



Etude du comportement de pieux d'un groupe sous chargement latéral monotone

S.Mezazigh, D.Levacher

GRGC, Centre de Géomorphologie, UMR 6143 CNRS, 24, rue des Tilleuls, 14000 CAEN

Résumé :

Dans cet article, est présentée l'étude expérimentale et en particulier l'étude de l'effet de groupe sur le comportement d'un couple de pieux chargé latéralement dans un massif sableux et celle de l'influence du mode d'installation dans le sable sur le comportement des pieux chargés latéralement.

L'approche expérimentale sur modèles réduits centrifugés est décrite ainsi que la méthode permettant la détermination des pressions exercées par le sol par lissage, puis par double dérivation de la courbe des moments fléchissants mesurés le long du pieu. L'effet de groupe sur les déplacements des pieux et sur les moments fléchissants est analysé. Les courbes de réaction P-y sont ainsi obtenus pour différents espacements entre les pieux des couples. Des coefficients de réduction à appliquer aux courbes de réaction d'un pieu isolé de référence sont enfin déduits de ces essais.

Abstract:

The paper concerns a study of the group effect and the installation method effect on the behavior of laterally loaded couples of piles in sand. The experimental approach centrifuge modelling on piles and the method used to provide soil reaction by double differentiating and integration the bending moment curves along pile are described. Group effect on displacements and bending moments of piles is first analysed. Other important results have been used to determine coefficients applied to P-y curves of a reference single pile to take into account the group effect. The responses of reference single pile and couples with different spacings are compared and coefficients are proposed for practical application.

1.Introduction

Même si le nombre de publications relatives à ces travaux sur ce sujet est important, aucune méthode d'application pratique n'a encore été dégagée. Les principaux enseignements de l'étude bibliographique sont les suivants. Les approches théoriques conduisent à des résultats souvent éloignés des données expérimentales. Dans le cas des méthodes basées sur l'élasticité, les interactions entre pieux ne sont pas très représentatives. Ainsi la non symétrie des efforts observée lors des essais n'est pas obtenue par les calculs en élasticité. Pour les modèles numériques, les réponses sont étroitement liées aux modèles rhéologiques introduits pour le sol et les interfaces sol-pieu et des calages sont encore nécessaires. Le problème est tridimensionnel et l'interaction sol-pieu est trop complexe pour que ces études puissent être conduites à l'aide de méthodes théoriques ou numériques. Compte tenu du nombre d'essais de contrôle qu'il faudrait envisager pour vérifier chaque cas étudié, il n'est pas possible d'utiliser cette voie expérimentale. D'ailleurs ces essais ne peuvent pas toujours être réalisés sur des pieux réels.

Les essais sur modèles réduits centrifugés constituent l'une des approches retenues car ils présentent les mêmes avantages que les essais sur modèles en laboratoire (répétitivité, contrôle rigoureux des conditions expérimentales, études paramétriques possibles, étalonnage

de la réponse des pieux instrumentés avant essai, ...). En outre, du fait du respect de certaines conditions de similitude et en particulier des forces de masses, les résultats peuvent être transposés aux ouvrages en vraie grandeur, ce qui n'est pas le cas des modèles de laboratoire. Sur ces considérations, une étude expérimentale a été entreprise sur l'effet de groupe. L'objectif final est de fournir aux praticiens des coefficients simples, à appliquer aux courbes de réaction obtenues pour un pieu isolé pour déduire celles relatives aux pieux disposés en groupe.

2. Modification des courbes $P-y$ due à l'effet de groupe

Les méthodes aux modules de réaction proposent de modifier la courbe de réaction $P-y$ de chaque pieu dans le groupe pour considérer l'effet d'ombre perçu par les pieux suivants. Le pieu avant est affecté d'un facteur P_m , généralement inférieur à 1, sur les pressions (figure 1a). On peut aussi appliquer un facteur Y_m , généralement supérieur à 1, sur les déplacements (figure 1b).

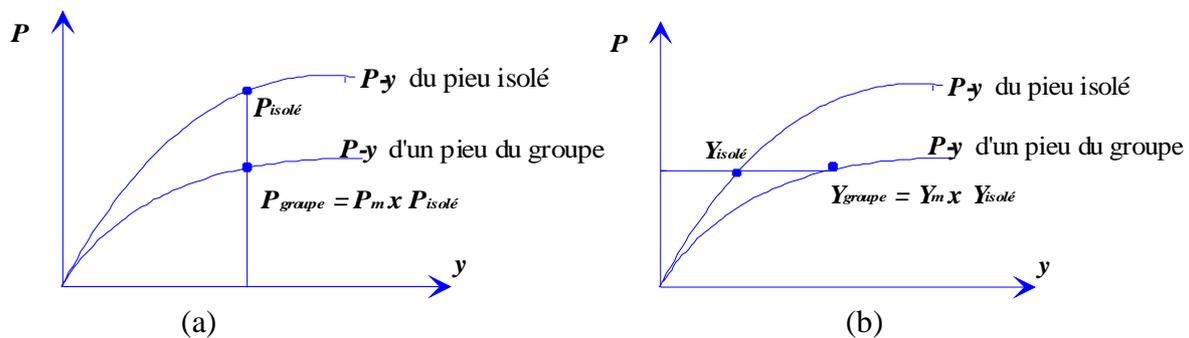


Figure 1 : Définition des coefficients multiplicateurs P_m et Y_m

3. Etude expérimentale

3.1. Instrumentation des pieux

Les pieux utilisés dans cette campagne d'essais sont des tubes en aluminium AU4G. Les pieux ont une longueur totale de 380 mm, un diamètre externe de 18 mm, une épaisseur de 1 mm et une rigidité de 201 N.m². La fiche dans le sol est fixée à 300 mm. Les deux pieux ont été équipés identiquement par 20 paires de jauges de déformation régulièrement espacées de 15 mm le long des pieux. Les essais ont été conduits à une accélération centrifuge de 40g. Ceci permet donc de simuler des pieux prototypes de 720 mm de diamètre externe et de 12 m de fiche. La rigidité du pieu réel est de 514 MN.m². Chaque pieu du couple a été instrumenté en tête par deux capteurs de déplacement inductifs de type HBM de course ± 10 mm.

L'application de l'effort latéral est obtenu à l'aide d'un dispositif de chargement spécial (Mezazigh, 1995), et est transmis aux pieux grâce à un câble métallique passant par une poulie et traversant les deux pieux comme le montre la figure 2. Les précisions de mesure des capteurs de déplacement sont de ± 0.02 mm et de ± 2 N pour le capteur de force.

Le programme réalisé dans ce but comporte 40 essais sur des couples de pieux identiques disposés à différents espacements variant de 2 à 8B et répartis sur 5 conteneurs. Plusieurs modes et ordres de mise en place des pieux dans le massif de sable ont été testés. Les distances entre pieux sont comptées d'axe à axe ($S=2B$ correspond donc à un entre-axe de 2B, par exemple).

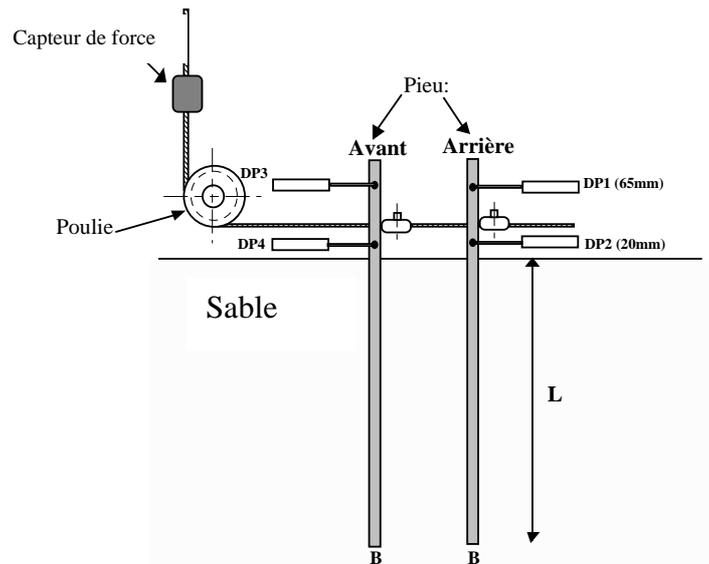


Figure 2: Notation et instrumentation des pieux.

3.2. Massif de sol

Le massif de sable est constitué de sable fin de Fontainebleau blanc déposé dans des conteneurs rectangulaires (1,20 m x 0,80 m) par pluviométrie à l'aide d'une trémie automatique. Ce système de remplissage permet de confectionner un massif de sable homogène, avec des écarts sur les densités inférieurs à 1% (Garnier *et al*, 1993, 1995). Deux poids volumiques différents ont été considérés (16.2 kN/m^3 et 15.4 kN/m^3) correspondant respectivement à des indices de densité de 0.81 et 0.63. La densité de mise en place est contrôlée *a posteriori* à l'aide de boîtes calibrées placées au sein du massif lors du remplissage.

Il s'agit d'un sable fin siliceux propre dont le diamètre moyen des grains est de $200 \mu\text{m}$. Pour le modèle des pieux retenus, le rapport entre le diamètre du pieu et celui des grains est d'environ 90 donc très supérieur à la valeur minimale de 40 habituellement admise pour éviter les effets d'échelle (Ovesen, 1979). Une vérification de la bonne homogénéité du massif de sable est réalisée en cours de rotation à l'aide des essais au mini-pénétrömètre statique (figure 3).

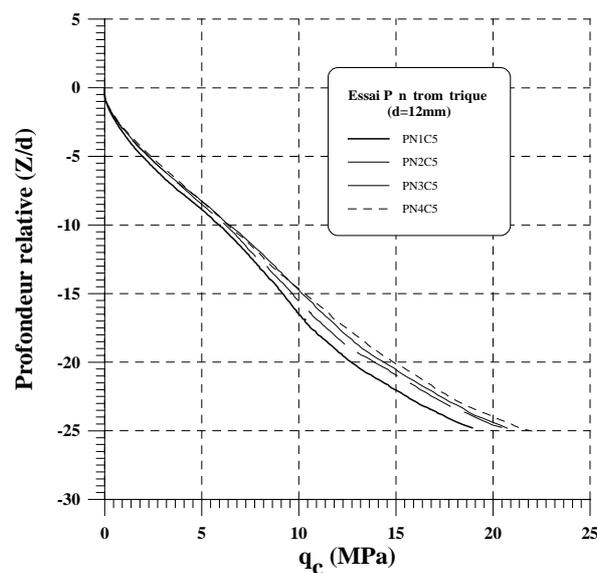


Figure 3: Mesures pénétrométriques en macrogravité sous accélération de 40g.

3.3. Mode d'installation des pieux dans le massif sableux

Plusieurs modes de mise en place des pieux ont été utilisés, soit par pluviation du sable autour du pieu, ce qui peut être assimilé à l'installation d'un pieu dans un forage (sans refoulement de sol) ; soit par battage avec refoulement de sol ou par vérinage avec refoulement de sol.

Les paramètres étudiés sont la distance entre les pieux du couple: 2B à 8B, le mode de mise en œuvre (avec ou sans refoulement) et l'ordre de mise en œuvre (pour les pieux avec refoulement).

Les deux pieux utilisés dans le couple sont récupérés, après chaque essai, pour être réutilisés dans les groupes suivants. Afin d'éviter les interactions, les pieux ont été disposés de telle façon que la distance entre les bords du conteneur et entre chaque zone d'essai soit supérieure à 10B. D'abord, l'analyse des réponses des couples a révélé que ces derniers sont très peu affectés par l'ordre de mise en place. L'effet de groupe, le plus net, a été observé sur les pieux forés. Par conséquent, on se limitera ici à la présentation de l'analyse des courbes $P-y$ liée uniquement à ce mode d'installation.

4. Résultats des essais

4.1. Courbes des moments fléchissants

L'analyse des moments fléchissants relatifs aux pieux forés montre une influence plus marquée de l'espacement entre les pieux sur leur comportement sous charge latérale. La figure 4 illustre l'influence de l'espacement sur les moments fléchissants des deux pieux du groupe.

Cette influence se manifeste d'abord sur la répartition de la charge latérale appliquée en tête. En effet, pour les faibles espacements on constate que le pieu avant du couple reprend une plus large part de l'effort latéral total appliqué en tête. Ainsi, le pourcentage de l'effort repris par le pieu avant est de l'ordre de 60% pour un espacement de 2B. La répartition de la charge s'équilibre entre les deux pieux du couple au fur et à mesure que leur espacement augmente et atteint 50% sur chacun des pieux à partir d'un espacement de 8B comme on le constate sur la figure 4.

Par ailleurs, on note également une influence de l'espacement sur les moments maxima ainsi que sur leur position en profondeur. En effet, le moment maximum sur le pieu avant à des espacements de 2B et 4B est environ 20% fois supérieur à celui du pieu arrière du couple. Par contre, la position du moment maximum est plus profonde sur les pieux arrière pour les faibles espacements (2B et 4B) mais elle est la même sur les deux pieux pour $S=8B$ comme le montrent les exemples de la figures 4.

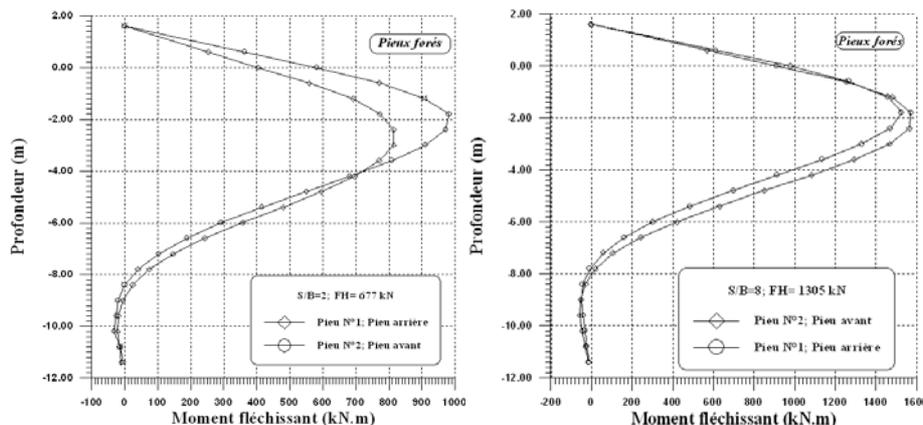


Figure 4 : Influence de l'espacement sur les courbes des moments fléchissants des pieux forés en données prototype ($S/B=2,8$; $\gamma=16.2 \text{ kN/m}^3$).

4.2. Influence de l'espacement des pieux sur les courbes de réaction

Les déformées de chacun des pieux du couple ont été déterminées par une double intégration des courbes des moments fléchissants et ce, pour les différents espacements variant de $2B$ à $8B$. De même, les courbes de pression le long de chacun des pieux ont été obtenues par une double dérivation des courbes des moments fléchissants à l'aide du logiciel SLIVALICS (Degny, 1985). Les figures 5 et 6 présentent des exemples des courbes de pression et de déplacement ainsi obtenues. Deux remarques importantes peuvent être faites à partir de ces figures. D'abord, on observe une forte interaction entre le pieu avant et le pieu arrière du couple pour les faibles espacements ($S/B=2$ et $S/B=4$). Cette interaction se traduit par une réduction des pressions sur le pieu arrière par rapport au pieu avant, d'autant plus forte que la distance entre les deux pieux diminue.

On note d'autre part que les points de pression et de déplacement nuls coïncident toujours. Pour le pieu arrière, ce point est situé à plus grande profondeur que pour le pieu avant. Cette remarque a déjà été faite sur les courbes des moments fléchissants pour ces pieux. Pour un espacement de $2B$, la profondeur du point de rotation varie de $0.35L$ à $0.45L$ pour le pieu avant alors que pour le pieu arrière cette profondeur varie de $0.45L$ à $0.55L$ (L étant la fiche du pieu). Pour les grands espacements (à partir de $8B$) la profondeur du point de pression et de déplacement nuls se stabilise autour de $0.4L$. A partir des courbes de pression P (figure 5) et de déplacement engendré y (figure 6), on construit les courbes de réaction $P-y$ pour les différents espacements étudiés. La figure 7 donne un exemple des courbes $P-y$ déterminées sur le pieu avant et sur le pieu arrière du groupe, pour un espacement de $2B$.

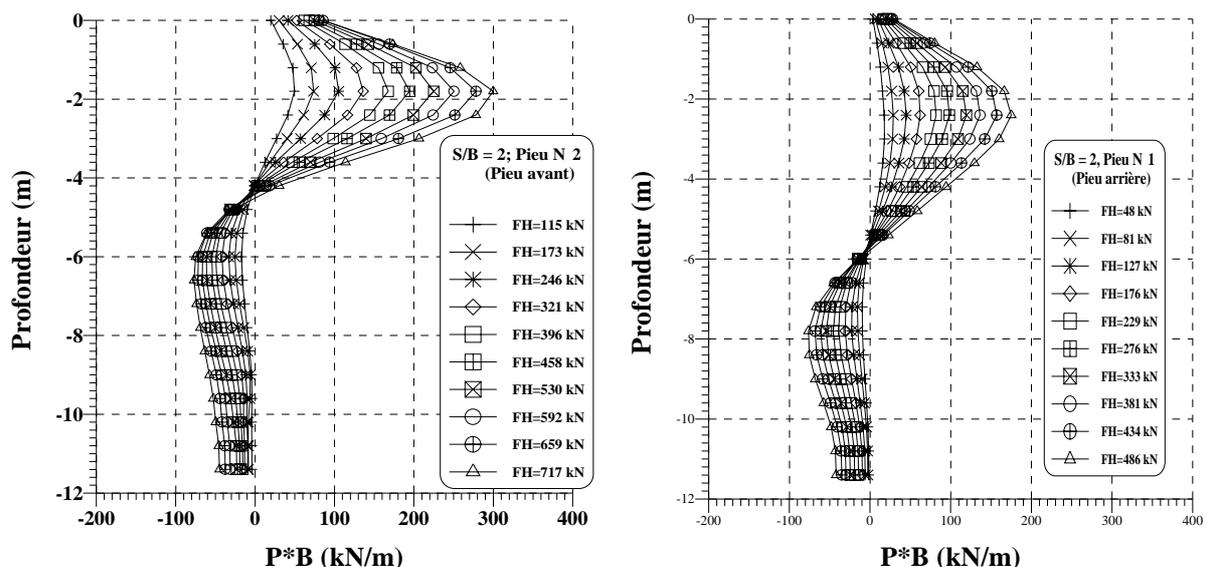


Figure 5: Courbes des pressions le long du pieu avant et du pieu arrière du groupe, pour différentes charges appliquées en tête en données prototype ($S/B=2$).

Des constatations de portée générale peuvent être faites sur ces courbes de réaction. Les réactions du sol, pour un déplacement donné, croissent avec la profondeur jusqu'à $3B$ ou $4B$. Au-delà de ces profondeurs les courbes $P-y$ semblent se stabiliser ou tout au moins évoluer beaucoup plus lentement. Ce seuil de $3B$ ou $4B$ pourrait correspondre à une profondeur critique. De plus en profondeur, vers $5B$ pour le pieu avant et $6B$ pour le pieu arrière, on note un changement de signe simultané des pressions et des déplacements, sans modification significative de la pente des courbes $P-y$ et donc de la raideur du sol. D'autre part, la comparaison des courbes de réaction des deux pieux, à profondeur identique, confirme la remarque faite précédemment: les réactions du sol sont plus fortes sur le pieu avant. Ce point est analysé dans le paragraphe suivant.

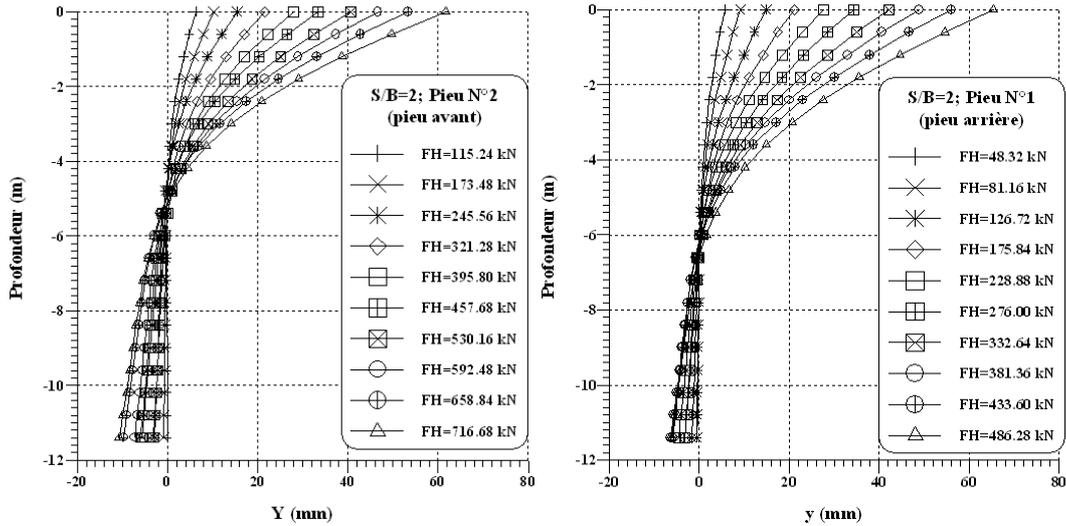


Figure 6: Courbes de déplacement le long du pieu avant et du pieu arrière en données prototype ($S/B=2$, conteneur n°5)

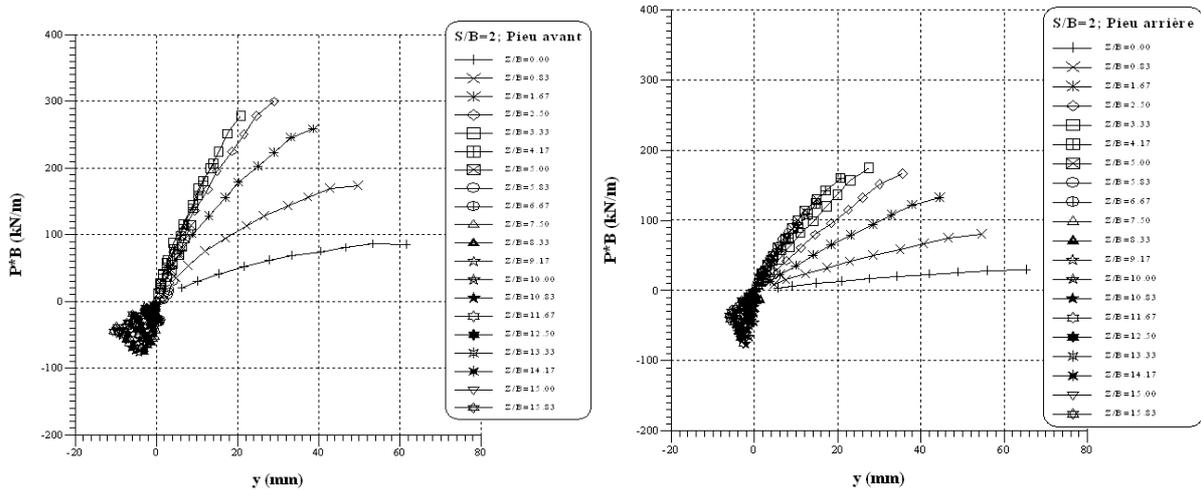


Figure 7: Courbes de réaction $P-y$ obtenues pour les deux pieux du groupe ($S/B=2, \gamma=16.2 \text{ kN/m}^3$), en données prototype.

4.3. Détermination des coefficients de réduction des courbes $P-y$ relatifs à l'effet de groupe

La figure 8 présente un exemple de comparaisons des courbes $P-y$, au-dessus de la profondeur critique, entre le pieu avant, le pieu arrière et le pieu de référence. Cette figure indique d'abord que, pour les faibles espacements (2B et 4B), une forte réduction de la résistance du sol se manifeste au niveau du pieu arrière. Cette réduction se réduit au fur et à mesure que l'espacement entre les deux pieux du groupe augmente. Par ailleurs, on constate que le pieu avant, qui est le plus sollicité, présente des courbes de réaction proches de celles du pieu isolé de référence. Sa réponse est par conséquent peu affectée par l'effet de groupe.

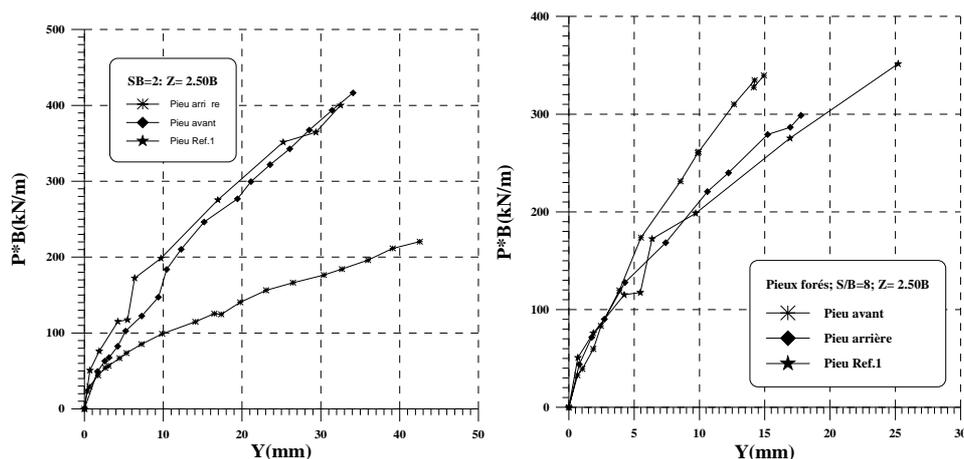


Figure 8: Comparaison des courbes de réaction des pieux du groupe et du pieu de référence ($S/B=2,8$; $Z=2,5B$), en données prototype.

La forme parabolique des courbes $P-y$ obtenues ne présente pas de paliers de résistance ultime bien marqués sauf près de la surface où les déplacements sont plus importants. Afin de faciliter la comparaison entre les courbes de réaction des différents pieux, des lissages des courbes $P-y$ ont été réalisés dans un repère logarithmique. Les résultats de ces lissages ont permis de représenter ces courbes par des expressions de la forme :

$$P * B = K * (y / B)^{0.7} \quad (1)$$

Ensuite, en comparant le taux de variation du coefficient K suivant la distance entre le pieu avant et le pieu arrière du groupe et avec celui du pieu de référence, il est possible d'en déduire les valeurs du coefficient de réduction de la résistance du sol présentées dans le tableau I. Ce dernier présente les valeurs moyennes des coefficients « r » calculés dans la partie supérieure des pieux. Une analyse fine montre que ces coefficients varient peu avec la profondeur dans la zone considérée, située au-dessus de la profondeur critique.

Tableau 1: Coefficient de réduction des courbes $P-y$ relatif à l'effet de groupe ($P_{(s/B)}/P_{Ref}$).

Espacement relatif S/B	Pieu avant r (%)	Pieu arrière r (%)
2	85	44
4	94	65
6	97	83
8	100	95

Ce tableau montre que, pour un couple de pieux disposés en ligne, la valeur du coefficient « r » du pieu avant varie assez peu autour de 100% . Ceci indique que le pieu avant se comporte à peu près comme un pieu isolé, indépendamment de l'espacement entre les pieux. Par contre, on note une influence considérable de l'espacement sur la réaction du pieu arrière pour les faibles espacements (2B et 4B). Ces résultats peuvent être traduits sous la forme des courbes données à la figure 9. Ils permettent de prévoir le comportement de couples de pieux en utilisant des logiciels comme PILATE ou GOUPIL (Degny *et al.* , 1989). Les courbes $P-y$

du pieu isolé peuvent être construites par les méthodes usuelles (à partir des résultats d'essais *in situ* comme préconisé par les règlements français tels que le Fascicule 62, 1993).

Les courbes P - y des pieux du groupe sont déduites des précédentes en appliquant les coefficients de la figure 9. Ces coefficients « r » proposés sont confrontés à l'ensemble des résultats synthétisés lors de l'étude bibliographique.

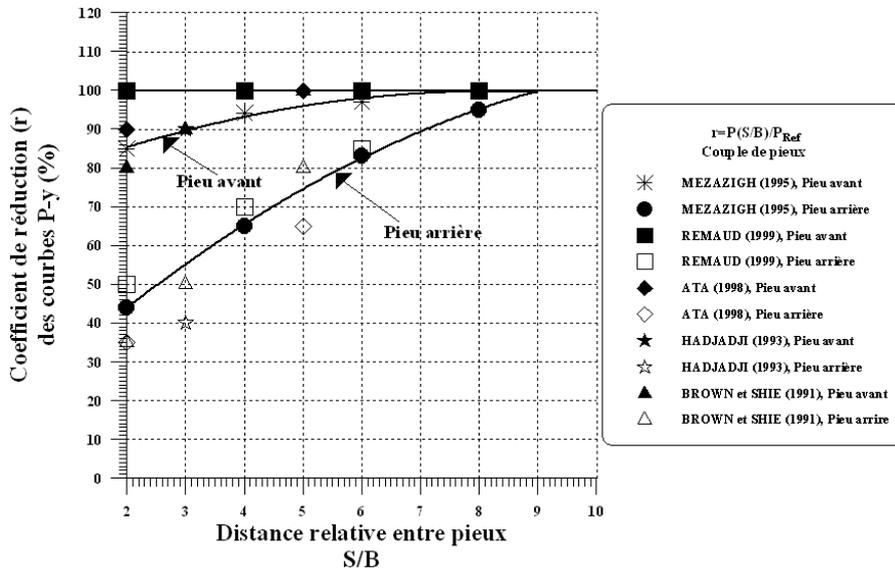


Figure 9: Couples chargés en ligne. Confrontation de différents coefficients de réduction

A part le coefficient proposé par (Remaud, 1999) où le coefficient « r » pour le pieu avant est égal à 1, la comparaison indique un effet de groupe sur le pieu arrière pour un espacement de $s/B=2$, jusqu'à $s/B=4$. Cela se traduit par un coefficient « r » égal à 0.85 en moyenne pour $s/B=2$ et évoluant ensuite jusqu'à $s/B=5$, où il atteint la valeur 1 (figure 9). Pour le pieu arrière, les coefficients proposés sont en bonne concordance avec l'ensemble des résultats de la littérature. Tous les auteurs trouvent ainsi un effet de groupe significatif pour un espacement de $s/B=3$. Certains l'ont aussi caractérisé pour un espacement $s/B=5$ (Ata, 1998, Mc Vay *et al*, 1998,1996,1995). Le fascicule 62 (1993) considère par contre que l'effet de groupe n'existe que pour des espacements inférieurs à $s/B=3$. Il surestime ainsi la résistance du groupe en chargement latéral.

Les résultats de ces essais devraient, cependant, être complétés par une étude aux grands déplacements des pieux afin d'affiner ces courbes de réactions surtout en profondeur.

5. Conclusions

Les essais avaient pour but de quantifier l'effet de groupe, en particulier sur les courbes de réactions P - y , dans le cas d'un couple de pieux. L'influence de plusieurs paramètres sur le comportement du couple de pieux disposés en ligne a été étudiée en utilisant toujours les mêmes pieux et le même sable. Pour les pieux sans refoulement (pieux forés), les résultats des essais montrent clairement l'influence de l'espacement sur le comportement des pieux. Comme ces pieux sans refoulement ne peuvent pas avoir fait évoluer les caractéristiques du massif, l'augmentation des efforts de groupe présentés ci-dessus proviennent d'interactions géométriques, uniquement liées à la proximité des pieux du couple.

L'étude a ainsi montré que l'effet de groupe est essentiellement géométrique (interaction des pieux entre eux à travers le massif de sol). La composante pouvant provenir de l'évolution du massif du fait de la mise en place des pieux n'est pas perceptible dans les configurations testées. Il convient cependant de rappeler que les pieux ont été mis en place à 1g, avant la centrifugation des modèles et que les essais n'ont porté que sur des massifs de sable.

L'effet de groupe observé sur certains couples de pieux battus pourrait se révéler encore plus important si les contraintes géostatiques avaient été simulées pendant la mise en place des pieux. Les travaux présentés portent sur l'étude directe de l'effet de groupe sur les courbes de réaction P - y . L'instrumentation des pieux du groupe par des jauges de déformations a donné la possibilité de construire les courbes P - y de chaque pieu et d'en déduire ensuite l'influence de l'espacement sur ces courbes de réaction. On a pu d'abord mettre en évidence, pour les faibles espacements (2B et 4B), la forte pression exercée sur le pieu avant et d'autre part une nette réduction des pressions sur les pieux arrières. Des essais prévus sur les groupes de 4 et 9 pieux permettront par ailleurs de généraliser les résultats obtenus sur les couples.

Un lissage approprié de ces courbes dans la partie supérieure du pieu a montré que l'effet de l'espacement est peu ressenti par les courbes P - y du pieu avant. Le coefficient de réduction r est proche de 1 et donc les courbes P - y du pieu avant sont identiques à celles du pieu isolé indépendamment de l'espacement. Une influence considérable de l'espacement est notée sur les courbes P - y du pieu arrière. Les résultats des lissages ont montré qu'à un espacement de 2B, la résistance du sol au niveau du pieu arrière est réduite d'environ 50% par rapport à celle du pieu isolé. A partir de 8B l'effet de groupe disparaît et les courbes P - y du pieu arrière et du pieu isolé sont identiques.

6. Références

1. Ata N. (1998), "*Etude du comportement de micropieux sous chargement latéral : Construction numérique des courbes p - y et couplage fluide-squelette*", Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 168p.

2. Brown D.A. et Shie C.F. (1991), "*Modification of P - y curves to account for group effects on laterally loaded piles*", Geotechnical Engineering Congress, Vol.1, pp.479-490.

3. Degny E. et Romagny J.C. (1989), "*Calcul des efforts et déplacements dans les groupes de pieux : le programme GOUPIL*", Bulletin de Liaisons des Laboratoires des Ponts et Chaussées, N°162, pp.3-12.

4. Degny E. (1985), "*SLIVALICS : Programme de lissage par spline quintique, calcul du paramètre d'ajustement par une méthode de validation croisée (notice d'utilisation)*", Rapport interne LCPC, F.A.E.R. 1.05.10.4, 80p.

5. Fascicule N°62, Titre V (1993), "*Règle techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages de génie civil*", Cahier des clauses techniques générales applicables aux marchés publics de travaux, 182p.

6. Garnier J., Kus B., Levacher D., (1993), "*Cartographie des densités de massifs de sable reconstitués par pluviation*", 6^{ème} Colloque Franco-Polonais de Mécanique des Sols, Douai, pp.105-112.

7. Garnier J. (1995), "*Modèles réduits en mécanique des sols*", A.U.G.C, Ecole Centrale de Nantes, 18 Mai, pp. 21-44.

8. Hadjadji T. (1993), "*Analyse du comportement de pieux sous chargement horizontaux*", Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 307p.

9. Mc Vay M.C., Zhang L., Molnit T. et Lai P. (1998), "*Centrifuge Testing of Large Laterally Loaded Pile Groups in Sands*", Journal of Geotechnical Engineering, A.S.C.E., Vol. 121, pp.436-441.

10.Mc Vay M.C., Shang T. et Casper R.(1996), "*Centrifuge testing of fixed-head laterally battered and plumb pile groups in sand*", Geotechnical Testing Journal, A.S.T.M., Vol. 19, N°1, pp.41-50.

11.Mc Vay M.C., Casper R et Shang T. (1995), "*Lateral response of three-row groups in loose to dense sands at 3D and 5D pile spacing*", Journal of Geotechnical Engineering, A.S.C.E., Vol.121, N°5, pp.436-441.

12.Mezazigh S. (1995), "*Etude expérimentale des pieux chargés latéralement : Proximité d'un talus et effet de groupe*", Thèse de doctorat de l'Université de Nantes et de l'Ecole Centrale de Nantes, 217p.

13.Ovesen N.K (1979). "*The scaling law relationship*", Panel discussion. 7ème E.C.S.M.F.E, Brighton, vol.4, pp.319-323.

14.Remaud D. (1999), "*Pieux sous charges latérales : Etudes expérimentale de l'effet de groupe*", Thèse de Doctorat, Université de Nantes, Ecole Centrale de Nantes, 7 décembre, 229p.