rocher-Lacoste (2016).

3. Résultats des essais de chargement

3.1. Chargement statique

Sur la Figure 2, les courbes de chargement des essais statiques dans le cas de la traction (pieu de 10,5m de long) et de la compression (pieu de 8m de long) sont tracées. La capacité portante mesurée en traction est bien entendue plus faible que celle mesurée en compression. Néanmoins, en ce qui concerne la réponse des pieux dans la zone des faibles déplacements, il semblerait que le pieu soumis à un effort de traction présente une pente plus élevée. Il est possible que cette observation soit uniquement due à la différence de longueur entre les deux pieux.

Des problèmes expérimentaux ont empêché l'enregistrement des jauges sur les derniers paliers pendant l'essai LF1/TS1. Il n'est donc pas possible de représenter les frottements locaux. Dans le cas de l'essai statique L-F4/CS1, la distribution des efforts le long du pieu est présentée sur la Figure 2. Les courbes de distribution des efforts montrent bien que ce sont bien les tronçons les plus profonds qui reprennent le plus de charges. L'effort de pointe est de l'ordre de 259 kN.

En outre, les frottements mesurés pour l'essai de compression ne sont pas complètement transférables à l'essai de traction car entre 6 et 8 m, il est fort probable que les frottements sont influencés par la pointe. On considère en général que jusqu'à une distance de 5 diamètres de pieu, le frottement latéral est influencé par la pointe pour un essai de compression.

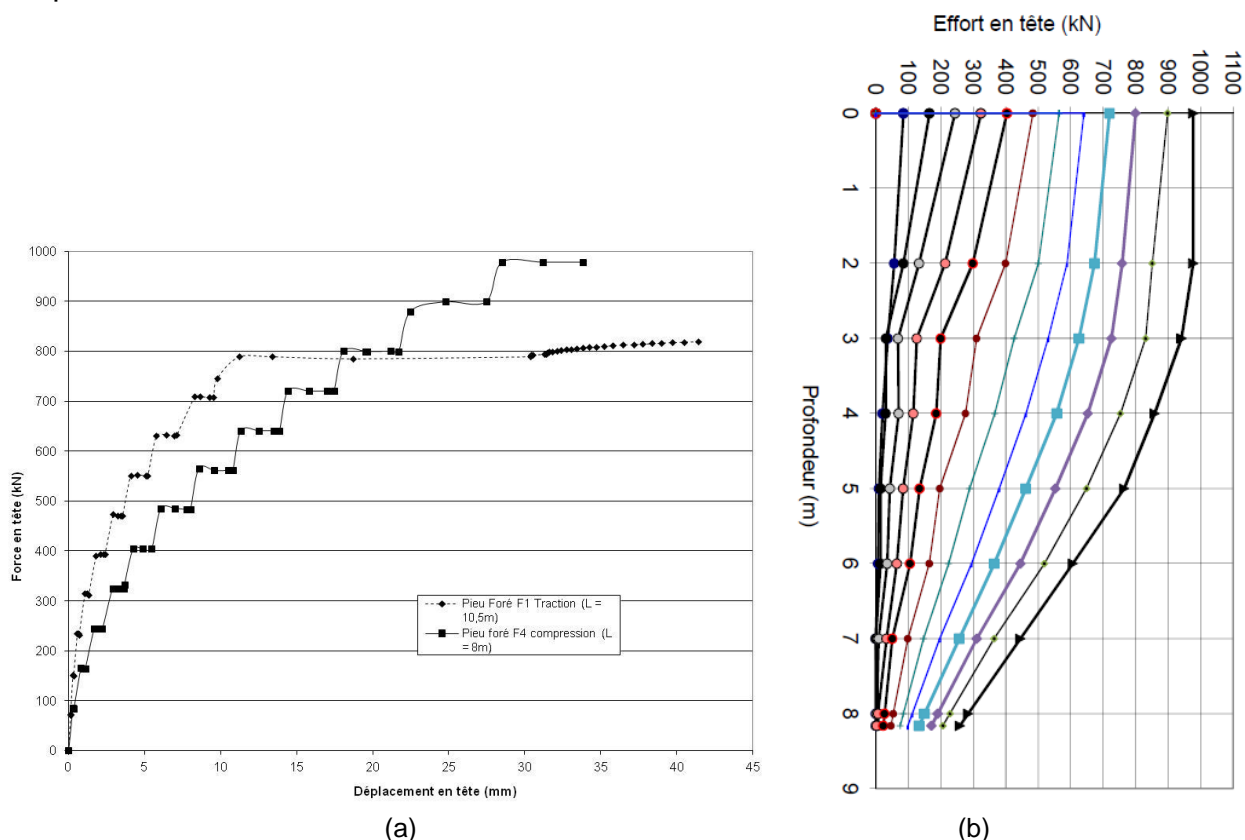


Figure 2 (a) Courbe effort – Déplacement en tête pour les pieux forés soumis à un chargement statique en traction (L-F1/TS1) et en compression (L-F4/CS1) et (b) Distribution des efforts le long du pieu pendant les différents paliers de chargement pour l'essai L-F4/TS1.

3.2. Chargement cyclique

Deux procédures d'essai ont été effectuées pour étudier la réponse des pieux sous sollicitations cycliques.

Dans le cas de la traction, pour le pieu F1, un essai statique de référence a été effectué jusqu'à la rupture suivi de séquences cycliques.

Sur la Figure 3, les quatre séquences sont traitées en termes de distribution des efforts le long du pieu entre le premier et le dernier cycle pour l'effort maximum.

Dans le cas de la séquence TC2 (charge maximale de 280 kN), on observe une mobilisation plus importante du frottement entre les tronçons compris entre 2 et 4m à N = 126 par rapport à N = 1. Ces tronçons sont plus sollicités et l'interface sol-pieu peut se dégrader. L'essai statique après cette séquence aboutit à une valeur de portance de 234 kN (portance de référence L-F1/TS1 : 800 kN) soit une perte de résistance assez importante.

- Le pieu F2 ne subit que des sollicitations cycliques. Pour une charge cyclique maximale de 555 kN soit 70% de la charge de rupture, on constate encore que ce sont les tronçons compris entre 2 et 4m qui reprennent de plus en plus d'effort entre N = 1 et N = 367. La dégradation est telle que la portance mesurée lors de l'essai statique après cycle atteint 439 kN soit une perte de 45%. Cette dégradation est néanmoins moins importante que celle observée dans le cas de la séquence TC2 (charge

maximale de 280 kN) du pieu F1 où le pieu a perdu 81 % de sa capacité portante. Le chargement statique initial a donc une influence non négligeable sur l'histoire du chargement. Ainsi dans le cas de la traction, les résultats du pieu F2 nous serviront donc pour l'établissement du diagramme de stabilité et pour l'estimation du facteur de dégradation. De plus, dans le cas de l'essai L-F2/TC2 (charge maximale à 50% de la capacité portante mesurée lors de l'essai –F2/TR1), peu de différences de distribution des efforts le long du pieu sont observées (Figure 4 (b)). Cependant, lors de l'essai L-F2/TR2, on observe encore une diminution de l'ordre de 50% de la capacité portante. Il semblerait donc que l'on ait atteint un niveau de résistance résiduel à l'interface sol pieu. Sur la Figure 4 (b), les distributions des efforts des essais TR1 et TR2 après cycles pour le pieu F2 montrent une distribution assez homogène des efforts. Ainsi, on remarque la distribution des efforts est telle que c'est à partir de la profondeur de 3m que les différences sont à observer. Dans le cas du pieu F1, pour les chargements statiques après cycles, ce n'est qu'à partir de la profondeur de 5m que des différences apparaissent entre TR1 et TR2.

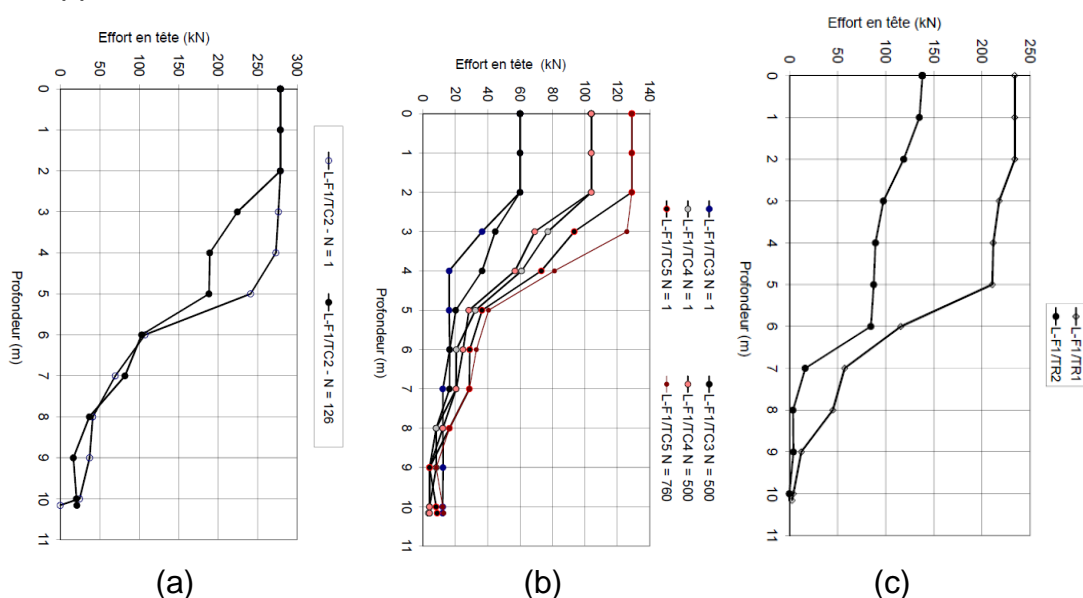


Figure 3 Pieu F1 – Distribution des efforts entre le premier et le dernier cycle de chaque séquence cyclique (a) TC2 et (b) TC3, TC4 et TC5.

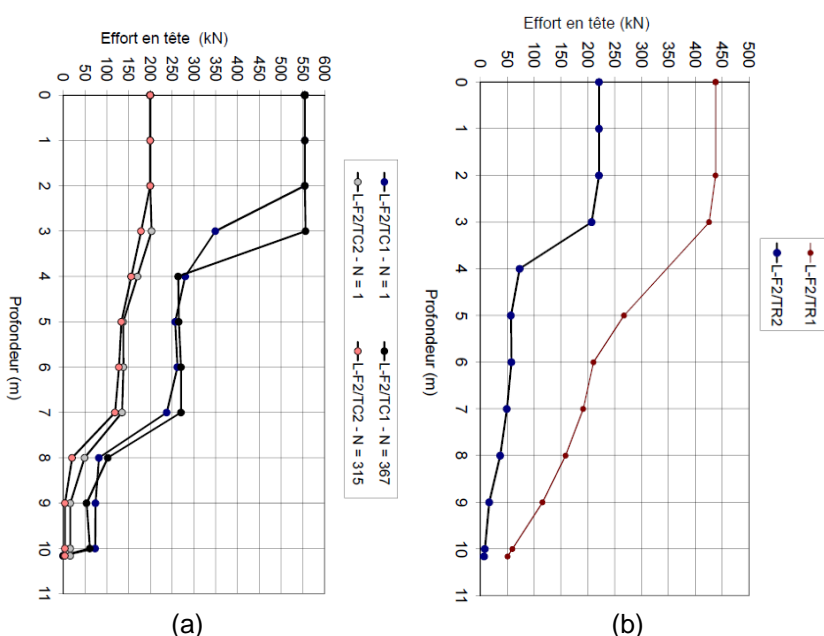


Figure 4 Pieu F2 – Distribution des efforts entre le premier et le dernier cycle de chaque séquence cyclique TC1 et TC2.

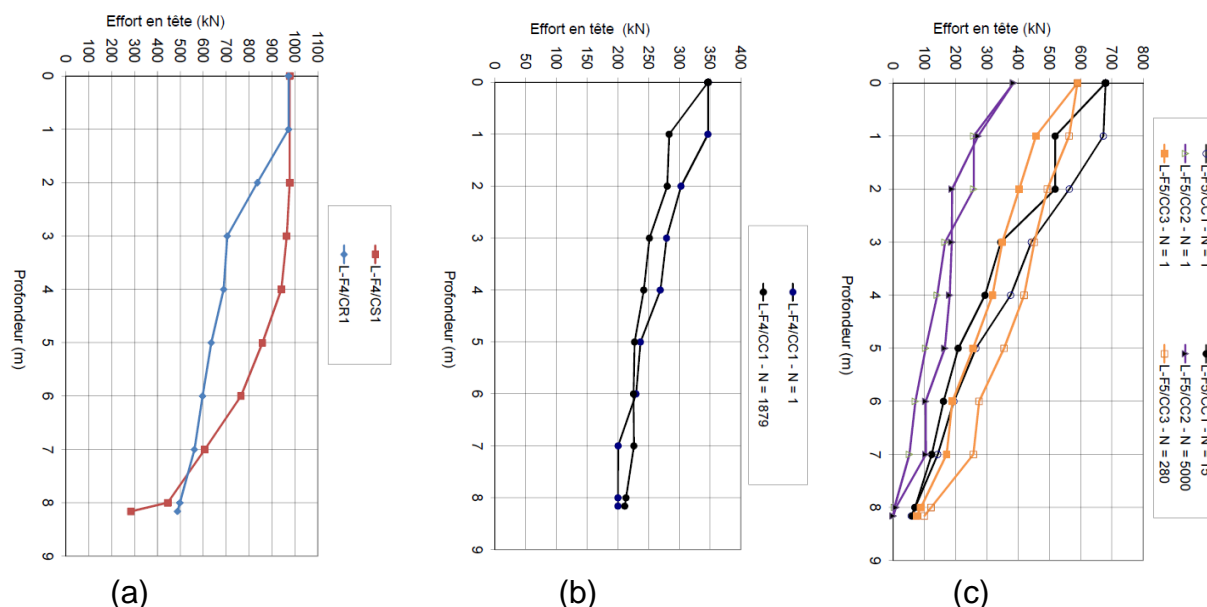


Figure 5 Distribution des efforts entre le premier chargement statique et le second (a), entre le premier et le dernier cycle de chaque séquence cyclique (b) Pieu F4 séquence CC1 et (c) Pieu F5 séquences CC1, CC2 et CC3

4. Discussion autour de la détermination en laboratoire du facteur de dégradation

Il a été défini par Poulos (1982). Il repose sur l'utilisation du modèle de Matlock & Foo (1979) cité par Poulos (1982) : $D_{\tau} = (D_{\tau-1} - D_{\tau\text{lim}}) (1-\lambda) + D_{\tau\text{lim}}$ pour la détermination du facteur de dégradation du frottement latéral.

Avec D_{τ} : facteur de dégradation, $D_{\tau\text{lim}}$: facteur de dégradation limite (minimum), λ Taux de dégradation et $D_{\tau-1}$ facteur de dégradation pour le cycle précédent.

Ce modèle est utilisé dans le logiciel SCARP développé par Poulos (1989) qui permet de calculer la réponse d'un pieu soumis à des sollicitations cycliques en termes de facteur de dégradation et d'accumulation de déplacements.

Poulos (1982) a déterminé les paramètres du modèle à partir d'essais à déplacement contrôlé sur des pieux en modèles réduits en chambre d'étalonnage au laboratoire. Plusieurs amplitudes de déplacement ont été testées pour déterminer des facteurs de dégradation. La procédure est la suivante : un essai sur un pieu en déplacement contrôlé pour avoir la capacité portante de référence, puis sur un autre pieu un essai cyclique à déplacement contrôlé pour une amplitude de déplacement fixé à un nombre de cycles défini, enfin un essai sur un pieu en déplacement contrôlé pour avoir la capacité portante en traction après cycles. Le facteur de dégradation sera calculé comme étant le rapport entre la capacité portante après cycles et la capacité portante de référence. Poulos (1982) a réalisé ces essais pour plusieurs amplitudes de déplacement pour $N = 10$ pour un pieu foncé. Ces valeurs ont été utilisés dans le cadre de SOLCYP (Delimi et Puech, 2016).

La même procédure a été utilisée par Le Kouby et al. (2004) pour déterminer des facteurs de dégradation dans un sable siliceux de type sable de Fontainebleau suivant la méthode classique proposée par Poulos (1982) (Figure 7).

Ces valeurs ont été déterminées à partir d'essais en chambre d'étalonnage dans un sable siliceux de type sable de Fontainebleau aux conditions initiales suivantes ($\sigma_v = 125$ kPa, $\sigma_h = 50$ kPa et $I_D = 0,50$) (Le Kouby et al., 2004). Ils ont été déterminés pour deux types de pieux ; le pieu foncé refoulant et le pieu moulé non refoulant. Ce dernier est le cas de figure le plus proche du pieu foré en laboratoire.

En ce qui concerne le pieu foncé, sur la Figure 7 (a), les facteurs de dégradation obtenus pour la méthode classique sont un peu plus faibles que ceux déterminés par Poulos

(1982) sauf pour les valeurs de ρ_c/D (ρ_c : amplitude de déplacement cyclique et D diamètre du pieu) plus faibles que 1% car on est dans le cas de $N = 50$ par rapport à $N = 10$.

Une seconde procédure est proposée qui consiste à calculer le facteur de dégradation à partir du ratio effectué entre la valeur de résistance mesurée au cycle N divisé par la valeur mesurée à $N = 1$ (équivalente à la capacité portante statique). Ce sont les courbes obtenues et intitulées $N = 10$ et $N = 50$ (Figure 7 (b)). Il semblerait que pour $N = 10$, les valeurs obtenues soient assez proches de celles obtenues par Poulos (1982) et donc les valeurs obtenues pour $N = 50$ puissent également être prises en compte pour les pieux refoulants. En outre, peu de différences sont constatées entre les valeurs obtenues pour $N = 50$ (cas classique) et le cas modifié à $N = 50$.

De même, dans le cas du pieu moulé (installé sans refoulement du sol), considéré comme le cas le plus représentatif des pieux forés en laboratoire, les valeurs obtenues sur la Figure 7 (a) sont plus faibles que celles obtenues dans le cas du pieu foncé (refoulant). Ce résultat est typique des résultats généralement obtenus (Poulos and Chan (1986) et Le Kouby et al. (2004)). En outre, si ces facteurs de dégradation sont comparés aux résultats obtenus dans les parties précédentes, ils sont du même ordre de grandeur que ceux obtenus dans le cas du pieu foré pour la partie frottement latéral. De même, peu de différences sont constatées entre les valeurs obtenues pour $N = 50$ (cas classique) et le cas modifié à $N = 50$ (Figure 7 (b)).

La seconde procédure serait à valider sur des nombres de cycles plus élevés, sur une série de séquences cycliques et d'autres matériaux. Néanmoins, elle présente l'avantage de limiter l'effet de l'histoire du chargement sur les essais effectués sur site ; qui sont en général d'un nombre limité. En effet, les chargements monotones avant et après cycles ne seraient pas toujours nécessaires pour déterminer les facteurs de dégradation.

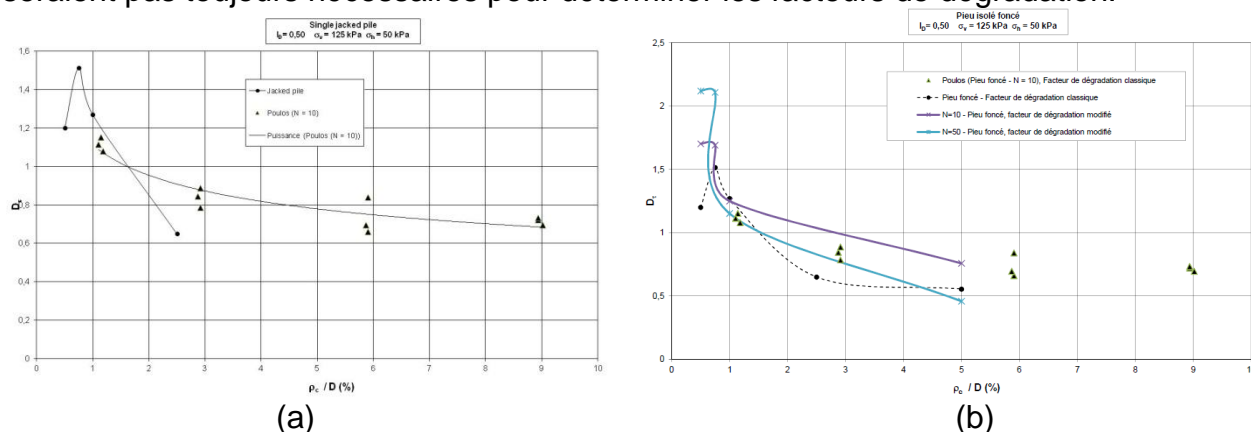


Figure 6 Facteur de dégradation dans le cas du pieu foncé (a) comparaison avec Poulos (1982) avec $N = 50$ et (b) facteur de dégradation modifié à $N = 10$ et $N = 50$.

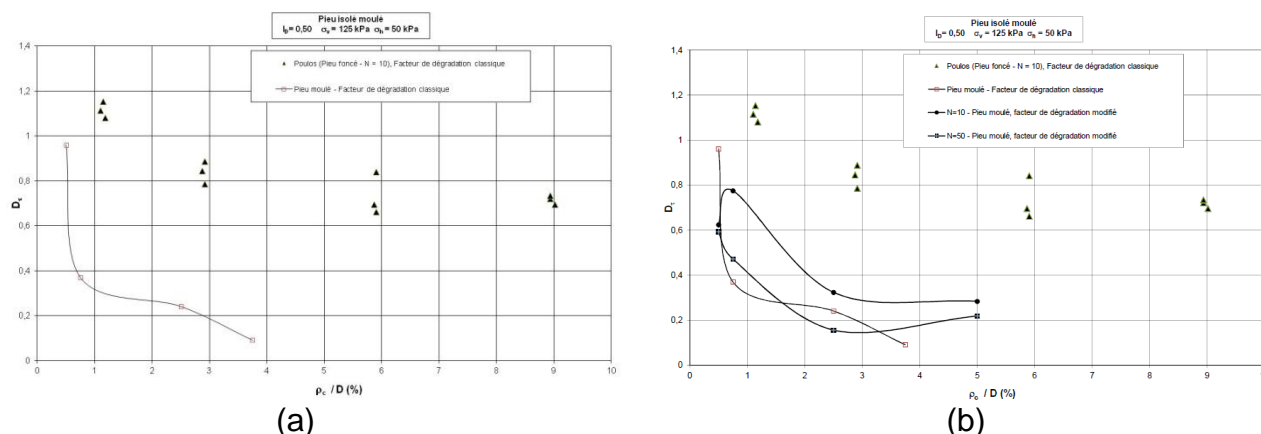


Figure 7 Facteur de dégradation dans le cas du pieu moulé (a) comparaison avec Poulos (1982) avec $N = 50$ (b) facteur de dégradation modifié à $N = 10$ et $N = 50$.

5. Conclusions et perspectives

Le site de Loon Plage a permis de tester la réponse des pieux forés sous sollicitations statiques et cycliques sur une géologie assez homogène, un sable dense dans le cadre du projet de recherche SOLCYP.

Les résultats ont montré qu'il existait des différences entre la réponse des pieux sous chargements cycliques en traction et en compression. En effet, une dégradation du frottement latéral est constatée mais elle est compensée par une augmentation de la résistance en pointe dans le cas de la compression.

En outre, il est remarqué une différence notable dans la procédure d'essai entre les deux cas suivants ; le cas du pieu qui est soumis à un essai statique de référence mené jusqu'à la rupture suivi de séquences cycliques et un autre cas où on commence directement par une séquence cyclique.

L'évolution du frottement latéral et celle de la résistance en pointe pendant une séquence cyclique sont montrées par l'évolution de la distribution des efforts entre le cycle 1 et le cycle N. Le facteur de dégradation est calculé en calculant le ratio entre la résistance obtenue après cycles sur la résistance mesurée lors de l'essai statique.

Dans une seconde partie, une discussion est proposée sur la méthode utilisée pour calculer le facteur de dégradation qui est utilisé dans le modèle de Matlock and Foo (1979). La procédure classique proposée par Poulos (1982) a été utilisée et les valeurs obtenues semblent être assez proches pour le cas d'un pieu refoulant. Une seconde courbe, qui représente l'évolution du facteur de dégradation en fonction de l'amplitude de déplacement pour un pieu non refoulant. La procédure modifiée consiste à déterminer le facteur de dégradation pendant la séquence cyclique et semble donner des valeurs qui sont assez proches de celles obtenues par la procédure classique. Cette seconde procédure serait à valider sur des nombres de cycles plus élevés et sur des séries de séquences cycliques.

6. Références bibliographiques

- AFNOR (1999a) NF P94-150-1 Essai statique de pieu isolé sous effort axial en compression. 29p.
- AFNOR (1999b) NF P94-150-2 Essai statique de pieu isolé sous effort axial en traction. 26p.
- Benzaria, O., Puech, A., Le Kouby, A. (2013). Essais cycliques axiaux sur des pieux battus et forés dans des sables denses. Actes, Congrès international de Mécanique des Sols et de Géotechnique, Paris, septembre 2013, pp.2323-2326.
- Delimi, Z. L., Puech, A. (2016). Comportement cyclique axial de pieux dans le sable – Calibration du programme SCARP. Actes des JNGG 2016, pp. 1-8, Nancy.
- Le Kouby A., Canou J., Dupla J.C. (2004) Behaviour of model piles subjected to cyclic axial loading. International Conference on the cyclic behaviour of soils and Liquefaction Phenomena, Bochum, Germany (31 March – 2 April 2004), pp. 159-166.
- Le Kouby, A., Rocher-Lacoste, F. (2016). Argile des Flandres : Influence du mode d'installation sur la réponse des pieux. Actes des JNGG 2016, pp. 213-220, Nancy.
- Le Kouby, A., Rocher-Lacoste, F. (2012). Effect of Cyclic Axial Loading on the Distribution of Load along a Pile. ASCE Special Publication n°227, pp. 436-451.
- Poulos, H. G. (1982). Influence of cyclic loading on axial pile response. Proceedings of the second International conference on Geotechnical practice in Offshore piling, pp. 419-440.
- Poulos, H. G., Chan, F. K. (1986). Model pile skin friction in Calcareous sand. Journal of Geotechnical Engineering, pp. 235 – 257.
- Poulos, H.G. (1989) Scarp Users's Manual. Center for Geotechnical Research. The University of Sydney.--