

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 d'un pieu isolé soumis à un chargement cyclique horizontal

Behaviour of a pile subjected to a cyclic horizontal loading

J. Rakotonindriana, A. Le Kouby, Ph. Mestat
Université Paris-Est, LCPC Paris, France

L. Thorel
Université Nantes Angers Le Mans, LCPC Nantes, France

RÉSUMÉ

Un modèle réduit de pieu isolé instrumenté, installé dans du sable de Fontainebleau sec, est soumis à un chargement cyclique horizontal à grand nombre de cycles (25000) dans la centrifugeuse du LCPC Nantes. L'évolution des déplacements en tête, des moments le long du pieu et des courbes p-y avec le nombre de cycles est présentée dans le cas d'un sable moyennement dense. Le déplacement en tête et le moment maximal dans le pieu augmentent avec le nombre de cycles. Après le chargement cyclique, un chargement monotone fait apparaître que le comportement (déplacements, moments résiduels) est influencé par le nombre de cycles appliqués. Pour les courbes p-y, on observe une diminution de la résistance p.

ABSTRACT

A single model pile is installed in dry Fontainebleau Sand in the Centrifuge of the LCPC Nantes. It is submitted to cyclic horizontal loading with a large number of cycles ($N = 25\ 000$). The evolution of pile head displacement, bending moments along the pile as well as p-y curves are presented in the case of a medium dense sand. Pile head displacement and maximum moment increase with the number of cycles. After cyclic loading, a monotonic loading shows that the behavior of the pile (displacement, residual moments) relied on the number of applied cycles. As far as p-y curves are concerned, we notice a decrease of the resistance p.

Mots-clés : Pieu, chargement cyclique, chargement horizontal, centrifugeuse

Keywords : Pile, cyclic loading, horizontal loading, centrifuge

1 INTRODUCTION

Les pieux permettent de reprendre les charges de la superstructure et de les transmettre au sol, en profondeur. Ces charges peuvent comporter une composante horizontale variable dans le temps. Le chargement transmis au pieu est alors comparable à un chargement cyclique horizontal en tête de pieu. C'est le cas notamment des structures soumises aux effets de la houle, du vent, aux vibrations des machines, au freinage de véhicules, etc.

Le chargement cyclique horizontal d'un pieu influe sur son comportement. Plusieurs essais in situ (Cheang & Matlock, 1983 – Little & Briaud, 1988 – Hadjadji, 1993) et en centrifugeuse (Rosquoët, 2004 - Kikuchi, 2008) ont été réalisés pour étudier son effet sur le déplacement en tête ou sur le moment dans le pieu. En général, une augmentation du moment maximum ou une accumulation de déplacements en tête sont observées. Une réduction de la résistance mobilisable, sur la base d'essais limité à 1000 cycles (Reese & al., 1974 – Long & Vanneste, 1994), est la solution généralement proposée pour tenir compte du chargement cyclique. Les résultats des essais réalisés sur le site de Plancoët (Hadjadji, 1993) dans un sol multicouche et en centrifugeuse (Kikuchi, 2008) dans du sable montrent pourtant la nécessité d'étudier l'influence d'un plus grand nombre de cycles.

Une étude expérimentale sur des modèles réduits a été réalisée en centrifugeuse au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) à Nantes. Elle concerne l'influence du chargement cyclique horizontal sur le comportement d'un pieu, pour un grand nombre de cycles.

2 DISPOSITIF ET PROGRAMME EXPERIMENTAL

Un pieu isolé, installé à 1g dans un massif de sable de Fontainebleau NE34 moyennement dense ($48\% < I_D < 50\%$), reconstitué par pluviométrie dans l'air, est soumis en centrifugeuse à un chargement horizontal cyclique. Sous une accélération centrifuge de 40g, le modèle est testé à l'échelle du 1/40^{ème}.

I_D représente l'indice de densité du sable qui traduit l'état de compacité du massif de sable étudié.

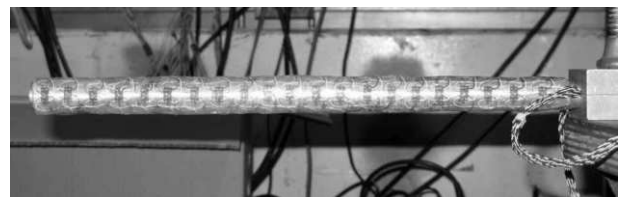


Figure 1. Pieu instrumenté avec 20 paires de jauges (longueur du pieu sur la figure : 330 mm)

2.1 Pieu instrumenté et dispositif expérimental

Le pieu modèle instrumenté de 20 paires de jauges a une fiche de 300 mm et un diamètre de 18 mm, il représente un pieu prototype ayant une fiche de 12 m, un diamètre de 0,72 m et une rigidité en flexion EI de 476 MN.m² (Rosquoët et al., 2007).

Les jauges, montées en demi-pont, sont espacées de 15 mm avec une précision de 0,1mm. Les perçages pour le passage des câbles sont réalisés sur la fibre neutre à 5 mm au-dessus de la jauge afin de ne pas perturber les mesures. Les jauges sont protégées par une couche d'époxy et une couche de silicone transparent (Figure 1).

Le diamètre du pieu ($B=18$ mm) est 81 fois plus grand que le d_{50} du sable (0,22 mm), vérifiant ainsi la règle courante ($B/d_{50} \geq 30$) pour laquelle on s'affranchit des effets d'échelle dans le cas des pieux sous charge latérale (Garnier et al., 2007).

Un servo-vérin hydraulique permet d'appliquer la sollicitation en tête du pieu. L'effort est transmis au pieu à l'aide d'un fil métallique afin de ne pas créer de moment fléchissant au point d'application. La mesure de l'effort appliqué est réalisée à l'aide d'un capteur de force situé entre le servovérin et le pieu. Les déplacements en tête du pieu sont mesurés avec deux capteurs de déplacement situés de part et d'autre du point d'application du chargement (Figure 2). On détermine le déplacement au point de chargement par une interpolation linéaire entre les deux valeurs mesurées.

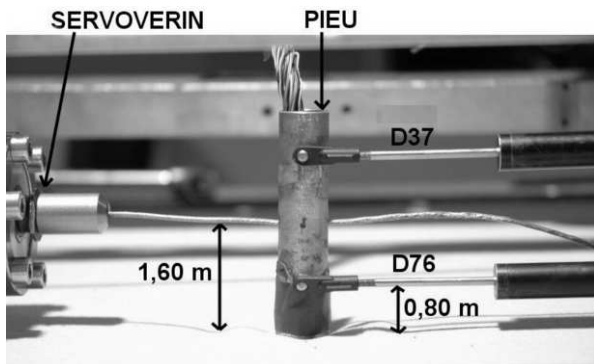


Figure 2. Dispositif expérimental pour le chargement latéral (valeurs prototypes)

Le point de chargement est situé à 4 cm au dessus du sol en valeur modèle, soit à 1,6 m en valeur prototype. Dans tous les essais, la contrainte engendrée dans le pieu par le chargement est toujours inférieure à la limite élastique du pieu.

2.2 Programme expérimental

Le programme inclut des chargements monotones, cycliques, et une succession de ceux-ci. Des essais préliminaires à 0,1 – 0,5 et 1 Hz (fréquence modèle), ont montré que ces chargements cycliques produisent des déplacements cycliques similaires. C'est pourquoi la fréquence de chargement retenue est de 1Hz.

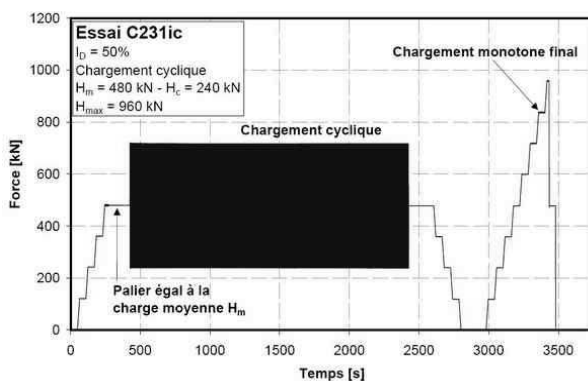


Figure 3. Procédure de chargement pour les essais cycliques

La procédure de chargement est décrite sur la Figure 3 et les caractéristiques des essais sont résumées dans le Tableau 1. Le chargement en paliers permet d'atteindre la charge moyenne H_m . Puis, commence le chargement cyclique autour de cette charge moyenne H_m avec une amplitude de $\pm H_c$. A la fin du chargement cyclique, on revient à zéro, puis on effectue un chargement monotone "final" jusqu'à $H_{max}=960$ kN.

Tableau 1. Récapitulatif des caractéristiques des essais étudiés

Essais	I_D , %	H_m , kN	H_c , kN	Nombre de cycles N
C231ic	50,3	480	240	1000
C241ic	50,3	480	240	25000
C411is	48,0	-	-	Monotone
C421ic	48,0	480	240	1000
C1231ic	48,8	480	240	25000

3 RESULTATS TYPIQUES

3.1 Déplacements en tête du pieu

Le chargement cyclique engendre une accumulation de déplacements pour le pieu (Figure 4). Plus importante durant les premiers cycles, elle semble se stabiliser ensuite.

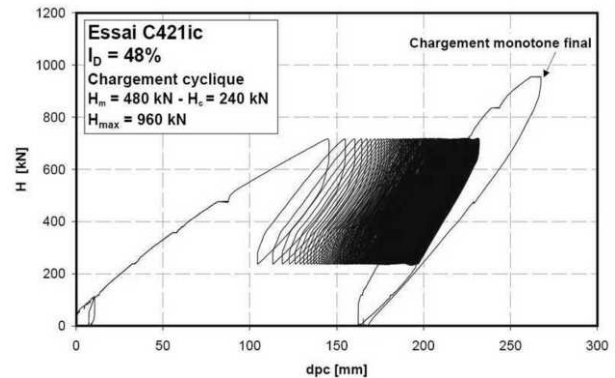


Figure 4. Déplacement dpc au point de chargement en fonction du chargement cyclique

En effet, l'accumulation des déplacements et l'énergie dissipée au cours de chaque cycle s'amenuisent avec la répétition des cycles. Les essais réalisés in situ par Little et Briaud (1988) et Hadjadji T. (1993) affichent aussi des résultats comparables.

La pente initiale de la courbe force-déplacement lors du chargement monotone jusqu'au palier est plus faible comparée à celle des cycles et à celle du chargement monotone final. Ce qui traduit une augmentation relative du module du sol.

3.2 Moments dans le pieu

Les vingt paires de jauges de déformations collées sur le pieu permettent, après calibration, d'obtenir le profil des moments.

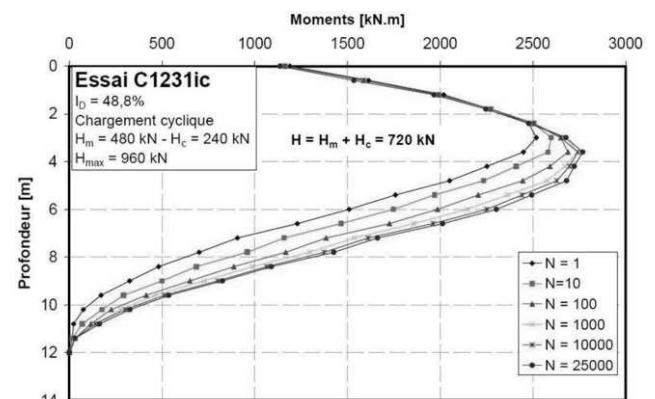


Figure 5. Evolution des moments dans le pieu en fonction du nombre de cycles pour le chargement cyclique maximal

La Figure 5 montre l'influence du nombre de cycles sur les profils de moment fléchissant correspondant au chargement cyclique maximal $H=H_m+H_c$.

Entre les profondeurs $z = 0$ m et $z = 2,4$ m, on n'observe qu'une très faible évolution des moments avec le nombre de cycles. Au-delà de $z = 2,4$ m, le moment dans le pieu augmente avec le nombre de cycles. Néanmoins, cette augmentation, si

elle est relativement importante au début des cycles, semble réduite avec l'augmentation du nombre de cycles. Des résultats comparables ont été observés par Verdure et al. (2003), Rosquoët et al. (2007) en centrifugeuse pour quelques dizaines de cycles, et par Little et Briaud (1988) in situ. Les essais réalisés sur le site de Plancoët par Hadjadji T. (1993) montrent aussi une augmentation continue des moments jusqu'à 10000 cycles, sans qu'un phénomène de stabilisation ne soit observé. L'analyse des résultats des essais en centrifugeuse indique qu'entre le 1^{er} cycle et le 25000^{ème} cycle, le moment maximum augmente d'environ 10%.

La profondeur du moment maximum s'accroît avec les cycles. Elle passe de 3 m lors du 1^{er} cycle, à 3,6 m pour le 25000^{ème} cycle.

Ces observations traduisent une mobilisation progressive du sol en profondeur et par conséquent une augmentation progressive des déformations, même en profondeur.

4 ANALYSE ET INTERPRETATION DES RESULTATS

4.1 Influence du nombre de cycles N sur les déplacements et les moments

Pour un chargement égal à $H_m + H_c$, les déplacements maximaux au point de chargement ($d_{pc,max}$) de chaque cycle en fonction du nombre de cycles forment une courbe d'allure logarithmique (Figure 6), conformément aux résultats de Verdure et al. (2003) et de Rosquoët et al. (2007).

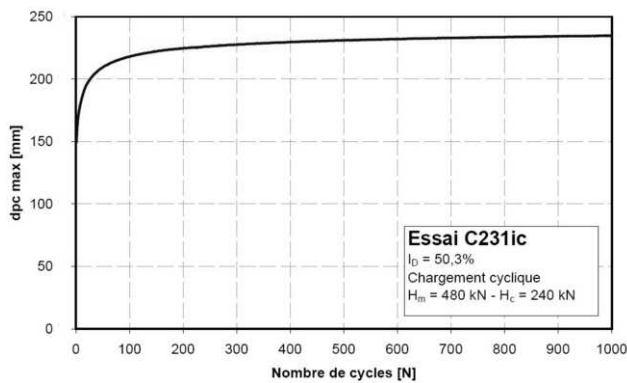


Figure 6. Déplacements maximaux pour chaque cycle au point de chargement

En échelle semi-logarithmique (Figure 7), la courbe de la Figure 6 présente deux segments, qui peuvent être ajustés par deux régressions linéaires. Les pentes de ces deux droites, respectivement $d_{pc,max1}$ et $d_{pc,max2}$, sont déterminées simultanément de telle manière que les points considérés pour chaque droite soient complémentaires. C'est-à-dire que pour chaque couple d'équations de droite déterminées, on a tenu compte de l'ensemble des points, et que les $N_{intdpc,max}$ premiers points ont servi à déterminer l'équation de la première droite, et le reste des points à celle de la seconde droite ($N_{intdpc,max}$ représente l'abscisse – le nombre de cycles – de l'intersection des deux droites). Les équations de droite choisies sont celles dont la somme des deux coefficients de détermination est la plus proche de 2 (Figure 7).

Les droites calculées sont de type : $a \ln(N) + b$, la valeur de b étant une fonction de la valeur initiale de $d_{pc,max}$, qui est non nulle sur la Figure 7.

Des résultats similaires ont été retrouvés pour d'autres essais, qui donnent une pente autour de 15 pour la première droite et de 6,5 pour la deuxième droite. La formule proposée par Rosquoët et al. (2007) et établie sur plusieurs dizaines de cycles donnerait une pente équivalente de 10,4.

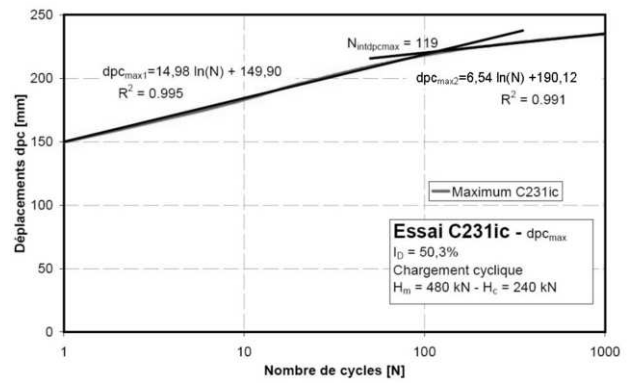


Figure 7. Détermination des droites d'ajustement des courbes d'accumulation de déplacements dans une échelle semi-logarithmique

L'évolution des moments en fonction du nombre de cycles dépend de la profondeur. Entre la surface et 2,4m (Figure 5), il n'y a quasiment pas d'évolution des moments dans le pieu dès le premier cycle. Plus profondément, les courbes d'évolution des moments sont comparables à celles des déplacements décrites sur les Figure 6 et Figure 7. Néanmoins, cette évolution varie avec la profondeur considérée (Figure 8). Ces observations montrent une mobilisation progressive, avec le nombre de cycles, des couches plus profondes du sol. Ce qui veut dire que le chargement cyclique entraîne une dégradation de la résistance du sol.

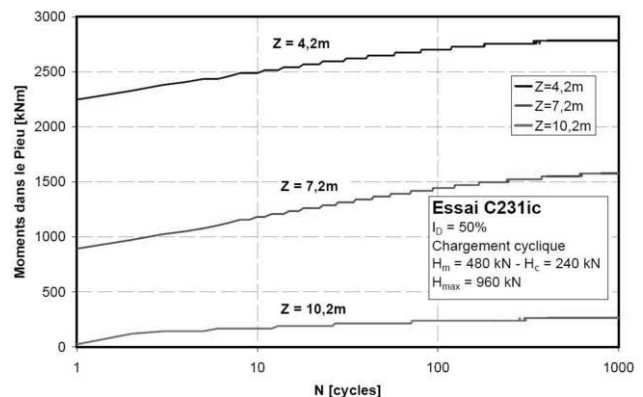


Figure 8. Evolution des moments dans le pieu, en fonction du nombre de cycles, pour des profondeurs choisies

Le chargement cyclique engendre des moments résiduels dans le pieu. En effet, même lorsque le chargement H appliqué en tête du pieu est nul, on mesure encore des moments le long du pieu. L'allure de cette courbe de moments est différente de celles décrites sur la Figure 5. Le moment est nul en tête du pieu et augmente au fur et à mesure avec la profondeur jusqu'à une profondeur limite correspondant à peu près à la moitié de la fiche du pieu, puis les moments diminuent en intensité à partir de cette profondeur, pour s'annuler de nouveau en pointe.

4.2 Chargement monotone final

Ce chargement (cf. Figure 3) est réalisé afin d'évaluer l'effet du chargement cyclique (intensité et nombre) sur le comportement du pieu.

Deux essais de chargement monotone final, réalisés respectivement après $N=1000$ cycles (Essai C241ic) et $N=25000$ cycles (Essai C231ic) sont comparés sur la Figure 9.

On remarque que le moment résiduel est plus important lorsque le nombre de cycles est plus important. Toutefois, lorsque la charge appliquée H en tête du pieu augmente, on constate une diminution de cette différence. Et lorsque le chargement H est égal au chargement cyclique maximal $H_c + H_m$, les moments maximaux dans les deux cas sont identiques. Lorsqu'on dépasse

le chargement cyclique maximal, les moments maximaux sont quasiment les mêmes dans les deux cas. Ainsi, quel que soit le nombre de cycles appliqués, lorsque le chargement monotone qui suit le chargement cyclique est supérieur au chargement cyclique maximal, le moment maximal dans le pieu est identique. L'allure des courbes de moments devient alors similaire aux allures décrites sur la Figure 5.

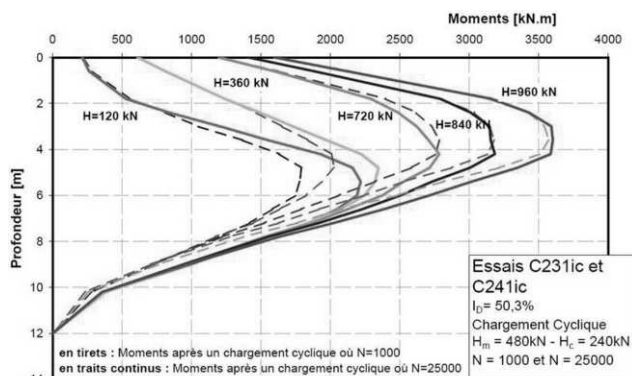


Figure 9. Comparaisons des moments résiduels lors du chargement monotone après cycles en fonction du nombre de cycles subis lors des séquences cycliques.

On constate néanmoins que l'effet des cycles de chargement est conservé en profondeur. Sur la Figure 9 précédente, les moments au-delà de la profondeur du moment maximal sont beaucoup plus importants pour l'essai à 25000 cycles comparé à l'essai à 1000 cycles. Ceci confirme les constatations précédentes (cf. Figure 5) d'une mobilisation progressive de la résistance du sol en profondeur avec l'augmentation du nombre de cycles.

4.3 Courbes p-y

Les courbes p-y traduisent l'interaction sol-pieu lors d'une sollicitation horizontale. Ces courbes, pour chaque profondeur donnée, expriment la pression ou la réaction latérale du sol p (effort linéique) au déplacement horizontal y du pieu.

En appliquant la théorie des poutres, les courbes expérimentales des profils de moments permettent d'accéder à p et à y par double dérivation et double intégration (e.g. Rosquoët, 2004). Les courbes p-y cycliques pour un chargement H correspondant au chargement cyclique maximal sont comparées avec les courbes p-y monotones pour deux profondeurs (Figure 10).

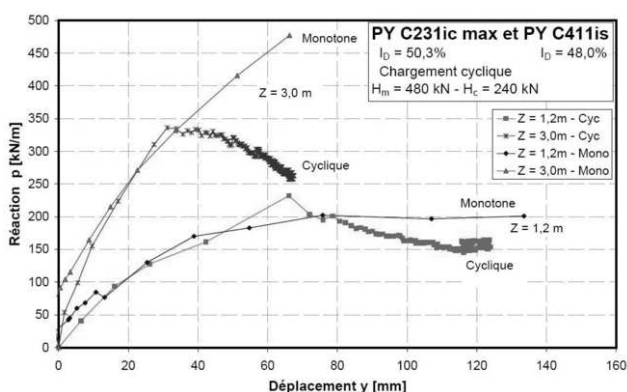


Figure 10. Comparaison des courbes p-y monotones et cycliques pour du sable moyennement dense à $z = 1,2$ m et $z = 3,0$ m.

On constate une diminution de la réaction p mobilisée pour le chargement cyclique par rapport à la courbe p-y monotone. Le chargement cyclique induit donc une diminution de la résistance mobilisable dans le sol pour un déplacement donné.

5 CONCLUSIONS

Les résultats des essais sur modèle réduit centrifugé d'un pieu isolé installé dans du sable moyennement dense montrent, lors des premiers cycles de chargement, une accumulation des déplacements, qui tend à se réduire au fil des cycles. Deux régimes de déplacement en tête ont été identifiés : l'un avec une évolution notable jusqu'à environ 100 cycles, l'autre plus faible, au-delà.

L'intensité et la profondeur des moments maximaux dans le pieu s'accroissent avec le chargement cyclique. Des moments résiduels perdurent dans le pieu à la fin du chargement cyclique. Ces essais montrent que le chargement cyclique induit une mobilisation progressive du sol en profondeur avec les cycles.

Les courbes p-y cycliques proches de la surface indiquent aussi une diminution de la résistance mobilisée pour un déplacement y donné.

L'influence du chargement cyclique est relativement importante dans le sable pour l'indice de densité considérée. D'autres essais avec un indice de densité plus important devraient être réalisés pour confirmer les comportements que l'on a observés.

REFERENCES

- Cheang, L., Matlock, H. 1983. Static and cyclic lateral load tests on instrumented piles in sand, *Earth Technology Corporation*, p.135
- Garnier, J., Gaudin, C., Springman, S.M., Culligan, P.J., Goodings, D., König, D., Kutter, B., Phillips, R., Randolph, M.F., Thorel, L. 2007. Catalogue of scaling laws and similitude questions in geotechnical centrifuge modeling, *Int. J. Physical Modelling in Geotechnics*, Vol. 7, n°3, pp 1-24.
- Hadjadji, T. 1993. Analyse du comportement expérimental de pieux sous chargements horizontaux, *Thèse de doctorat de l'école nationale des ponts et chaussées*, 307p.
- Kikuchi, Y. 2008. Lateral resistance of piles in sand under repeated horizontal loading, *2nd BGA International Conference on Foundations, ICOF2008*, pp.1225-1236
- Little, R.,L., Briaud, J.,L. 1988. Full scale cyclic lateral load tests on six single piles in sand, Final Report of the Geotechnical division, Civil engineering department, *Texas A&M University*, p.190
- Long, J.,H., Vanneste, G. 1994. Effects of cyclic lateral loads on piles in sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.20, n°1, pp.225-244.
- Rakotonindriana, J., Le Kouby, A., Thorel, L., Mestat, P. 2008. Chargement cyclique horizontal non alterné d'un pieu, *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur*, Nantes 18-19 juin JNGG08, pp 743-750.
- Rakotonindriana, J., Le Kouby, A., Thorel, L., Boura, C., Favraud, C., Mestat, P. 2008b. Single pile in sand subject to cyclic horizontal loads. Effect of the number of cycles, *2nd BGA International Conference on Foundations, ICOF2008*, pp. 1259-1270.
- Reese, L.,C., Cox, W.,R., Koop, F.,D. 1974. Analysis of laterally loaded piles in sand, *VIth Annual Offshore Technology Conference, Proc., Houston, Texas*, pp.473-483.
- Rosquoët, F. 2004. Pieux sous charge latérale cyclique, *Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Nantes et de l'Université de Nantes*, 305p.
- Rosquoët, F., Thorel, L., Garnier, J., Canepa, Y. 2007. Horizontal cyclic loading of piles installed in sand, *Soils and Foundations*, October, Vol. 47, n°5, pp. 821-832.
- Verdure, L., Garnier, J., Levacher, D. 2003. Lateral cyclic loading of single piles in sand. *International journal of physical modelling in geotechnics*, Vol.3, n° 3, pp.17-28