

# Pieu sous charge latérale : développement de lois de dégradation pour prendre en compte l'effet des cycles

Pile cyclic lateral loading: Development of degradation laws for describing the cyclic effect

Rosquoët F.

Laboratoire LTI (AE3899), Amiens, France

Thorel L., Garnier J., Chenaf N.

LUNAM Université, IFSTTAR, Nantes, France

**RÉSUMÉ :** A l'origine, le dimensionnement des pieux sous une charge latérale supposait que le sol est entièrement à l'état de rupture (calcul aux états limites). Les méthodes de calcul ont progressé et le dimensionnement est maintenant réalisé en déplacement mais sans possibilité de tenir compte de l'effet des cycles de chargement (sauf dans le cas des ouvrages offshore). Pour corriger cette lacune, nous proposons deux méthodes : une méthode globale basée sur le déplacement en tête de pieu et sur le moment maximum, et une méthode locale basée sur les courbes P-y. Pour la méthode globale, nous montrons que l'effet des cycles sur le déplacement est essentiellement lié au rapport entre l'amplitude de la charge cyclique et la charge maximale. Nous proposons une loi de type logarithme donnant le déplacement relatif en fonction du nombre de cycles. On notera que l'effet des cycles sur le moment maximum est faible. La méthode locale est basée sur l'interaction entre le sol et le pieu permettant de relier directement la réaction latérale du sol P et le déplacement du sol y. Nous introduisons un coefficient d'abattement qui permet de prendre en compte l'effet des cycles en modifiant la réaction des courbes P-y statiques.

**ABSTRACT:** Generally, the design of pile under lateral cyclic loads supposed that the soil is completely in the state of failure (limit states calculation). However, the calculation methods progressed and the design can be executed in displacement and at maximum bending moment. To analyse the cyclic effect we propose two methods: the global method is based on pile head displacement and maximum bending moments and local method is based on P-y curves. For the global method, we propose an empirical law to evaluate pile head displacements at application point. A simple power function of  $DF/F$  and a logarithm function of the number of cycles are proposed to calculate pile head displacements under cyclic loading from the displacement values under applied monotonic loads. We show that the effect of the cycles on the bending moments is weak. Local methods are based on the soil reaction profile, P and the pile lateral displacement, y called P-y curves. We propose a reduction coefficient then applied to the monotonic P-y curves to take the cyclic effect on the soil degradation into account.

**MOTS-CLES :** Comportement sous chargements cycliques – Séismes

**KEYWORDS:** Pile under lateral cyclic load – Seism

## 1 INTRODUCTION

Le chargement latéral cyclique des pieux est généralement le résultat des sollicitations mécaniques engendrées par les vagues, le vent sur des structures offshore, l'amarrage de bateaux sur des quais, des surcharges variables ou des dilatations thermiques. Il est caractérisé par quatre paramètres qui sont la charge maximum appliquée F ; l'amplitude de la variation de la charge DF ; le nombre de cycles n et le type de chargement (non-alterné ou alterné).

L'utilisation des modèles réduits de pieux permet de réaliser des études paramétriques et ainsi améliorer notre compréhension de ces phénomènes à multiples variables. Une meilleure connaissance et quantification de la réponse des pieux sous charge latérale cyclique permettra d'optimiser leurs dimensionnement pour ce type de sollicitation mécanique.

La modélisation physique des structures géotechniques en centrifugeuse est une technique assez répandue (Garnier 2001) et a déjà été appliquée à l'étude de pieux sous charge latérale cyclique dans le sable (Rosquoët 2004, Rakotonindriana 2009) ou dans l'argile (Khemakhem 2012). La centrifugation des modèles réduits est indispensable pour assurer le respect des conditions de similitude qui imposent qu'un modèle à l'échelle 1/n soit testé sous une accélération centrifuge égale à n fois la gravité terrestre.

Un important programme de recherche est en cours en France sur les pieux sous charge cycliques (Projet national SOLCYP). Les travaux décrits ci-dessous s'intègrent dans ce programme et concernent les charges latérales cycliques. Le but final de ces études est de proposer une méthode rationnelle de

dimensionnement des pieux soumis à de telles sollicitations et d'évaluer l'influence du chargement latéral cyclique sur les éléments qui permettent de dimensionner le pieu, c'est-à-dire le déplacement horizontal en tête y, le moment maximum M ou encore les relations entre la réaction du sol P et le déplacement horizontal du pieu y, appelées « courbes P-y ».

L'étude se limite aux cas où les cycles dégradent la réaction du sol et aux charges cycliques de service. Le pieu modélisé peut être considéré comme un pieu souple. La partie du pieu située à une profondeur supérieure à 3 fois la longueur de transfert  $l_0$ , n'a théoriquement plus d'influence sur la réponse due à une charge en tête (Frank 1999). De fait, dans cette étude, on admettra que l'effet des cycles se manifeste essentiellement dans les couches de surface, à des profondeurs inférieures à 4 ou 5 fois le diamètre du pieu. A titre de comparaison, l'API (2002) fixe cette profondeur limite à  $z/B = 2,625$  pour des sables, soit 1,89 m dans notre cas.

## 2 DISPOSITIF ET MÉTHODE EXPÉRIMENTALE

Les essais ont été effectués dans des massifs secs homogènes de sable de Fontainebleau NE34 de poids volumique  $16 \text{ kN/m}^3$  (indice de densité  $I_D = 86 \%$ ) reconstitués par pluviation. Le pieu modèle au  $1/40^{\text{ème}}$  est mis en place à 1g par battage dans les massifs préalablement reconstitués. Ce pieu modèle est testé sous une accélération de 40 g. Il représente un pieu grandeur réelle de 0,72 m de diamètre, de 12 m de longueur de fiche ayant une rigidité à la flexion de  $476 \text{ MN.m}^2$  (Figure 1). Il est instrumenté par 20 paires de jauges de déformation collées sur

deux génératrices diamétralement opposées permettant de déterminer à tout moment le profil des moments fléchissants.

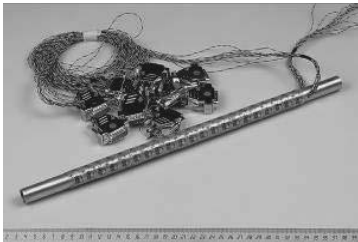


Figure 1. Pieu modèle instrumenté de 18mm de diamètre.

Un servo-vérin horizontal placé sur un bâti rigide fixé sur le conteneur d'essai permet d'appliquer le chargement à 40 mm au-dessus du sol. Deux capteurs de déplacement (d'une course de 100 mm) fixés par l'intermédiaire d'une rotule à 20 mm et de 65 mm au dessus du sol permettent de connaître le déplacement au point d'application de la charge (Figure 2). L'effort est mesuré à l'aide d'un capteur de force, d'une capacité maximale de 500 daN. Pour le chargement unidirectionnel non alterné (traction uniquement), un câble assure la liaison entre le capteur et le pieu modèle.

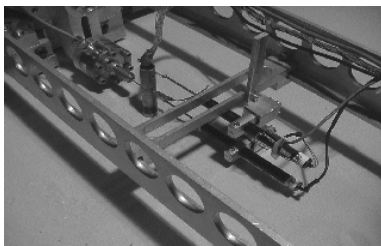


Figure 2. Détail du dispositif de chargement avec les capteurs de déplacement.

Dans le cas d'un chargement cyclique de type non alterné, l'effort est toujours appliqué dans le même sens, la charge variant entre  $F$  et  $F - DF$ .

### 3 MÉTHODE GLOBALE

#### 3.1 Déplacement en tête

L'effet des cycles sur l'évolution du déplacement en tête au point d'application de la charge (figure 3) est fortement dépendant de l'amplitude des cycles ( $DF$ ) et du chargement maximal ( $F$ ).

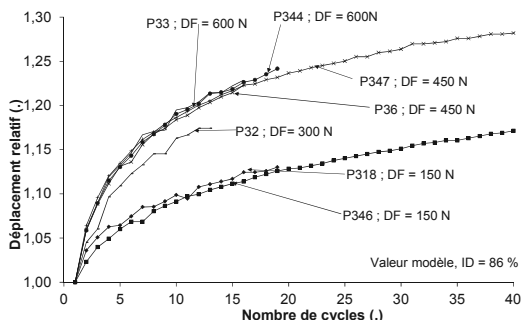


Figure 3. Evolution des déplacements relatifs sous la charge maximale ( $F = 960$  kN) en fonction du nombre de cycles pour différentes amplitudes  $DF$ .

Comme déjà observé par d'autres auteurs, une loi logarithmique représente très correctement la relation entre le déplacement relatif et le nombre de cycles (Eq. 1) :

$$\frac{y_n}{y_1} = 1 + b \ln(n) \quad (1)$$

où  $y_n$  est le déplacement au cycle  $n$ ,  $y_1$  le déplacement à la fin du chargement statique,  $b$  un coefficient positif adimensionnel et  $n$  le nombre de cycles (Figure 3).

L'interpolation des courbes est réalisée par la méthode des moindres carrés. Pour tous les cas étudiés, les valeurs expérimentales sont proches de la loi logarithmique choisie (coefficient de corrélation  $R^2 = 0,98$ ). Le coefficient «  $b$  » dépend de l'amplitude des cycles. Lorsque l'amplitude des cycles  $DF$  tend vers 0, nous sommes dans le cas d'un essai de fluage puisque la charge est constante et égale à  $F$ . Nous avons observé que le déplacement induit par le fluage peut être négligé, par conséquent, le coefficient «  $b$  », est dans ce cas proche de 0.

L'évolution du déplacement relatif en fonction du nombre de cycles, pour chaque essai réalisé, peut être caractérisée par ce coefficient «  $b$  ». On note  $\sigma_b$  l'incertitude liée à la mesure de ce déplacement. En supposant que les incertitudes sur le déplacement relatif soient toutes de même amplitude nous pouvons calculer les incertitudes sur la constante «  $b$  » de la fonction logarithmique (Rosquoët 2004).

Tableau 1. Estimation de  $b$  et de l'incertitude  $\sigma_b$  associée.

Essai	Nombre de cycles	$F$ (kN)	$DF$ (kN)	$b$ (.)	$\sigma_b$ (.)
P33	14	960	960	0,082	0,019
P344	14	960	960	0,081	0,017
P36	18	960	720	0,078	0,017
P347	40	960	720	0,075	0,01
P32	15	960	480	0,071	0,021
P318	25	960	240	0,044	0,017
P346	40	960	240	0,049	0,01

Il apparaît (Tableau 1), que le coefficient «  $b$  » est strictement croissant avec l'amplitude  $DF$ . Il est possible de représenter les variations de «  $b$  » par une fonction puissance. La figure 4 montre la courbe d'évolution du coefficient «  $b$  » en fonction du rapport entre l'amplitude et la charge maximale appliquée ( $DF/F$ ), permettant ainsi de rendre adimensionnelle l'amplitude des cycles.

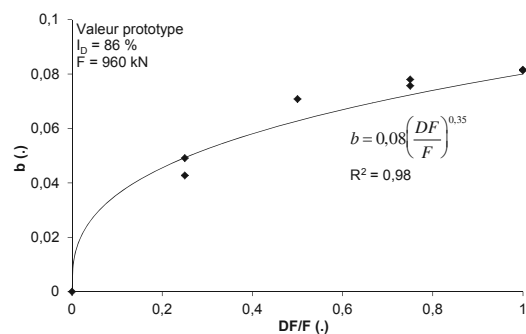


Figure 4. Evolution du coefficient «  $b$  » en fonction de  $DF/F$ .

L'expression du coefficient «  $b$  » défini sur la figure 4 en fonction de  $DF/F$  permet de compléter l'équation (2) pour ainsi donner le déplacement en tête pour un cycle  $n$  donné.

$$\frac{y_n}{y_1} = 1 + 0,08 \times \ln(n) \times \left( \frac{DF}{F} \right)^{0,35} \quad (2)$$

Le tableau 2 présente les valeurs proposées dans la littérature pour le paramètre  $b$ , que l'on peut appeler paramètre de dégradation.

Tableau 2. Plages des valeurs de b proposées dans la littérature.

Auteurs	Sol	Pieux testés	Nombre de cycles	Paramètre de dégradation
Hettler (1981)	Sable sec	Rigides / 1g		0,2
Bouafia (1994)	Sable sec	Rigides Centrifugés	5	0,18 < b < 0,25
Lin et Liao (1999)	Divers sables	Pieux in situ	100	0,02 < b < 0,24
Verdure et al. (2003)	Sable sec dense	Flexibles Centrifugés	50	0,04 < b < 0,18
Rakotonindriana (2009)	Sable sec dense	Flexibles Centrifugés	500	0,12
Li et al. (2010)	Sable sec dense	Rigides Centrifugés	100 à 1000	0,17 < b < 0,25
Peralta (2010)	Sable sec	Flexibles 1-g	10000	0,21

Au regard des expressions de « b » proposées dans la littérature et des résultats des études réalisées par Rosquoët (2004) et Rakotonindriana (2009), nous retenons une valeur moyenne de b de 0,1. Finalement nous proposons pour l'expression de l'évolution du déplacement en tête en fonction du nombre de cycles et de l'amplitude (Eq. 3) :

$$\frac{y_n}{y_1} = 1 + 0,1 \times \ln(n) \times \left( \frac{DF}{F} \right)^{0,35} \quad (3)$$

### 3.2 Moment maximum

Le moment maximum est l'un des paramètres dimensionnant et il est important d'examiner son évolution lors de chargements cycliques (Figure 5).

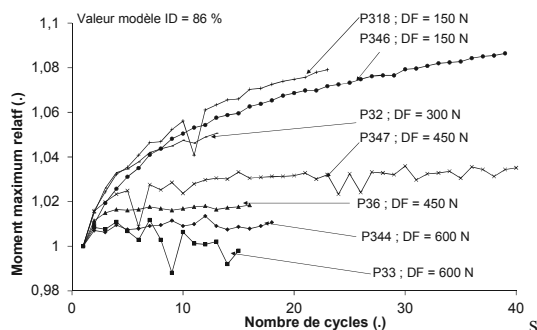


Figure 5. Evolution des moments maximums relatifs en fonction du nombre de cycles pour différents rapports DF/F.

Comme pour les déplacements relatifs, il est possible d'interpoler l'évolution du moment maximum relatif en fonction du nombre de cycles par une fonction de type logarithmique (Eq. 4) :

$$\frac{M_n}{M_1} = 1 + a \ln(n) \quad (4)$$

L'effet des cycles sur le moment maximum s'avère faible, inférieur à 8 % pour 15 cycles (Rosquoët, 2004) et à 12 % pour 75000 cycles (Rakotonindriana, 2009). De plus, nous avons montré que les valeurs du coefficient représentant l'effet des cycles sur le moment maximum sont du même ordre de grandeur que l'incertitude sur ce coefficient (tableau 3). Par conséquent, dans le cas d'un sable sec et dense, nous proposons à ce stade d'appliquer une majoration forfaitaire de 10% au moment maximum observé sous la charge statique F (solution conservative).

 Tableau 3 : Estimation de a et de l'incertitude  $\sigma_a$  associée (F = 960 kN,  $I_D = 86\%$ ).

Essai	Nombre de cycles	DF/F (.)	a (.)	$\sigma_a$ (.)
P33	14	1	0	/
P344	14	1	0	/
P36	18	0,75	0,0047	0,0038
P347	40	0,75	0,0069	0,0052
P32	15	0,5	0,019	0,017
P318	25	0,25	0,026	0,014
P346	40	0,25	0,025	0,006

## 4 MÉTHODE LOCALE

Comme déjà proposé par plusieurs auteurs et adopté dans les règles API, nous admettons qu'il est possible de modéliser l'effet des cycles, sur les courbes P-y, par une diminution de la réaction P (pour un déplacement y donné) dans les couches de surface. Cette approche présente l'avantage de pouvoir être mise en œuvre avec tout logiciel de calcul de pieu sous charge latérale statique. Pour quantifier l'influence des cycles sur la « dégradation » du sol nous introduisons un coefficient d'abattement  $r_c$  qui dépend a priori de cinq paramètres : la profondeur z, le déplacement du pieu y, le nombre de cycles n, la charge appliquée F et l'amplitude des cycles DF.

### 4.1 Méthode itérative pour déterminer un coefficient d'abattement $r_c$

Le coefficient d'abattement  $r_c$  des courbes P-y statiques va être déterminé à l'aide d'un calcul itératif par calage progressif entre les données expérimentales (état du pieu au 15<sup>ème</sup> cycle) et les données calculées par le logiciel Pilate (courbe P-y statique abattues d'un coefficient r).

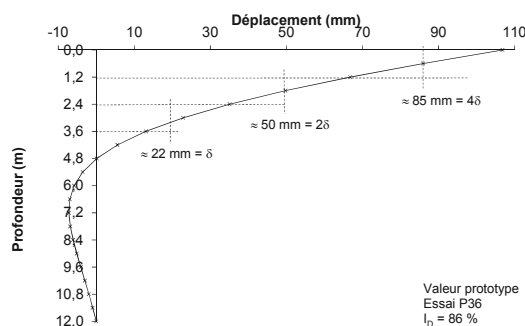


Figure 6. Evolution du déplacement en fonction de la profondeur.

Pour une profondeur comprise entre 0 et 3,6 m, si l'on note  $\delta$  le déplacement du pieu au niveau de la couche comprise entre 2,4 et 3,6 m, on constate que le déplacement est proche de  $2\delta$  entre 1,2 et 2,4 m et  $4\delta$  entre 0 et 1,2 m (Figure 6).

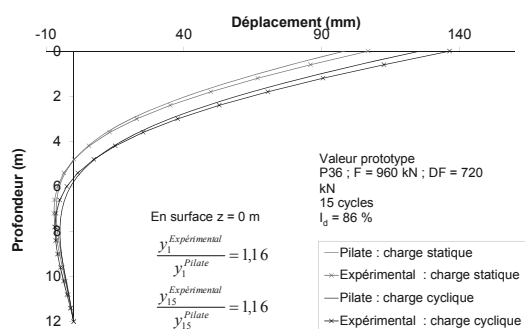


Figure 7. Evolution du déplacement en fonction de la profondeur.

Dans un premier temps, les coefficients d'abattement  $r_c$  sont déterminés par calage sur les données expérimentales obtenues sur le déplacement de la tête du pieu en fonction du nombre de cycles. Pour représenter l'effet des cycles, les courbes P-y

statiques de surface (jusqu'à 3,6 m) sont affectées d'un facteur  $r_c$  sur la réaction  $P$  inférieur à 1 et croissant avec la profondeur.

Compte tenu du constat tiré de la figure 6, on impose que le coefficient  $r$  soit égal à  $1 - 4\Delta$  entre 0 et 1,2 m ;  $1 - 2\Delta$  entre 1,2 et 2,4 m et  $1 - \Delta$  entre 2,4 et 3,6 m (avec  $\Delta$  un coefficient strictement positif tel que  $1 - \Delta$  soit inférieur ou égal à 1). Par itération, nous recherchons la valeur de  $\Delta$  qui conduit au rapport correct entre le déplacement au 15<sup>ème</sup> cycle  $y_{15}$  et le déplacement du pieu sous la charge maximum  $y_1$  (Figure 7).

La même procédure a été utilisée pour les autres cas, de charge maximum de 960 kN, d'amplitude des cycles variant entre 960 et 240 kN. Il est possible d'exprimer le coefficient  $r$  en fonction du rapport d'amplitude de la variation de la charge sur la charge  $DF / F$ , pour les couches de surfaces entre 0 et 5B (Figure 8).

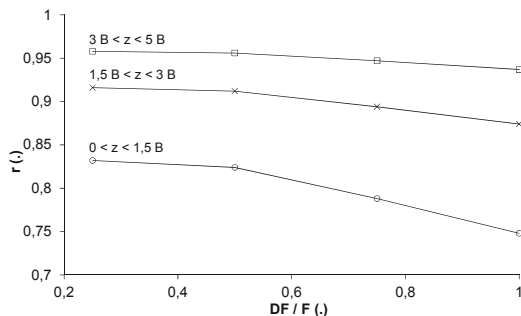


Figure 8. Evolution du coefficient  $r_c$  en fonction de  $DF / F$  (pour 15 cycles).

L'extrapolation des courbes de la figure 8 permet de déterminer des expressions simples du coefficient  $r_c$  en fonction du rapport  $DF / F$  pour les trois couches de surfaces (Tableau 4).

Tableau 4 : Extrapolation par des droites de l'évolution du coefficient  $r_c$  en fonction de  $DF / F$  (pour 15 cycles).

Profondeur $z$	Expression de $r_c$ en fonction de $DF / F$
$0 < z < 1,5B$	$r = 0,87 - 0,12 \frac{DF}{F}$
$1,5B < z < 3B$	$r = 0,94 - 0,058 \frac{DF}{F}$
$3B < z < 5B$	$r = 0,97 - 0,029 \frac{DF}{F}$

## 5 COMPARAISON MÉTHODE GLOBALE / MÉTHODE LOCALE POUR LE DÉPLACEMENT EN TÊTE.

Un exemple de comparaison entre les deux méthodes est donné sur la figure 9 pour l'essai sur un pieu dans un sable dense ( $I_D = 86\%$ ) et des cycles caractérisés par  $F = 960$  kN et  $DF = 720$  kN.

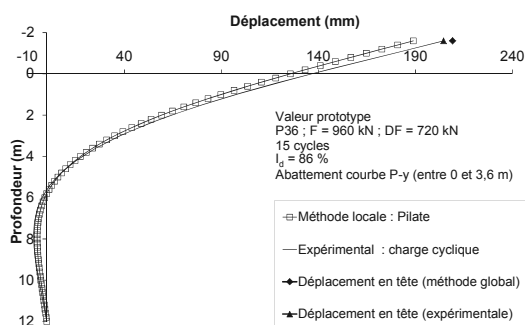


Figure 9. Evolution du déplacement en fonction de la profondeur.

L'écart entre la méthode globale déduite de la relation présentée dans le tableau 4 et la courbe expérimentale est de 2% soit de l'ordre de grandeur de l'incertitude sur la mesure du

déplacement (l'incertitude sur le déplacement est de 0,104 mm, l'écart entre méthode locale et expérimentale est de 0,112 mm).

## 6 CONCLUSION

Une nouvelle analyse de l'étude paramétrique réalisée à l'IFSTTAR sur un pieu soumis à une charge latérale cyclique dans un sable sec et dense (Rosquoët 2004) et complétée par la suite (Rakotonindriana 2009, Khemakhem 2012) permet de proposer de nouvelles méthodes de dimensionnement des pieux sous chargement latéral cyclique. Une méthode globale, basée sur une loi logarithmique en fonction de  $DF/F$  permet de donner le déplacement en tête pour un nombre de cycles  $n$  donné. On notera que l'effet des cycles sur le moment maximum, dans le cas d'un sable sec et dense, est négligeable.

Une méthode locale basée sur l'abattement des courbes  $P-y$  statiques a été réalisée. Des calculs itératifs ont permis de valider la modélisation de l'effet des cycles sur le déplacement et sur les moments par une modification des courbes  $P-y$  d'un facteur  $r_c$  croissant entre 0 et 5B (soit entre 0 et 3,6 m). Des expressions simples ont été proposées permettant de déterminer ce facteur  $r_c$  à partir du rapport  $DF / F$ .

On note, pour finir une bonne concordance des résultats obtenus par les deux méthodes. Toutefois si la méthode globale est utilisable pour un très grand nombre de cycles ( $> 500$ ), la méthode locale n'est valide que pour une quinzaine de cycles et pour des chargements cycliques non alternés.

## 7 REFERENCES

- API - American Petroleum Institute. 2002. *Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms - Working Stress Design*. RP 2AWS, Washington, DC.
- Bouafia A. 1994. Etude expérimentale du chargement latéral cyclique répété des pieux isolés dans le sable en centrifugeuse. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 31, n°5, 740-748.
- Frank R. 1999. *Calcul des fondations superficielles et profondes*. Editions Technique de l'Ingénieur et Presse des Ponts et Chaussées. Paris.
- Garnier J. 2001. Modèles physiques en géotechnique I-Evolution des techniques expérimentales et des domaines d'application. *Revue Française de Géotechnique*. N°97. 3-29.
- Hettler. A. 1981. Verschiebungen starrer und elastischer Gründungskörper in Sand bei monotoner und zyklischer Belastung. *Institut für Boden-und Felsmechanik der Universität Karlsruhe*, Heft Nr. 90.
- Khemakhem M. 2012. Etude expérimentale de la réponse aux charges latérales monotones et cycliques d'un pieu foré dans de l'argile. *Thèse de Doctorat. Ecole Centrale de Nantes Université de Nantes*. 336 p.
- Lin S.S. & Liao J.C. 1999. Permanent strains of piles in sand due to cyclic lateral loads. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 125, n°9, 798-802.
- Li Z. Haigh S. K. & Bolton M. D. 2010. Centrifuge modelling of mono-pile under cyclic lateral loads. *7th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics*. Zurich. Vol. 2, 965-970.
- Peralta P. and Achmus M. 2010. An experimental investigation of piles in sand subjected to lateral cyclic loads. *7th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics*. Zurich. Vol. 2, 985-990.
- Rakotonindriana M. H. J. 2009. Comportement des pieux et des groupes de pieux sous chargement latéral cyclique. *Thèse de doctorat. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*. 381p.
- Rosquoët F. 2004. Pieux sous charge latérale cyclique. *Thèse de Doctorat. Ecole Centrale de Nantes Université de Nantes*. 305 p.
- Verdure L. Levacher D. & Garnier J. 2003. Effet des cycles sur le comportement d'un pieu isolé dans un sable dense sous chargement latéral. *Revue Française de Génie Civil*. 7/2003. 1185-1210.