



**HAL**  
open science

## Chargement cyclique horizontal non alterné d'un pieu

Julio Rakotonindriana, Alain Le Kouby, Luc Thorel, Philippe Mestat

► **To cite this version:**

Julio Rakotonindriana, Alain Le Kouby, Luc Thorel, Philippe Mestat. Chargement cyclique horizontal non alterné d'un pieu. JNGG' 08, Jun 2008, Nantes, France. pp.743-750. hal-04614379

**HAL Id: hal-04614379**

**<https://hal.science/hal-04614379v1>**

Submitted on 17 Jun 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# CHARGEMENT CYCLIQUE HORIZONTAL NON ALTERNE D'UN PIEU

## ONE WAY CYCLIC HORIZONTAL LOADING OF SINGLE PILES

Julio RAKOTONINDRIANA<sup>1</sup>, Alain LE KOUBY<sup>1</sup>, Luc THOREL<sup>2</sup>, Philippe MESTAT<sup>1</sup>

*1 Université Paris-Est, LCPC, Paris, France*

*2 LCPC, Nantes, France*

**RÉSUMÉ** – Le comportement d'un pieu, sous chargement cyclique horizontal, dans un sable de Fontainebleau sec est étudié en centrifugeuse. Le déplacement en tête et le moment fléchissant mesurés augmentent avec le nombre de cycles, sans qu'une stabilisation ne soit observée pour un nombre de cycles allant jusqu'à 25000.

**ABSTRACT** – A single pile was installed in dry Fontainebleau Sand. The pile was submitted to a large number (N) of horizontal cyclic loading in a centrifuge. The pile head displacement and the bending moment profile are investigated and show that there is no stabilization of these measures when N is increasing.

### 1. Introduction

Les fondations sont généralement soumises à des sollicitations permanentes mais aussi à des sollicitations variables. Ces dernières peuvent être dues aux effets de la houle, du vent, des vibrations de machines, etc... Ces séquences de chargement et déchargement entraînent une évolution du comportement de l'ensemble sol-pieu. Il est donc nécessaire de tenir compte des sollicitations cycliques horizontales dans le dimensionnement.

En France, les règles de dimensionnement des fondations n'intègrent pas explicitement le chargement cyclique horizontal. L'Eurocode 7 préconise sa prise en compte pour les pieux sans qu'une méthode ne soit proposée. Seules les recommandations liées à l'industrie pétrolière en tiennent compte (American Petroleum Institute (API), 1993 et Det Norske Veritas (DNV), 1992). Or, ces règles ne concernent que les fondations offshore, d'où la nécessité d'améliorer la compréhension de l'influence de ce type de chargement pour les constructions terrestres.

Pour appréhender ce type de sollicitation, une étude expérimentale est réalisée sur des modèles réduits centrifugés de pieux au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) à Nantes. L'influence des chargements cycliques horizontaux sur le comportement d'un pieu isolé est étudiée. L'effet du nombre de cycles est évalué sur les déplacements en tête du pieu et sur les profils de moment.

Le pieu isolé, instrumenté, a été installé dans du sable sec de Fontainebleau NE34 moyennement dense à dense. Le pieu prototype correspondant au modèle réduit au 1/40ème aurait 12 m de long et 0,72 m de diamètre (le modèle correspondant à 40g a 300 mm de long et 18 mm de diamètre). Des chargements cycliques à 1Hz jusqu'à 25000 cycles ont été appliqués, en conditions de service (1/3 de la charge horizontale ultime).

Les essais montrent, à l'instar des travaux de Verdure et al. (2003) et Rosquoët et al. (2007), à la centrifugeuse de Nantes, l'influence du nombre de cycles en termes de déplacement en tête et de moment dans le pieu. Il semble qu'il y ait un nombre de

cycles « seuil » au-delà duquel on observe une stabilisation des moments selon la profondeur considérée. Toutefois, il semble ne pas y avoir de stabilisation des déplacements en tête.

## 2. Dispositif expérimental et programme de chargement

### 2.1. La Centrifugeuse

La modélisation en centrifugeuse est une technique largement répandue en géotechnique. Elle permet de reproduire le champ de contraintes in situ dans un modèle réduit. L'ouvrage à l'échelle 1 est appelé Prototype (P) et l'ouvrage à une échelle plus petite est appelée Modèle (M). Les valeurs prototypes  $X^P$  sont reliées aux valeurs modèles  $X^M$  à l'aide du facteur d'échelle  $X^*$  défini par:

$$X^* = \frac{X^M}{X^P} \quad (1)$$

Ainsi, pour un modèle réduit à l'échelle 1/Ng, le facteur d'échelle sur:

- La longueur et le déplacement seront:  $L^* = 1/Ng, \xi^* = 1/Ng$
- La force horizontale appliquée H sera :  $H^* = 1/Ng^2;$
- La déformation et la contrainte seront:  $\varepsilon^* = 1, \sigma^* = 1;$

Les recherches expérimentales sur le comportement des pieux sous chargement horizontal ont été entreprises en centrifugeuse au LCPC depuis les années 80. Le comportement des pieux isolés sous chargement monotone a d'abord été étudié (Bouafia, 1990), et récemment l'influence des chargements cycliques sur un pieu isolé (Rosquoët, 2004).

Le dispositif utilisé pour appliquer le chargement horizontal sur le pieu a été développé et amélioré pour les besoins des essais actuels. Le dispositif de chargement horizontal a beaucoup évolué par rapport aux premiers essais de Bouafia (1990). Actuellement, on utilise un servovérin qui a déjà montré son efficacité lors des essais de Rosquoët (2004). Par rapport aux essais de Rosquoët (2004), qui ne concernaient que quelques dizaines de cycles, les essais présentés sont réalisés avec un très grand nombre de cycles allant jusqu'à 25000.

### 2.2. Préparation du massif de sable

Le massif de sable de Fontainebleau est reconstitué dans un conteneur de grande rigidité par pluviométrie dans l'air. On remplit le conteneur à l'aide d'une trémie, placée au dessus du conteneur, dont les vitesses de déplacements verticaux et horizontaux sont contrôlées. Le débit, la hauteur de chute du sable et la vitesse de déplacement de la trémie, contrôlent la vitesse de déposition et sont réglés de façon à obtenir des indices de densités proches de 48% et proches de 78%.

### 2.3. Le pieu instrumenté et le système de chargement

Le pieu instrumenté est à l'échelle 1/40<sup>ème</sup> et est muni de 20 paires de jauges. Le pieu a été développé par Rosquoët (2004). Le mode d'installation est tel que le pieu est battu à 1g avant la mise en vol. Dans un conteneur on peut effectuer jusqu'à 6 essais.

Un servovérin hydraulique, équipé d'un capteur de force, est utilisé pour appliquer le chargement horizontal au pieu. Un câble métallique est utilisé pour transmettre le chargement au pieu, ce qui permet de ne pas engendrer de moment en tête du pieu quand une force est appliquée (fig. 1). 2 capteurs de déplacements sont fixés en tête du pieu, au-dessus (D37) et en dessous (D76) du point de chargement du pieu. Les résultats présentés ne concernent que le capteur D76, le plus proche du sol.

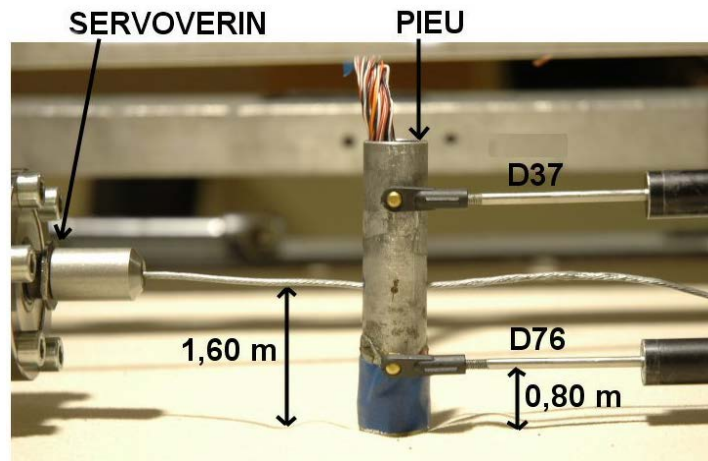


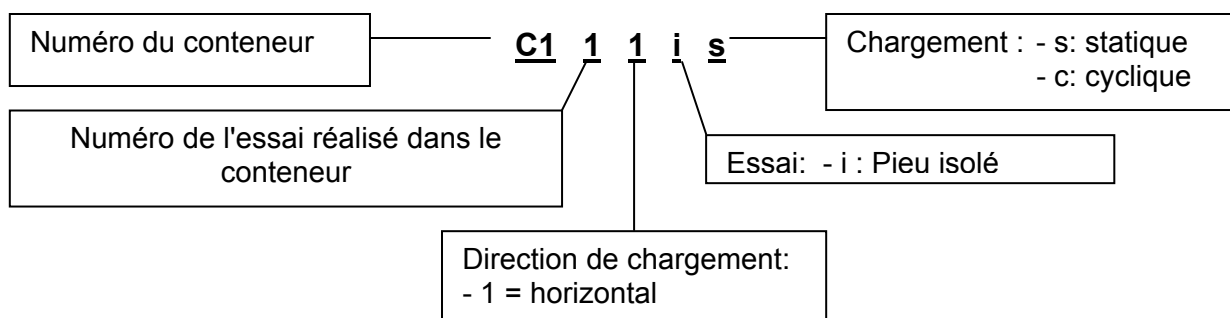
Figure 1. Le pieu modèle, les capteurs et le système de chargement (distances à l'échelle du prototype)

#### 2.4. Objectif et programme expérimental

L'objectif est d'étudier l'effet du nombre de cycles sur le comportement du système sol-pieu en analysant l'évolution du moment fléchissant et du déplacement en tête. L'influence de la densité est aussi étudiée. Les caractéristiques des essais, réalisés dans 3 conteneurs, sont résumées dans le tableau I.

Tableau I. Caractéristiques des essais réalisés (valeurs modèles)

| Conteneur | Indice de Densité [%] | Essai  | Chargement maximal monotone $H_{maxmono}$ [N] | Chargement moyen $H_m$ [N] | Chargement cyclique $H_c$ [N] | Nombre de cycles N | Fréquence de chargement [Hz] |
|-----------|-----------------------|--------|---|----------------------------|-------------------------------|--------------------|------------------------------|
| C2        | 50                    | C231ic | 600   | 300                        | 150                           | 1000               | 0,5                          |
|           |                       | C241ic | 600   | 300                        | 150                           | 25000              | 1                            |
|           |                       | C251ic | 600   | 300                        | 150                           | 1000               | 1                            |
| C3        | 78                    | C311is | 600   | X                          | x                             | x                  | x                            |
| C4        | 48                    | C411is | 600   | X                          | x                             | x                  | x                            |
|           |                       | C421ic | 600   | 300                        | 150                           | 1000               | 0,1                          |



## 2.5. Effets d'échelle

L'effet d'échelle en centrifugeuse a été déjà étudié (Garnier et König, 1998 ; Foray et al., 1998 ; Ovesen, 1979). En particulier, Ovesen (1979) a montré que lorsque le rapport entre le diamètre d'une fondation (B) et la taille moyenne des grains ( $D_{50}$ ) est supérieur à 30, il n'y a plus d'effet d'échelle. Ici, ce rapport est plus grand que 70, c'est pourquoi, on peut considérer que les effets d'échelle peuvent être négligés.

## 3. Résultats typiques du déplacement en tête

### 3.1. Chargement monotone

Plusieurs essais de chargement monotone ont été réalisés à titre de référence. Ces chargements monotones sont réalisés selon la norme NFP 94-151. Le chargement est appliqué en 8 paliers successifs jusqu'au maximum (600N) qui est limité par l'état limite de service du pieu (un tiers de la charge ultime). Cette charge maximale a été déterminée par Rosquoët (2004). Le chargement est appliqué à 1,6 m (valeur prototype) au-dessus du sol (fig. 1). Le résultat typique d'un chargement monotone suivi d'un déchargement est présenté sur la figure 2. On note que le déplacement augmente lorsque la charge appliquée augmente. Après le déchargement, le système présente un déplacement résiduel qui correspond au déplacement permanent du sol.

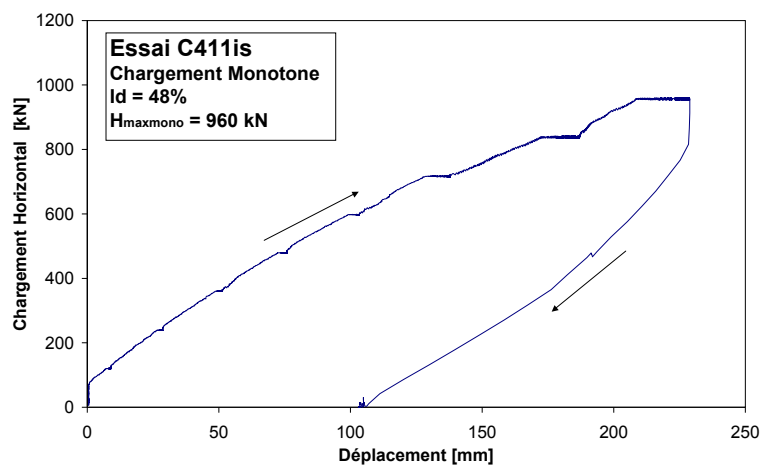


Figure 2. Réponse du système sol-pieu lors d'un chargement monotone suivi d'un déchargement (échelle prototype)

### 3.2. Chargement cyclique

Le chargement cyclique est supposé quasi-statique, donc on néglige les effets d'inertie du système. Trois paramètres permettent de décrire le chargement cyclique, par exemple pour l'essai C421ic (en valeurs prototypes):

- La charge moyenne:  $H_m = 480$  kN
- La demi-amplitude cyclique:  $H_c = 240$  kN (Amplitude =  $2 H_c = 480$  kN)
- Le nombre de cycles:  $N = 1000$

La procédure suivie pour les essais cyclique est la suivante (fig. 3):

- Chargement monotone initial pour atteindre  $H_m + H_c$  ;

- Chargement cyclique (N cycles);
- Déchargement (à la fin des N cycles);
- Attente de la stabilisation des déplacements;
- Chargement monotone final pour l'étude de l'évolution de la résistance entre l'état initial et l'état à la fin du chargement cyclique.

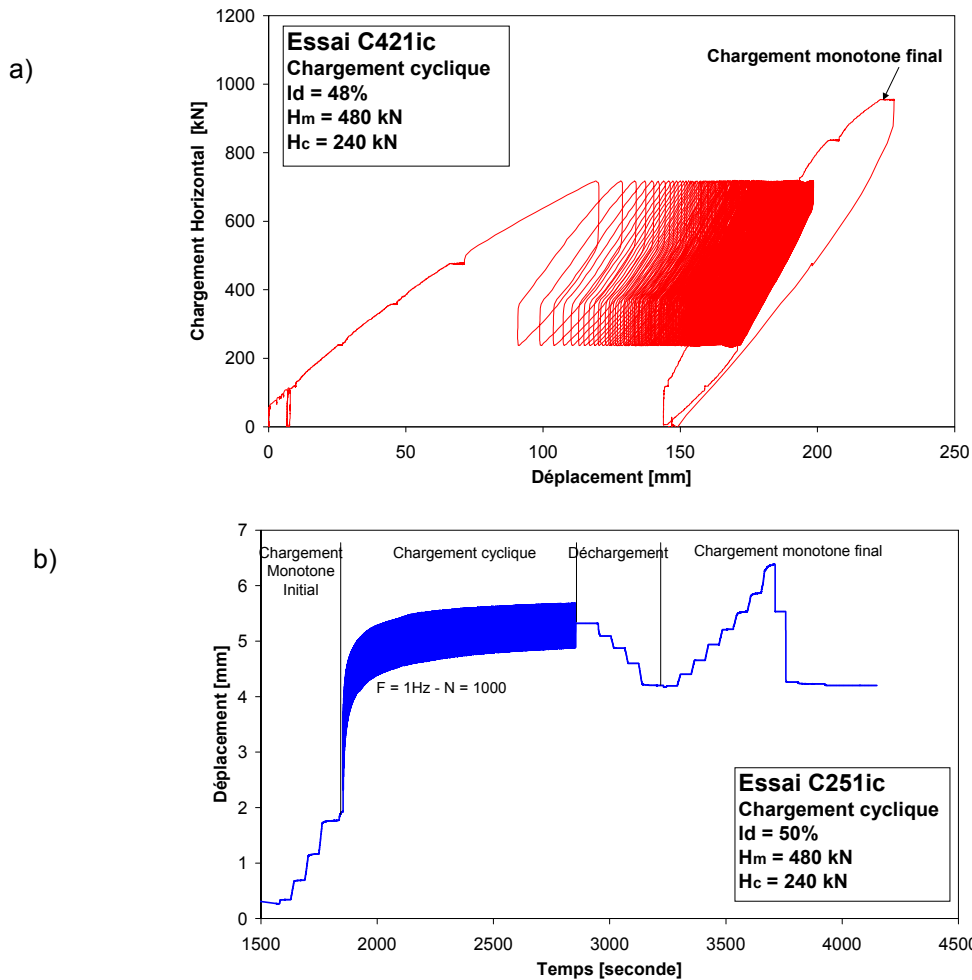


Figure 3. a) Déplacement mesuré en fonction du chargement appliqué (échelle prototype) - b) Déplacement en tête en fonction du temps (échelle du modèle)

Les boucles des premiers cycles (fig. 3a) ont une plus grande amplitude en déplacement que les suivantes. Une grande partie des déplacements en tête du pieu se produit pendant ces premiers cycles. Une accumulation de déplacements est encore observée même après 1000 cycles de chargement, bien que le taux d'accumulation diminue.

## 4. Résultats typiques du moment fléchissant

### 4.1. Essais monotones

Quand une force est appliquée en tête du pieu, le sol réagit en se déformant. La réponse du système sol-pieu peut être illustrée par le profil du moment fléchissant du pieu, conséquence de la déformation du pieu et de la réaction du sol.

Les 20 paires de jauges fournissent le profil du moment et on observe que ce moment augmente avec la charge appliquée (fig. 4). Pour les profondeurs de 0 à 2m, le profil des moments est quasi-linéaire quels que soient le niveau de chargement et le nombre de cycles.

La cote du moment fléchissant maximal semble être à peu près constante tout au long du chargement et est située à environ 2~2,4 m. Des résultats comparables ont été trouvés par Hadjadji (1993) et Rosquoët (2004) pour des niveaux de chargements comparables.

#### 4.2. Essais cycliques

L'allure des profils de moment fléchissant est comparable à celle du chargement monotone. Pour étudier l'effet du chargement cyclique sur le moment, nous avons choisi de nous concentrer sur l'évolution des moments enregistrés à la charge moyenne  $H_m$ . Un exemple de résultats dus à l'effet du nombre de cycles est illustré par la figure 4.

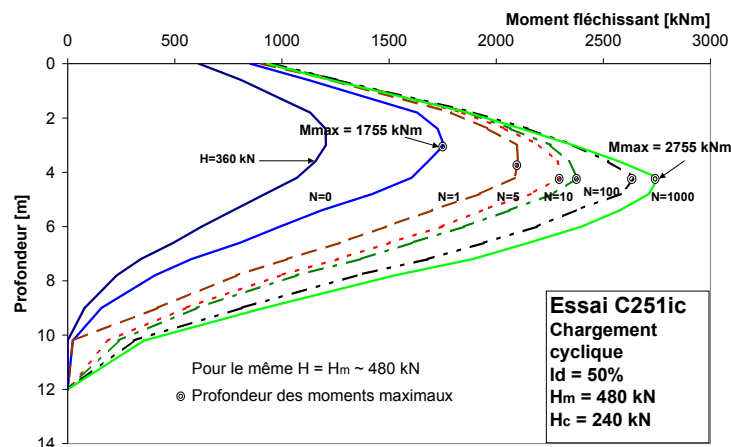


Figure 4. Influence du nombre de cycles sur le moment fléchissant – N=0 correspond au chargement monotone (échelle prototype)

Conformément aux résultats antérieurs de Verdure et al. (2003) et Rosquoët et al. (2007), on observe que le moment fléchissant dans le pieu augmente avec le nombre de cycles. De plus, la profondeur du moment maximum augmente aussi.

#### 5. Analyse des résultats et discussions

L'effet d'un très grand nombre de cycles (N=25000) sur le comportement du pieu est illustré par une représentation semi-logarithmique (fig. 5a). Aucune stabilisation des déplacements n'est observée.

On observe aussi une diminution du taux de déplacement avec l'augmentation du nombre de cycles et elle est très marquée entre 500 et 1000 cycles. Le moment fléchissant est presque constant entre 0 et 2m après quelques dizaines de cycles (fig. 4). Toutefois, pour de plus grandes profondeurs, aucune stabilisation n'est observée même après 25000 cycles.

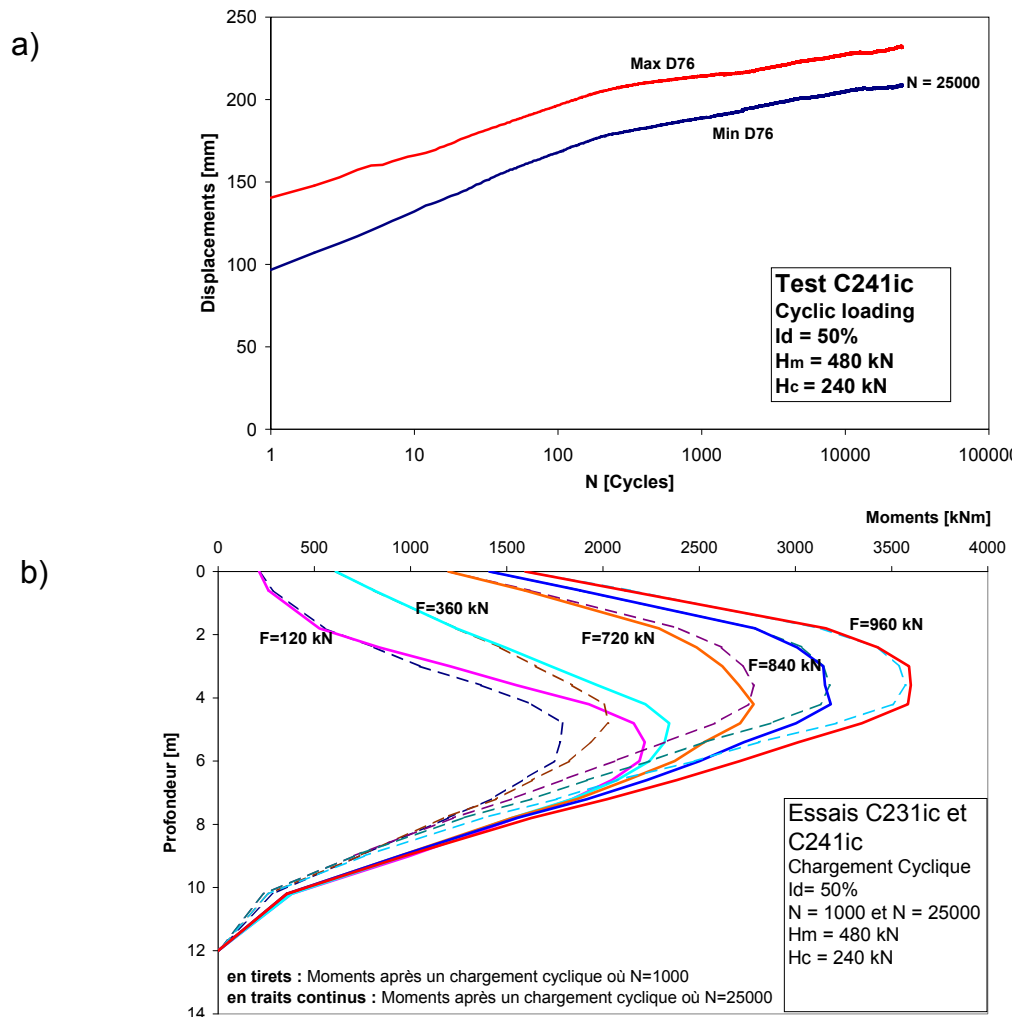


Figure 5. a) Evolution du déplacement cyclique jusqu'à  $N=25000$  (échelle prototype);  
b) Moments dans le pieu lors du chargement monotone final en fonction du chargement cyclique précédent (échelle prototype)

A la fin du chargement cyclique, un chargement monotone final est appliqué en tête du pieu pour comparer le comportement d'un pieu avec et sans chargement cyclique préalable. Quand la force appliquée lors du chargement monotone final est inférieure au chargement cyclique maximal ( $H_m+H_c$ ), le moment fléchissant dans le pieu ayant subi un chargement cyclique préalable est toujours plus important. En outre, plus le nombre de cycles est important, plus le moment dans le pieu dû au chargement monotone final est important (fig. 5b). Toutefois, quand le chargement monotone appliqué est supérieur au chargement cyclique maximal, les moments fléchissants maximaux sont pratiquement égaux dans les 2 essais. A ce niveau de chargement, les formes des courbes de moments sont identiques; néanmoins, à de grandes profondeurs, la valeur du moment fléchissant est plus importante pour le pieu ayant subi un chargement cyclique.

Après un chargement cyclique, on remarque aussi que le déplacement dû au chargement monotone final est nettement plus faible comparé au déplacement engendré lors d'un chargement monotone sans chargement cyclique préalable. Ce phénomène est observé même si le chargement cyclique maximal est inférieur au chargement maximal horizontal lors d'un chargement monotone ( $H_{\max\text{mono}}$ ).



## 6. Conclusions

Des essais horizontaux monotones et cycliques ont été réalisés sur des pieux isolés en centrifugeuse afin d'étudier leur influence sur le déplacement en tête et le moment fléchissant du pieu.

- Les essais confirment que le chargement cyclique augmente le déplacement en tête du pieu. La majorité des déplacements se produit lors des premières dizaines de cycles. Aucune stabilisation n'est cependant observée après 25000 cycles, même si le taux de déplacement diminue tout au long de l'essai.
- Lorsqu'un pieu a déjà subi un chargement cyclique, le déplacement en tête engendré par un chargement monotone est plus faible que le déplacement en tête observé pour un pieu n'ayant pas subi de chargement cyclique.
- Lors d'un chargement monotone, la position du moment maximum est située à peu près à la même profondeur quel que soit le niveau de chargement. Ce qui n'est pas le cas lors d'un chargement cyclique durant lequel la profondeur du moment maximum augmente avec le nombre de cycles.
- Au cours du chargement cyclique, le moment fléchissant maximum augmente aussi avec le nombre de cycles.

Des essais avec un nombre de cycles supérieur à  $N=25000$  devraient être effectués pour pouvoir conclure s'il y a une stabilisation du moment fléchissant ou du déplacement en tête avec le nombre de cycles.

## 5. Références bibliographiques

- American Petroleum Institute - API (1993) Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms. RP2A-LRFD, Section G, 64-77.
- Bouafia A. (1990) Modélisation des pieux chargés latéralement en centrifugeuse. Thèse ENSM, Nantes, Décembre, 267 pages.
- Det Norske Veritas – DNV (1992) Foundations. Classification notes N° 30.4, 54 pages.
- Eurocode 7 (2005) : calcul géotechnique - Partie 1 : règles générales, NF EN 1997-1.
- Foray P., Balachowski L., Rault G. (1998) Scale effect in shaft friction due to the localisation of deformations. Centrifuge 98, Tokyo, Sept., 211-216.
- Garnier J., König D. (1998) Scale effects in piles and nails loading tests in sand. Centrifuge 98, Tokyo, Sept., 205-210
- Hadjadji T. (1993) Analyse du comportement expérimental des pieux sous chargements horizontaux. Thèse de doctorat de l'ENPC, 307 pages.
- Norme française NFP 94-151 (1993) Essais statique de pieu isolé sous effort transversal.
- Ovesen N. K. (1979) The scaling law relationships. Design parameters in geotechnical engineering, 7th ECSMFE, Brighton, Vol.4, 319-323.
- Rosquoët F. (2004) Pieux sous charge latérale cyclique. Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Nantes et de l'Université de Nantes, 305 pages.
- Rosquoët F., Thorel L., Garnier J., Canepa Y. (2007), Horizontal cyclic loading of piles installed in sand. Soils and Foundations, october, Vol.47, No.5, 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, p.17-28