



ETUDE SUR MODELES CENTRIFUGES DE LA RESISTANCE LATERALE DES PIEUX DANS LE SABLE.

S. MEZAZIGH⁽¹⁾ ; D. LEVACHER⁽²⁾ ; J. GARNIER⁽¹⁾

⁽¹⁾ Laboratoire Central des Ponts et Chaussées - BP 19 - 44340 BOUGUENAI

⁽²⁾ Laboratoire de Mécanique des Fluides - Quai Frissard - 76055 LE HAVRE CEDEX

ABSTRACT

Theoretical study of the behaviour of laterally loaded piles is difficult since this problem is tridimensional. Researches can be conducted on full-scale tests but this approach has some limitations, for example when many tests are needed (parametric studies). Centrifuge modelling is then an efficient tool and several series of tests were performed on the LCPC centrifuge in order to investigate the effect of different parameters on lateral resistance of piles (characteristics of the sand and of piles, group effect). The paper describes the modelling techniques and the results obtained (head displacements, bending moments curves). These experimental results are compared with those from usual designing methods.

1. INTRODUCTION

Le problème des pieux ou groupes de pieux chargés latéralement est souvent rencontré dans les fondations des structures telles que les ponts, les quais et dans le domaine de l'offshore. Un pieu soumis à un chargement latéral est souvent influencé par la présence d'autres pieux voisins et cette interaction est connue sous le nom d'effet de groupe.

Plusieurs méthodes basées sur certaines hypothèses simplificatrices ont été proposées pour l'analyse et l'étude des pieux isolés chargés latéralement. La plus utilisée est le modèle élastique de WINKLER représentant le sol par des ressorts non-linéaires. Cependant, très peu de résultats sont disponibles sur l'effet de groupe. Quelques méthodes théoriques ont été proposées pour tenir compte de cet effet par l'introduction de facteurs d'interaction des groupes de pieux (O'Neil et al, Poulos, Randolph). Cependant, toutes ces méthodes ne reflètent pas correctement le degré de non-linéarité observé dans l'interaction pieu-sol-pieu. Un programme d'études expérimentales, sur sites réels et sur modèles réduits centrifugés, a été entrepris au LCPC pour préciser cet effet de groupe, en particulier dans les massifs sableux.

Dans cet article, les résultats d'une série d'essais sur des modèles centrifugés de couples de pieux et de pieux isolés chargés latéralement dans un sable sont présentés et discutés.

2. ETUDE EXPERIMENTALE

Les pieux utilisés sont des tubes en acier de 8mm de diamètre externe (B) et de 300mm de longueur totale (L), avec une fiche de 200mm. Ces pieux sont considérés comme souples (élancement $\lambda=L/B=37.5$). Ils sont soumis à une accélération centrifuge de 40g, simulant un prototype de 12m de longueur totale et de 0.32m de diamètre externe.

Le sable utilisé est le sable de Fontainebleau blanc dont la taille des grains varie entre 0.12mm et 0.3mm. Ses principales caractéristiques sont résumées dans le tableau I.

γ	(KN/m ³)	26.5
γ_{dmin}	(KN/m ³)	13.9
γ_{dmax}	(KN/m ³)	16.6
φ^{**}	(°)	29° 5-35°2

* déterminée en laboratoire

** valeurs obtenues à la boîte pour $I_D = 53$ et 97%

Tableau 1 : Caractéristiques du sable blanc de Fontainebleau

Le sable est déposé par pluviométrie autour des pieux à un poids volumique de 16 KN/m³ et les pieux sont considérés comme forés. La disposition des pieux dans le conteneur est représentée sur la figure 1 (2 pieux isolés P11 et P12 et 5 couples présentant des espacements relatifs S/B de 2 à 10).

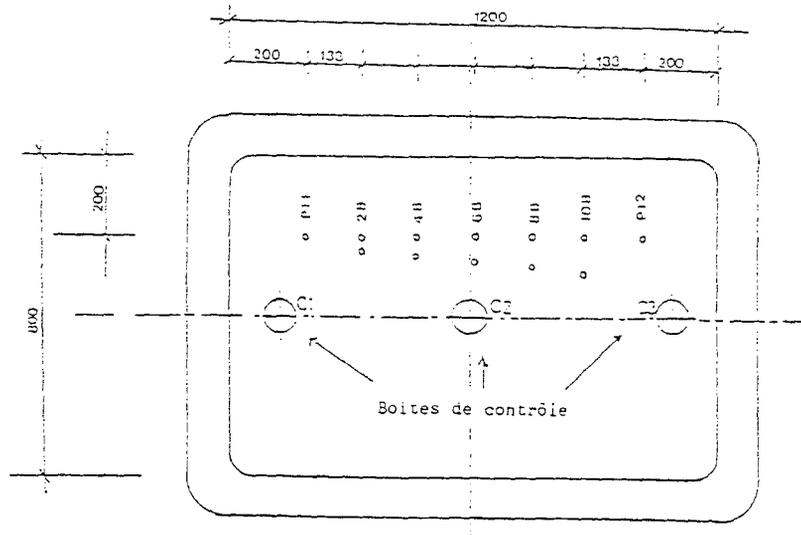


Fig.1 : Implantation générale.

Les boites calibrées C1, C2 et C3 placées au fond du conteneur permettent de contrôler la densité du massif à la fin des essais ; les résultats des mesures de densité effectuées sont présentés ci-dessous:

	C ₁	C ₂	C ₃
γ (KN/m ³)	16.15	16.27	16.12

Tableau II : Poids volumiques mesurés à l'aide des boites calibrées

Le poids volumique moyen est donc 16.18 KN/m³ soit un écart relatif de 1 % par rapport au poids volumique prévu.

Afin de déterminer les courbes des moments le long des pieux, un extensomètre amovible, équipé de jauges, est introduit à l'intérieur du pieu. L'extensomètre consiste en une lame en aluminium de 2mm d'épaisseur sur laquelle ont été collées 10 paires de jauges régulièrement espacées (20mm). Un deuxième extensomètre, similaire au précédent, mais équipé de 5 paires de jauges est installé dans le pieu arrière dans le cas des couples.

Outre l'équipement en jauges, trois capteurs de déplacement notés DT10, DT11 et DT15 mesurent le déplacement et la rotation en tête des pieux comme le montre la figure 2.

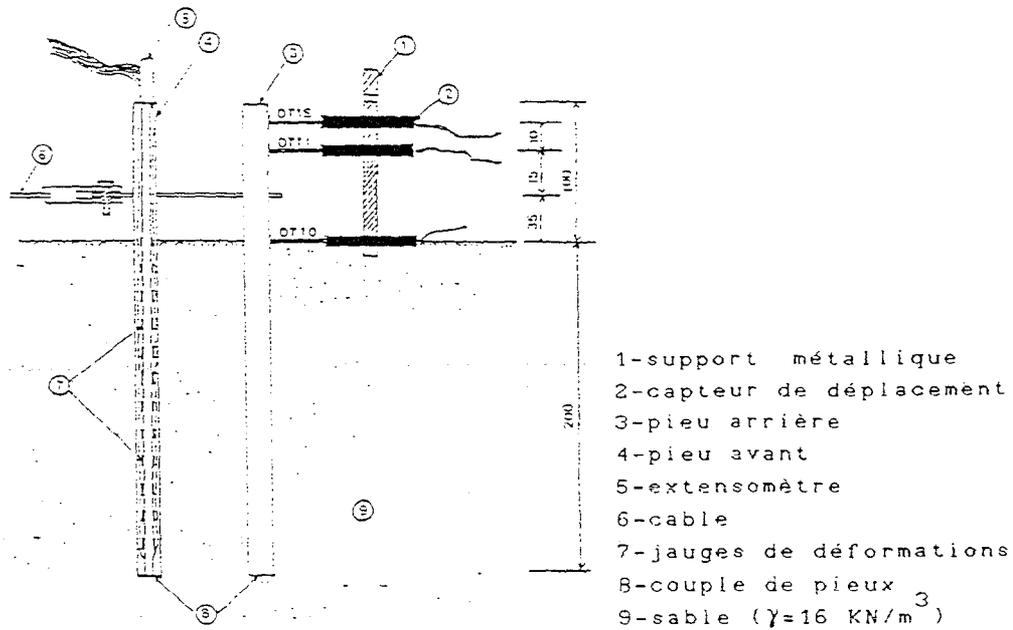


Fig.2 : Instrumentation des pieux.

L'effort latéral est obtenu grâce à un dispositif de chargement embarqué, piloté depuis la salle de contrôle et décrit en Réf.9. L'effort agit dans la direction de la ligne joignant les centres des pieux ($\beta=0$). Le chargement est effectué par palier de 2 daN pour les pieux isolés et de 4 daN pour les couples de pieux (Figure 3).

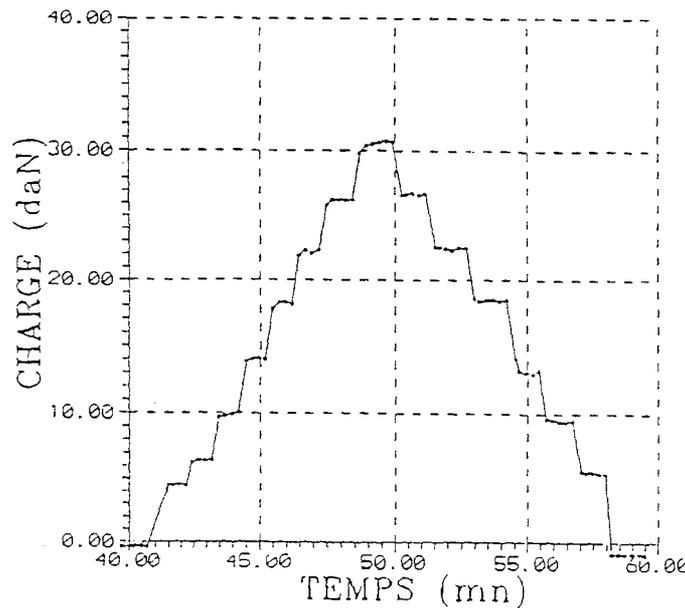


Fig.3 : Courbe de chargement en fonction du temps.

3. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

1 Déplacements en tête

Les courbes charge-déplacement de la figure 4 montrent qu'une réduction de l'espacement entre pieux conduit à une augmentation des déplacements nécessaires pour reprendre un effort donné (Effet de

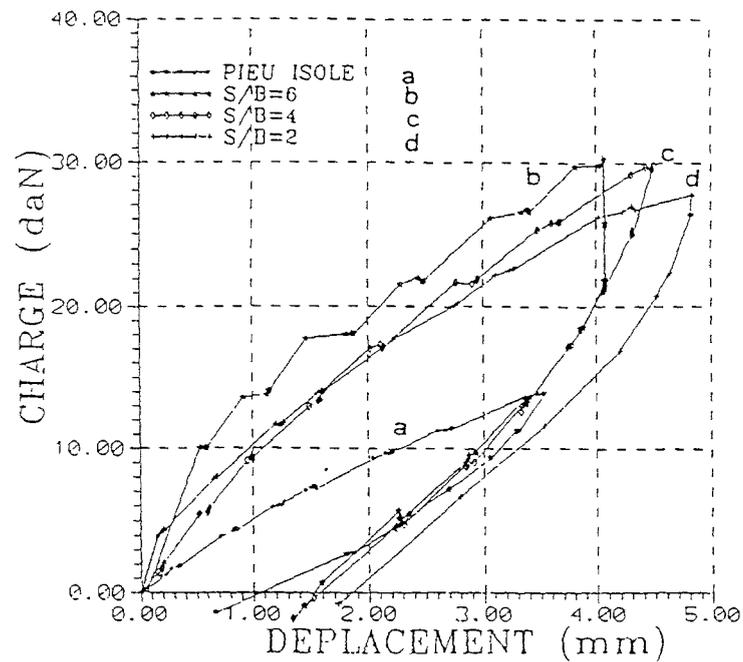


Fig.4 : Courbe charge-déplacement (conteneur 9)

Ces résultats prévisibles confirment d'autres essais antérieurs (Réf.10) qui avaient montré que cet effet de groupe n'était plus sensible, dans le cas de pieux en ligne, pour des espacements supérieurs à environ $8B$.

Sur la figure 4 en effet, pour un déplacement donné, la charge reprise par le couple $S/B = 6$ (courbe b) est très proche du double de la charge du pieu isolé (courbe a). Les couples $S/B = 4$ (courbe c) et $S/B = 2$ (courbe d) ne reprennent par contre que des charges de 10 à 15% plus faibles.

2. Moments

L'effet de groupe est également visible sur les courbes des moments de la figure 5. Les moments maximaux décroissent lorsque l'espacement des pieux augmente et la courbe des moments du pieu isolé est obtenue, sur les couples, lorsque l'espacement atteint 8 à $10B$. On retrouve la valeur limite, déjà observée, d'un espacement d'environ $8B$ pour lequel l'effet de groupe sur des pieux en ligne ne se fait plus sentir.

On note par ailleurs que les moments maximaux sont situés à des profondeurs de 50 mm environ, soit 25% de la fiche des pieux.

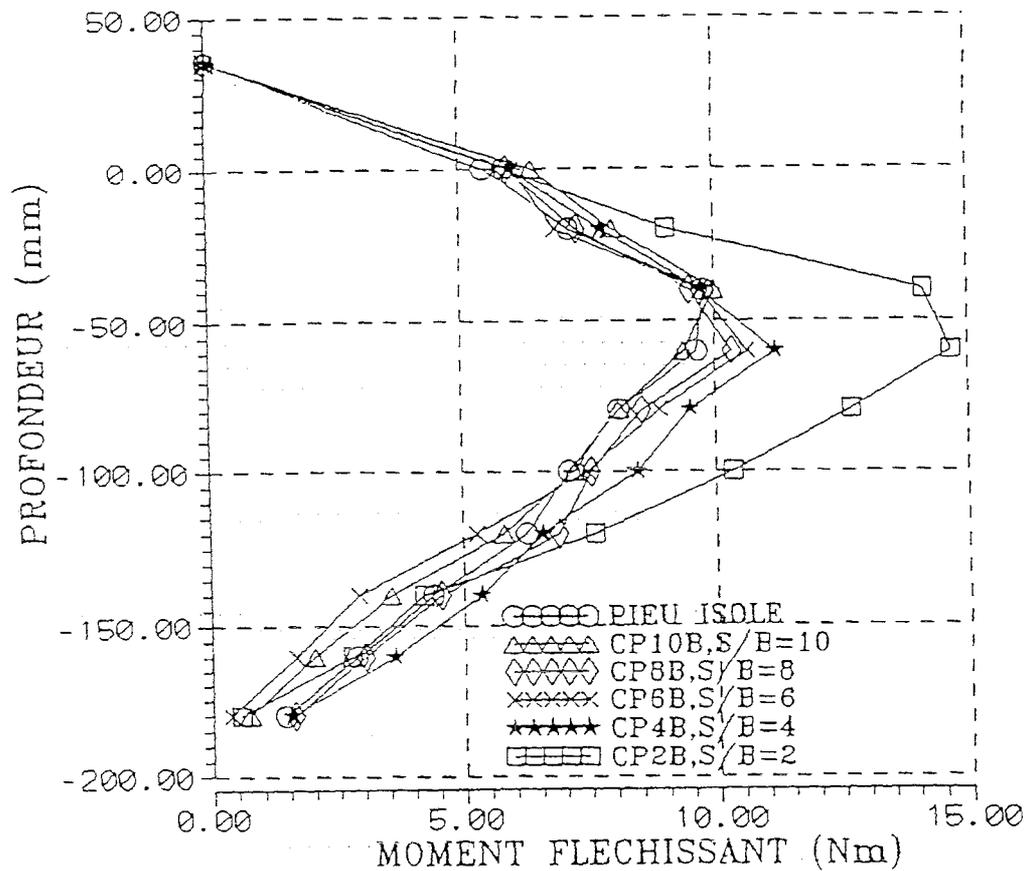


Fig.5 : Courbe des moments sur les pieux modèles " avant " à différents espacements

(Effort H de 15.6 daN pour le pieu isolé et entre 16.9 et 18.4 daN pour les couples).

3. Répartition des efforts entre les deux pieux

La comparaison de la courbe des moments sur le pieu avant et le pieu arrière du couple est représentée sur la figure 6 pour le couple $S/B = 2$; on remarque que les moments au niveau du pieu avant sont nettement supérieurs à ceux du pieu arrière. Cette constatation a été faite pour tous les couples étudiés avec les différents espacements (2B à 10B).

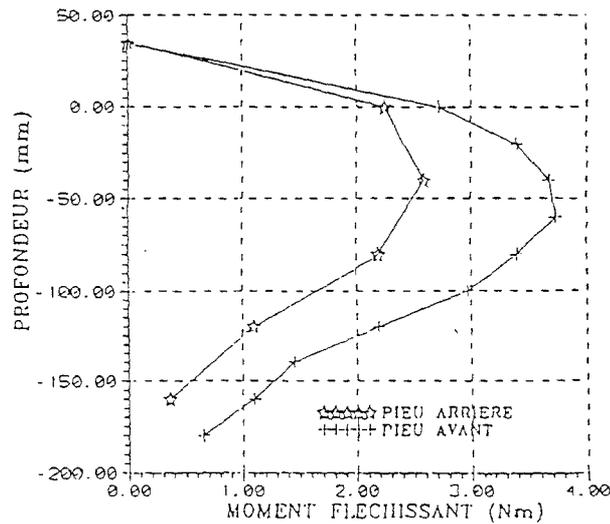


Fig.6 : Moment sur le pieu avant et le pieu arrière du couple (pieux modèles, conteneur 9).

Pour le cas S/B = 2 présenté sur la figure 6, les moments maximaux sont respectivement de l'ordre de 3,7 N.m pour le pieu avant et 2,5 N.m pour le pieu arrière soit près de 50% supérieur sur le pieu avant.

4. Courbes de réaction P-Y

A l'heure actuelle , la notion du module de réaction connaît une large application dans le calcul des fondations . La théorie du module de réaction se base sur la courbe P-Y qui décrit la loi d'interaction entre le pieu et le sol. La pression du sol "P" en un point quelconque le long pieu peut être obtenue par une double dérivation de la courbe des moments. Le déplacement en un point quelconque le long du pieu est obtenu par une double intégration de la courbe des moments en utilisant comme constantes d'intégrations, la rotation et le déplacement mesurés par les capteurs à la surface du sol. Ces relations sont exprimées mathématiquement par les équations suivantes.

$$P = \frac{d^2M(z)}{dz^2} \quad (1)$$

$$Y = \frac{1}{E.I} \int \int M(z). dz. dz. + C_1. Z + C_2 \quad (2)$$

où

- z : la profondeur à partir de la surface du sol
 - M(z) : le moment fléchissant, fonction de la profondeur
 - EI : la rigidité du pieu
 - P : réaction du sol par unité de longueur du pieu
- C₁ et C₂ sont les constantes d'intégrations.

La précision des mesures de moments obtenue avec les extensomètres amovibles utilisés s'est révélée insuffisante pour permettre la double dérivation. Dans cette méthode de détermination du diagramme de pression P, la pression à toute profondeur est donnée par la dérivée seconde, soit la courbure de la courbe des moments. A ce jour, seules les mesures par des jauges collées directement sur les pieux ont permis ces calculs des profils de pression et la détermination expérimentale des courbes P-Y (Bouafia, Réf.5).

Par contre les courbes de chargement expérimentales (charge en tête-déplacement en tête) ont pu être comparées aux courbes prévues par différentes méthodes au module de réaction (American Petroleum Institute 1991, Terashi, Canadian Foundation Engineering Manual).

Les courbes P-Y proposées par ces trois méthodes ont été introduites dans le calcul du pieu isolé, effectué à l'aide du logiciel PILATE (cf.figure 7). Les conditions aux limites étaient identiques dans les trois méthodes (libre en tête, encastré en pointe) et étaient obtenues à partir des valeurs de déplacements et moments mesurés en surface .

Par la méthode API-91 (Réf.3 et 5) les courbes de réaction sont de type tangente hyperbolique dépendant du type de chargement (cyclique ou statique), de l'angle de frottement et de la densité relative . Les calculs ont été effectués avec les deux valeurs de l'angle de frottement 30° et 35° correspondant à des poids volumiques de 15.2 et 16.5 kN/m³ encadrant le poids volumique du massif d'essai, soit 16 kN/m³ .

Dans les travaux de Terashi et al (Réf.7) utilisant des modèles de pieux centrifugés, chargés latéralement dans le sable , les courbes de moments ont été lissées par des polynômes ; une double dérivation et intégration ont permis d'obtenir la courbe P-Y et les auteurs ont ajusté ces courbes par l'expression :

$$P = K_s \cdot Z \cdot Y^{1/2} \quad (3)$$

avec
$$K_s = \sqrt{\frac{0.8}{B}}$$

Cette expression a déjà été proposée par KUBO (1965), à la suite d'essais à 1G, sur des modèles de pieux dans un sable .

Enfin, le règlement Canadien C.F.E.M (Canadian Foundation Engineering Manual,Réf.6) préconise pour les pieux chargés latéralement en tête une réaction du sol P (modèle de réaction élastique de Winkler)proportionnelle au déplacement Y:

$$P = K.Y \quad (4)$$

où le coefficient de réaction K dépend du type et la densité du sol , de la géométrie du pieu et de la valeur de la charge appliquée. Pour les sols pulvérulents, ce coefficient est donné par :

$$K = \eta_H \cdot \frac{Z}{B}$$

où

η_H = coefficient relié à la densité du sol;

Z = profondeur à partir de la surface du sol.

B = diamètre du pieu .

La figure 7 regroupe les courbes de chargement déduites des trois méthodes comparées à la courbe expérimentale obtenue sur le pieu modèle (conteneur7). On constate sur cette figure que la méthode A.P.I ainsi que le règlement Canadien sous-estiment les déplacements en tête quel que soit le niveau d'effort. La méthode Terashi conduit à des résultats en accord avec les valeurs expérimentales en début de chargement et surestime les déplacements pour les efforts importants. Néanmoins, les ordres de grandeur sont, dans tous les cas, correctement prévus.

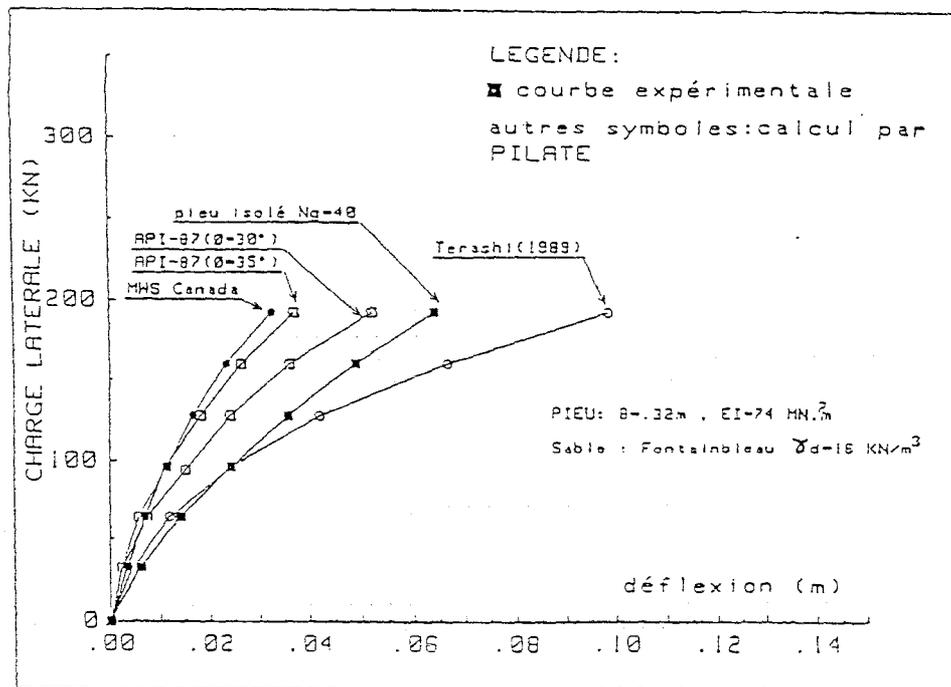


Fig.7 : Comparaison des déplacements mesurés et calculés à partir des courbes P-Y (prototype).

4. CONCLUSION

Différents résultats concernant l'influence de l'espacement sur le comportement des couples de pieux en ligne peuvent être tirés des essais sur modèles réduits centrifugés présentés ici.

Ces nouveaux essais ont confirmé des résultats antérieurs fixant à environ 8B l'espacement limite entre pieux au-delà duquel l'effet de groupe n'est plus sensible, ni sur les valeurs des déplacements en tête, ni sur celles des moments maximaux. De même, la répartition inégale des efforts entre le pieu avant et le pieu arrière a été à nouveau mise en évidence (moment maximum 50% plus fort sur le pieu avant).

Enfin, les courbes expérimentales charge-déplacement en tête ont été retrouvées par des calculs au module de réaction utilisant les courbes P-Y proposées dans les méthodes américaine (A.P.I.), canadienne (C.F.E.M.) et japonaise (Terashi). Cependant, les méthodes API et canadienne sous-estiment les déplacements alors que la méthode japonaise les surestime.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) H.G.POULOS "Behavior of laterally loaded piles : II Pile groups", A.S.C.E, vol 97,N SM5, MAY 1971, pp 733-751.
- (2) M. F. RANDOLPH "The reponse of flexible piles to laterally loading", GEOTECHNIQUE 31, N 2, 1981, pp 247-259.
- (3) J.GARNIER,D.LEVACHER,JC.CINTRA "Essais de chargement latéral de pieux en ligne ($\beta=0$) dans un massif de sable, conteneur 1", Rapport L.C.P.C, 1989.
- (4) S. MEZAZIGH "Comportement d'un couple de pieux sollicité latéralement (étude paramétrique)", Rapport de mémoire du D.E.A, E.N.S.M, 20 SEPT.1990.
- (5) A. BOUAFIA "Modélisation des pieux chargés latéralement en centrifugeuse", Thèse de doctorat, E.N.S.M, 20 Déc.1990.
- (6) B.H.FELLENUS,L.SAMSON,F.TAVENAS "Geotechnical guidelines pile design" Public works CANADA, marine works sector,Ottawa,72P. August 1989.
- (7) M.TERASHI, M.KITAZUME,K.KAWABATA "Centrifuge modeling of laterally loaded piles", I.C.S.M.F.E Rio de Janeiro 1989, Vol.2, pp 991-994.
- (8) D.LEVACHER "Groupe de pieux sollicité latéralement, analyse et reflexions en vue d'une étude paramétrique en centrifugeuse", Rapport L.C.P.C, DEC.1988, pp30.
- (9) J.GARNIER, L.M.COTTINEAU (1988) "La centrifugeuse du L.C.P.C. Moyens de préparation des modèles et instrumentation", Centrifuge 88, Paris, pp 83-92.
- (10) S.MEZAZIGH, D.LEVACHER, J.GARNIER "Comportement d'un couple de pieux sollicité latéralement", Génie civil - Génie côtier, premières journées inter-universitaires, LE HAVRE 22-23 NOV.1990, pp 149-160.

