

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Comportement de pieux modèles soumis à des chargements cycliques

Behaviour of model piles submitted to cyclic loading

R.Francis, A.Le Kouby, J.Canou & J.C.Dupla – CERMES (ENPC-LCPC), Paris, France

RÉSUMÉ : On présente dans cette communication les résultats d'essais de chargement cyclique réalisés sur des inclusions instrumentées en chambre d'étalonnage. Deux types d'essais ont été réalisés, à savoir des essais à force contrôlée, permettant d'étudier l'accumulation des déplacements au cours des cycles et la stabilité de l'inclusion (diagramme de stabilité cyclique) et des essais à déplacement contrôlé permettant d'étudier l'évolution de la résistance en pointe et des caractéristiques de frottement résultant du chargement cyclique. On met en particulier en évidence l'influence très défavorable de la sollicitation cyclique sur la capacité portante de l'inclusion.

ABSTRACT: This paper presents the results of cyclic loading tests carried out on instrumented model piles in a calibration chamber. Both load-controlled tests, allowing to study the accumulation of displacements during the cycles and the stability of the inclusion (cyclic stability diagram), and displacement-controlled test, allowing to study the evolution of tip resistance and friction characteristics during the cycles, have been carried out. In particular, it is shown that cyclic loading has a very negative influence on loading capacity of the inclusion, in terms of tip resistance and friction.

1 INTRODUCTION

Dans de nombreuses circonstances, les fondations profondes (pieux et micropieux) peuvent être soumises directement ou indirectement à des sollicitations cycliques (séismes, houle, vent, machines vibrantes, etc.) comportant à la fois des composantes horizontales et verticales, pouvant entraîner la ruine de la fondation et de la structure supportée. En fonction du type d'action, caractérisé par des amplitudes et des fréquences de chargement données ainsi qu'un nombre de cycles caractéristique, les mécanismes de rupture peuvent être très divers (enfouissement ou arrachement de l'inclusion, rupture de l'inclusion, liquéfaction du sol autour de l'inclusion, etc.). Dans la plupart des cas, cependant, le chargement cyclique se traduit par une évolution du frottement latéral et de la résistance en pointe mobilisables, qui contrôlent la capacité portante de l'inclusion. On a donc affaire à un problème complexe pour lequel différents travaux, souvent expérimentaux, ont été publiés dans la littérature en vue de mettre en évidence l'influence de tel ou tel paramètre significatif du problème sur les comportements observés. On peut, entre autres, citer les travaux de Chan *et al.* (1980), de l'équipe de Poulos, en Australie (Poulos, 1981; Al Douri, 1992) ou de Chambers (1999).

Dans ce contexte, l'objectif de cette communication est de présenter les résultats d'une étude expérimentale consacrée à l'étude de l'influence de chargements verticaux cycliques sur l'évolution du frottement latéral et de la résistance en pointe mesurés sur un pieu modèle installé dans des massifs de sable (Francis 1997; Le Kouby, 2001).

2 DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET PROCEDURE D'ESSAI

Le dispositif expérimental utilisé se compose d'une chambre d'étalonnage équipée d'un dispositif de chargement permettant d'appliquer, grâce à un servovérin hydraulique, différents types de sollicitations (monotones et cycliques) dans la gamme quasi statique et dynamique à des modèles de pieux installés dans la chambre d'étalonnage.

La chambre d'étalonnage permet de reconstituer par pluviation et de mettre sous contrainte des massifs de sable de 52 cm de diamètre et de 70 cm de haut à indice de densité contrôlé, en suivant une procédure expérimentale très proche d'une procédure tri-

axiale classique (utilisation d'un moule de formage, application du vide, démoulage, etc.). On pourra se reporter à la communication de Plumelle *et al.* (2001) à la présente conférence et au rapport de Canou *et al.* (1994) pour avoir davantage d'informations sur le dispositif et la procédure. En ce qui concerne le modèle utilisé, il s'agit d'une inclusion métallique de 20 mm de diamètre, équipée d'un capteur d'effort de pointe électrique et d'un manchon de frottement à rugosité contrôlée instrumenté, permettant de mesurer la résistance en pointe et le frottement latéral unitaire mobilisés lors des différentes phases d'un essai (installation, chargement, etc.). Le modèle est installé dans le massif de sable par fonçage quasi-statique, à une vitesse de 1 mm par minute et il est ensuite chargé à vitesse beaucoup plus lente suivant le programme sélectionné (monotone, cyclique, etc.).

3 OBJECTIFS ET PROGRAMME D'ESSAIS

3.1 Objectifs

Deux types d'essais ont été réalisés dans le cadre de ce travail, en vue d'étudier la réponse de l'inclusion à des sollicitations cycliques.

Le premier type d'essai, piloté en effort (force contrôlée) permet de mettre en évidence une accumulation de déplacements permanents mesurée en tête de l'inclusion, pouvant avoir une influence significative sur la stabilité du système sol-inclusion et pouvant même le conduire à la rupture. Un diagramme de stabilité cyclique (Poulos, 1988) peut être établi pour un certain nombre de combinaisons de chargements (avec P_m , charge moyenne appliquée initialement et P_c , amplitude du chargement cyclique appliqué, alterné par rapport à P_m) pour un nombre de cycles fixé et pour des caractéristiques initiales de massif données.

Le second type d'essai, piloté en déplacement (déplacement contrôlé), permet d'évaluer l'évolution de la capacité portante des inclusions en termes d'évolution du frottement latéral et de la résistance en pointe, pour un nombre de cycles fixé et pour des caractéristiques initiales de massifs données.

3.2 Programme d'essais

L'ensemble des essais réalisés sont présentés dans le tableau 1. Les essais ont été réalisés dans des massifs de sable de Fontai-

Tableau 1 Descriptif des essais réalisés

Essai	Type	$\frac{P_m}{Q_c}$	$\frac{P_c}{Q_c}$	$\frac{P_m}{Q_t}$	$\frac{P_c}{Q_t}$	ρ mm
CIC1	FC	0,5	0,3	-	-	-
CIC2	FC	0,5	0,2	-	-	-
CIC3	FC	0,3	0,1	-	-	-
CIC4	FC	0,3	0,3	-	-	-
CIC5	FC	0,4	0,3	-	-	-
CIC6	FC	0,4	0,4	-	-	-
CIC7	FT	-0,123	0,074	0,47	0,28	-
CIC8	FT	-0,123	0,1	0,47	0,38	-
CIC9	DC	-	-	-	-	± 1
CIC10	DC	-	-	-	-	± 1
CIC11	DC	-	-	-	-	$\pm 0,1$
CIC12	DC	-	-	-	-	$\pm 0,2$
CIC13	DC	-	-	-	-	$\pm 0,3$
CIC14	DC	-	-	-	-	$\pm 0,4$
CIC15	DC	-	-	-	-	$\pm 0,5$
CIC16	DC	-	-	-	-	$\pm 0,75$
CIC17	DC	-	-	-	-	± 1
CIC18	DC	-	-	-	-	$\pm 1,25$
CIC19	DC	-	-	-	-	$\pm 1,5$
CIC20	DC	-	-	-	-	± 2

nebleau sec, qui est un sable de référence utilisé de manière assez courante en France. Ce sable est un sable relativement fin ($D_{50} = 200 \mu\text{m}$, $e_{max} = 0,94$, $e_{min} = 0,54$, $\gamma_s = 26,5 \text{ kN/m}^3$) à grains sub-arrondis. Huit essais (essais CIC1 à CIC8) ont été réalisés à force contrôlée en compression (FC) ou en traction (FT), pour un même état initial de massif, caractérisé par un indice de densité initial I_{Di} de 0,50 (état de compacité intermédiaire) et un état de contrainte appliqué du type K_0 ($K_0 = 0,40$,

$\sigma'_{vo} = 250 \text{ kPa}$, $\sigma'_{ho} = 100 \text{ kPa}$). Douze essais ont été réalisés à déplacement contrôlé (DC) (essais CIC9 à CIC20), permettant en particulier d'étudier l'influence de l'amplitude cyclique du déplacement ρ (cycles alternés à $\pm \rho$) sur les comportements observés, pour un état de contrainte initial correspondant à une contrainte verticale σ'_{vo} de 125 kPa et une contrainte horizontale σ'_{ho} de 50 kPa. Les essais cycliques réalisés à force contrôlée sont caractérisés par les paramètres suivants : Q_c , charge de rupture en enfoncement monotone, Q_t , charge de rupture en arrachement monotone, P_m , charge moyenne statique appliquée initialement avant le chargement cyclique, P_c , amplitude du chargement cyclique appliqué en tête. Les chargements cycliques appliqués sont alternés symétriques par rapport à l'état initial défini par P_m ($\pm P_c$). En ce qui concerne les essais réalisés à déplacement contrôlé, ceux-ci sont aussi alternés, symétriques par rapport à l'état initial après installation de l'inclusion ($\pm \rho$).

4 ANALYSE DES RESULTATS

4.1 Essais à chargement contrôlé

Les essais à chargement contrôlé ont pour but d'étudier le comportement d'un pieu sous chargement cyclique en terme de stabilité c'est à dire en évaluant, pour une combinaison de chargement donnée, l'accumulation des déplacements qui, au delà d'un certain niveau, va conduire à la rupture du système sol-inclusion. On présente sur les figures 2 (a et b) un résultat typique d'essai cyclique réalisé à charge contrôlée, en termes de courbes d'évolution du frottement latéral et de la résistance en pointe mesurés sur le manchon de frottement et sur le capteur de pointe respectivement au cours de la sollicitation (essai CIC5, chargement cyclique d'enfoncement). La charge moyenne imposée en tête de l'inclusion est de $0,4 Q_c$ pour cet essai, la charge cyclique appliquée étant de $0,3 Q_c$ et le nombre de cycles appliqué étant de 50.

On observe des évolutions opposées pour le frottement et pour la pointe avec une augmentation progressive de la pointe et une diminution progressive du frottement mobilisés, au cours des cy-

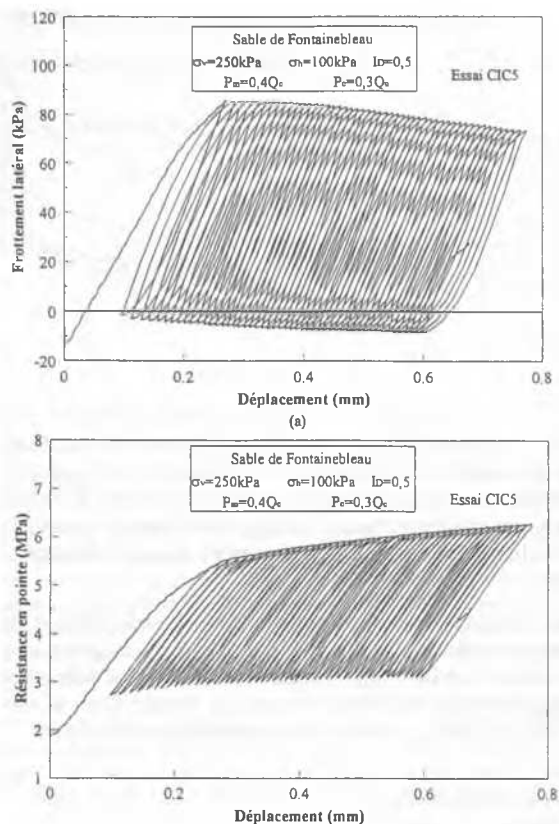


Figure 2 Mobilisation du frottement latéral (a) et de la résistance en pointe (b) au cours du chargement cyclique (essai CIC5) (Francis, 1997)

cles. Ce phénomène rend compte d'une contribution croissante de la pointe à la reprise de l'effort appliqué en tête et d'une diminution correspondante du frottement mobilisé nécessaire pour assurer l'équilibre global de l'inclusion.

L'accumulation des déplacements verticaux au cours des cycles peut également être mise en évidence à partir de la figure 2. On constate que l'on a un taux d'accumulation initialement élevé sur les premiers cycles, qui a ensuite tendance à se stabiliser. Au bout des 50 cycles, l'inclusion a accumulé un déplacement d'environ 0,60 mm (3% du diamètre de l'inclusion).

A partir des essais réalisés à force contrôlée, on a cherché à établir un diagramme de stabilité cyclique pour notre inclusion, tel que défini par Poulos (1988). Ce diagramme consiste à représenter, pour une configuration donnée correspondant à un type d'inclusion et un état initial du sol, différentes combinaisons de chargement caractérisées par un état statique initial (P_m/Q_c pour la compression P_m/Q_c pour la traction) et une amplitude de chargement cyclique (P_c/Q_c et P_c/Q_t pour des sollicitations d'enfoncement et d'arrachement respectivement). L'ensemble des combinaisons possibles dans le plan correspondant définit une zone triangulaire limitée par les segments de droite correspondant à la rupture monotone en enfoncement (segment FC sur la figure 3) et en arrachement (segment FT sur la figure 3). A l'intérieur de ce diagramme, défini pour un nombre de cycles donné (Poulos utilise 50 cycles dans ses travaux), trois zones différentes sont définies : une zone stable, pour laquelle le déplacement vertical accumulé au bout de 50 cycles est inférieur à $0,10d$, d étant le diamètre de l'inclusion, une zone intermédiaire, appelée zone métastable et une zone instable, pour laquelle le déplacement accumulé au bout de 50 cycles est supérieur à $0,10d$. Le diagramme de stabilité cyclique est donc associé à une valeur de N fixée ($N=50$ ici).

A partir des essais réalisés, on a évalué les déplacements accumulés au bout de 50 cycles que l'on a reportés dans le tableau 2, ce qui a permis de classifier les essais en termes de stabilité (tableau 2) et d'élaborer le diagramme de stabilité cyclique correspondant à notre configuration (fig. 3). Les points représentatifs

Tableau 2 Déplacements permanents et zones de stabilité correspondantes (Francis, 1997)

Essai	Déplacements accumulés	Zone
CIC1	2,86 mm (15% ϕ)	Instable
CIC2	2,2 mm (11% ϕ)	Instable et Métastable
CIC3	0,026 mm (0,13% ϕ)	Stable
CIC4	0,63 mm (3,1% ϕ)	Métastable
CIC5	0,55 mm (2,75% ϕ)	Métastable
CIC6	2 mm (10% ϕ)	Instable
CIC7	0,33 mm (1,65% ϕ)	Métastable
CIC8	3,7 mm (18,5% ϕ)	Instable

des essais réalisés sont répertoriés en comportements stables, métastables et instables, ce qui permet de délimiter, de manière approximative, en raison du nombre d'essais relativement faible, la zone stable, la zone métastable et la zone instable.

4.2 Essais à déplacement contrôlé

Ce type d'essai permet de mettre en évidence l'évolution des caractéristiques d'interface en termes de frottement mobilisable le long du manchon et de résistance en pointe, au cours de l'application de cycles symétriques pilotés en déplacement. La figure 4 présente un résultat d'essai typique correspondant à une amplitude cyclique appliquée de ± 1 mm (soit $\pm 5\%$ du diamètre de l'inclusion, essai CIC9) en termes de chargement global appliqué en tête, de frottement latéral et de résistance en pointe en fonction du déplacement.

En terme de charge globale appliquée en tête de l'inclusion, on met en évidence une forte dégradation résultant du cyclage, avec une charge maximale à rupture d'environ 3,3 kN lors du chargement initial, qui n'est plus que de 2 kN environ lors du rechargement après cyclage, avec un taux de mobilisation beaucoup plus faible.

En terme de frottement latéral, on observe là-aussi une forte dégradation des propriétés d'interface entre le chargement statique initial et le rechargement après cyclage (environ 37% seulement du frottement initial mobilisable après cyclage), que l'on peut attribuer à un mécanisme de contractance cyclique à l'interface ayant pour effet de réduire le niveau de la composante normale des contraintes à l'interface et donc le frottement moyen mobilisable. L'allure des boucles successives de frottement correspond bien à un phénomène typique de ramollissement cyclique, rendant compte de la décroissance progressive du niveau de contrainte normale à l'interface.

En ce qui concerne la résistance en pointe, on observe, là-aussi, une forte réduction de la résistance en pointe mobilisable

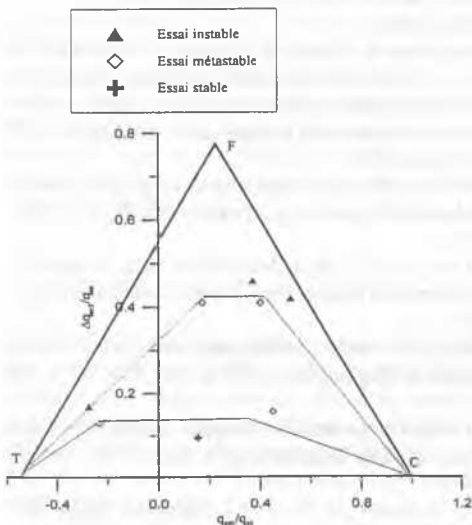


Figure 3 Diagramme de stabilité cyclique correspondant aux essais présentés (Francis, 1997)

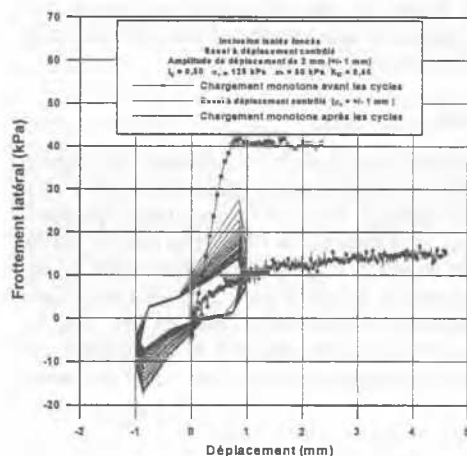
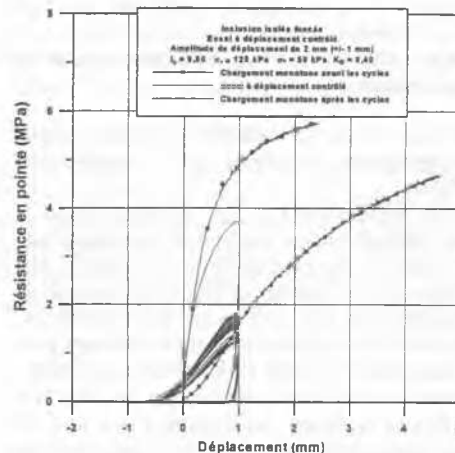
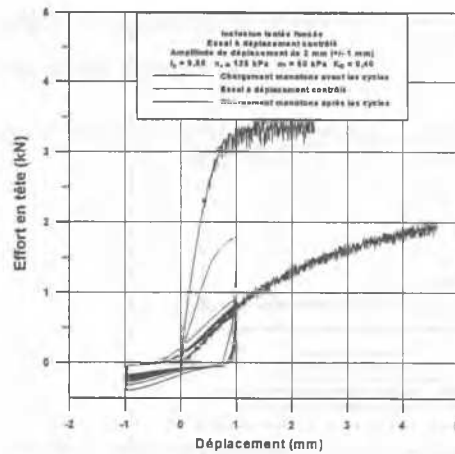


Figure 4 Charge en tête, résistance en pointe et frottement latéral (déplacement contrôlé, essai CIC9)

lors du rechargement statique après cyclage, avec une mobilisation moins rapide. La résistance de pointe maximale atteinte après cyclage est égale à environ 75% de la résistance maximale atteinte lors du premier chargement (valeurs maximales, ne correspondant pas à des paliers, non encore atteints). La dégradation de la résistance en pointe peut s'expliquer par un phénomène de foisonnement et de relâchement des contraintes sous la pointe induits par les phases d'arrachement.

La dégradation de la résistance en pointe peut s'expliquer par un phénomène de foisonnement et de relâchement des contraintes sous la pointe induits par les phases d'arrachement.

La figure 5 présente l'évolution, lors de la séquence cyclique, du frottement maximal mobilisé lors d'un cycle en fonction du nombre de cycles appliqués, et ceci pour deux amplitudes de déplacement ($\pm 0,2$ mm et ± 1 mm). On met en évidence une in-

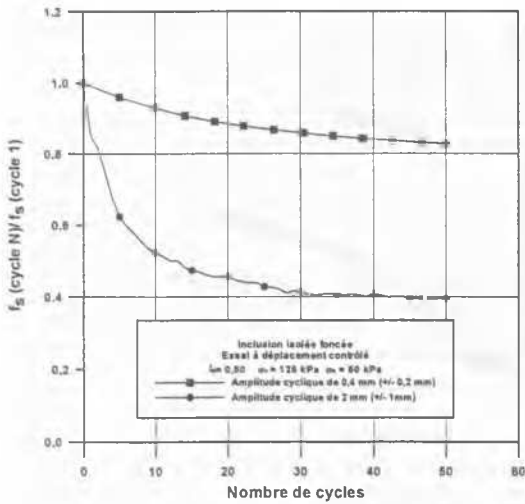


Figure 5 Evolution du frottement maximum mobilisable au cours du chargement cyclique en déplacement

fluence significative du niveau de l'amplitude cyclique appliquée, avec une dégradation beaucoup plus rapide pour l'amplitude la plus forte.

En terme de facteur de dégradation D_r , égal au rapport entre le frottement maximum mobilisable en chargement monotone quasi-statique, après et avant la séquence cyclique, la figure 6 permet de mettre en évidence deux régimes différents en fonction de l'amplitude cyclique appliquée, avec une valeur de ce coefficient supérieure à 1 (augmentation du frottement après cyclage) pour les faibles valeurs d'amplitude cyclique (inférieures ou égales à 0,3 mm) et un valeur du coefficient inférieure à un (dégradation) pour des amplitudes cycliques supérieures à 0,3 mm. On constate que l'on a un maximum égal à 1,28 pour une amplitude de 0,2 mm et que le facteur de dégradation diminue ensuite très rapidement pour se stabiliser à une valeur de l'ordre de 0,40 pour des amplitudes supérieures ou égales à 1,25 mm.

5 CONCLUSIONS

Les résultats présentés dans cette communication ont permis de décrire deux aspects du comportement de pieux modèles sous sollicitation cyclique verticale, à savoir l'accumulation progressive des déplacements et la stabilité de l'inclusion dans le cas de sollicitations pilotées en effort d'une part et, d'autre part, la dégradation de la résistance en pointe et du frottement latéral dans des sollicitations pilotées en déplacement. Dans les deux cas, on met en évidence une influence très négative du chargement cyclique appliqué sur le comportement ultérieur de l'inclusion.

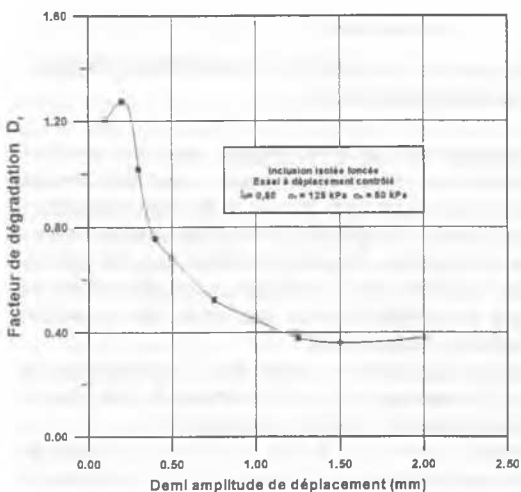


Figure 6 Evolution du facteur de dégradation (relatif à f_s) en fonction de la demi amplitude (ρ)

Dans le cas des sollicitations pilotées en effort, le concept de diagramme de stabilité cyclique est intéressant car un tel diagramme, qui peut être élaboré à partir de quelques points, peut ensuite permettre de prévoir avec une assez bonne précision les comportements qui pourront être observés sous d'autres combinaisons de chargements.

Ce diagramme est établi pour un nombre de cycles donné (50 cycles ici) et il pourra être intéressant de s'intéresser à l'évolution des zones stables, métastables et instables lorsque l'on change ce nombre de cycles.

En ce qui concerne l'étude de l'évolution des propriétés de frottement d'interface, réalisée à déplacement contrôlé, on met en évidence deux régimes différents, avec des valeurs du facteur de dégradation supérieures à un (effet positif du chargement cyclique) pour les faibles valeurs de l'amplitude en déplacement (valeurs inférieures à environ 0,3 mm), qui chutent ensuite très rapidement lorsque l'amplitude du déplacement imposé croît, pour se stabiliser à une valeur palier de l'ordre de 0,40 pour les plus grands déplacements. On a, ici aussi, fixé le nombre de cycles appliqués à 50, et il pourra être intéressant, comme pour les essais pilotés en effort, de s'intéresser à des nombres de cycles plus importants, en particulier dans le domaine des faibles amplitudes.

6 REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier le projet national français FOREVER sur les micropieux dans le cadre duquel ces recherches ont été réalisées.

7 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Al Douri, R.H. 1992. Behaviour of single piles and pile groups in calcareous sediments. *Ph.D. Thesis*, University of Sydney. Australia, 529p.
- Canou, J., Dupla, J.-C., Francis, R., de Laure, E., Belmont, G. 1994. Mise au point du dispositif en chambre d'étalonnage pour essais sur micropieux modèles. *Rapport FO/93/13, projet national FOREVER*, 24 p.
- Chambers, A. 1999. The seismic response of drilled shaft foundations. *Ph.D. Thesis*, University of Canterbury. New Zealand, 209 p.
- Chan, S., Hanna, T.H. 1980. Repeated loading on single piles in sand. *Journal of The Geotechnical Engineering Division, ASCE*, vol. 106, N° GT2., pp. 171-188.
- Francis, R. 1997. Etude du comportement mécanique de micropieux modèles en chambre d'étalonnage. Application aux effets de groupe. *Thèse de doctorat de l'ENPC*, 383 p.
- Le Kouby, A. Contribution à l'étude des pieux et micropieux sous chargement monotone et cyclique. *Thèse de doctorat de l'ENPC*, en cours, à paraître en 2001.
- Plumelle, C., Gangneux, P., Frank, R., Canou, J., Estephan, R., Foray, P., Garnier, J. Différentes approches du comportement des groupes et des réseaux de micropieux, en modèle réduit, en modèle centrifugé et en vraie grandeur, *accepté pour publication, 15th ICSMGE*, Istanbul, août 2001.
- Poulos, H.G. 1981. Cyclic axial response of single pile, *Journal Of The Geotechnical Engineering Division, ASCE*, vol. 107, N°. GT1., pp. 41-58.
- Poulos, H.G., Chan, F.K. (1986). Model pile skin friction in calcareous sand," *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, pp. 235-257.
- Poulos, H.G. (1989). Cyclic axial loading analysis of piles in sand. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, vol. 115, N° 6, pp. 836-852.
- Poulos, H.G. (1988). Cyclic stability diagram for axially loaded piles. *Journal of Geotechnical Engineering Division, Vol. 114, N° 8*, pp. 877-895.
- Turner, J.P. and Kulhawy, F. H. (1990). Drained Uplift Capacity Of Drilled Shafts Under Repeated Axial Loading," *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, vol. 116, n°. 3, pp. 470-491