



# COMPORTEMENT D'UN COUPLE DE PIEUX SOLLICITE LATÉRALEMENT

S. Mezazigh ; D. Levacher ; J. Garnier  
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Université du Havre,  
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

## **ABSTRACT :**

*Tests on reduced scale models of laterally loaded piles in sand were carried out on the L.C.P.C centrifuge. The aim was to investigate the group effects for couple of piles. The paper describes the modelling techniques and presents the tests results. The efficiencies of couples of piles are compared with results from other methods.*

## **1 - INTRODUCTION :**

En pratique, dans les techniques des fondations, les pieux sont de plus en plus fréquemment conçus de façon à résister à des efforts horizontaux provenant des superstructures. Ils sont très souvent installés en groupe de plusieurs pieux faiblement espacés. Une riche littérature est disponible sur la performance des pieux isolés chargés latéralement; plusieurs méthodes basées sur certaines hypothèses simplifiées ont été proposées pour leur analyse et études (Reese et Matlock, 1956; Banerjee et Davies, 1978; Poulos, 1971). Très peu de résultats sont par contre disponibles sur l'effet de groupe.

O'Neil et Gazzally (1977) ont proposé une méthode basée sur la relation pression-déplacement (P-Y), mais en introduisant des facteurs d'interaction du groupe calculés à partir des solutions de Mindlin. Poulos (1971) a mis au point une méthode en modélisant le sol comme un continuum élastique.

Randolph (1981) présenta des expressions algébriques simplifiées basées sur des études extensives par éléments finis et sur les résultats du modèle proposé par Poulos.

Il est évident que toutes ces méthodes d'analyse ne reflètent pas adéquatement le mécanisme réel par lequel s'opèrent les interactions entre pieux du groupe.

## SESSION II

Depuis quelques années, la modélisation en centrifugeuse est de plus en plus utilisée dans les travaux de recherches sur de nombreux problèmes de Génie-Civil.

Dans ce rapport, les résultats de quelques essais sur des couples de pieux chargés latéralement dans le sable en centrifugeuse sont présentés et discutés.

### 2 - METHODES D'ETUDES DES GROUPES DE PIEUX.

Actuellement, il existe deux principales méthodes d'approche utilisées dans les recherches d'interaction entre le pieu chargé latéralement et le sol environnant, à savoir, la méthode aux modules de réaction et la méthode du continuum élastique.

La principale critique de la méthode aux modules de réaction est qu'elle ne considère pas le sol comme un milieu continu. La modélisation suppose qu'il y a une relation contrainte-déplacement à chaque profondeur sans transfert de contrainte aux points adjacents dans le sol (ressorts horizontaux indépendants). Ce modèle ne peut donc pas être utilisé pour étudier l'effet de groupe sur les pieux puisqu'il ne prend en compte aucune interaction.

La méthode élastique ne souffre pas de cette limitation, par contre, elle suppose que le sol a un comportement élastique linéaire isotrope, ce qui est très éloigné de la réalité. Une troisième méthode mise en œuvre ici est l'approche expérimentale.

#### a - Méthode de Poulos (1971)

Poulos considère que chaque pieu dans le groupe interagit sur les autres pieux. Le degré d'interaction est évalué par une quantité appelée facteur d'interaction. Pour un groupe de "m" pieux libres, le déplacement du k<sup>ième</sup> pieu peut être calculé à partir de l'équation :

$$\rho = \bar{\rho}_H \left( \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{j=m} H_j \cdot \alpha_{Hkj} + H_k \right) \quad (1)$$

pour  $j = 1$  à  $m$ ,  $j \neq k$

où  $\rho_H$  est le déplacement d'un pieu isolé soumis à une charge horizontale unitaire, et  $\alpha_{HKJ}$  est le facteur d'interaction entre le  $J^{\text{ième}}$  et  $K^{\text{ième}}$  pieu tenant compte de l'espacement entre ces deux pieux, l'angle  $\beta$  entre la direction de la charge et la ligne joignant les pieux K et J;  $H_j$  est la charge sur le pieu "J".

Des équations similaires sont applicables pour l'effet d'un moment en tête du pieu. La charge totale sur le groupe peut être calculée par l'expression:

$$H_G = \sum_{J=1}^{J=m} H_j \quad (2)$$

pour  $j = 1$  à  $m$ .

Poulos a proposé des abaques qui donnent les valeurs des facteurs d'interaction  $\alpha$  en fonction des espacements entre pieux, de la position du pieu à l'intérieur du groupe, des conditions en tête, du type de charge et de son orientation par rapport à la ligne joignant les centres des pieux et du facteur de flexibilité  $K_R$  ( $K_R = E_p \cdot I_p / E_s \cdot L^4$ ), (Réf1). Dans le cas de charge égale sur chaque pieu du groupe alors  $H_j = H_G / m$  et le déplacement de chaque pieu du groupe peut donc être calculé directement à partir de l'équation (1).

#### b- Méthode de Randolph (1981)

Randolph (1981) utilisa l'approche de Poulos et a conduit une série de calculs par la méthode des éléments finis pour des pieux flexibles. Il a proposé les expressions suivantes des facteurs d'interaction sur la déflexion d'un groupe de pieux libres en tête.

$$\alpha_H = 0,5 \rho_C (E_p / G_C)^{1/7} \cdot (r_0 / s) (1 + \cos^2 \beta) \quad (3)$$

$$\alpha_{HM} \simeq (\alpha_H)^2$$

où  $\rho_C = 0,5$  pour les sols de type "GIBSON" qui est un sol dont le module d'YOUNG varie linéairement avec la profondeur, "s" est la distance reliant le centre des pieux considérés et  $\beta$  est l'angle que fait la direction de la charge avec la ligne joignant les centres des pieux. Les facteurs  $\alpha_H$  et  $\alpha_{HM}$  correspondent respectivement à l'effet d'un chargement latéral et à l'effet d'un moment.

Pour un même chargement des pieux dans le groupe :

SESSION II

$$\rho_K = \left( 1 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq K}}^{j=m} \alpha_H \right) \rho_H + \left( 1 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq K}}^{j=m} \alpha_{Hm} \right) \rho_m \quad (5)$$

pour  $j = 1 \text{ à } m, j \neq k$

où  $\rho_H$  et  $\rho_M$  sont les déflexions latérales dues à la charge latérale et au moment d'un pieu isolé sous les mêmes conditions de chargement.

3 - APPROCHE EXPERIMENTALE

Le sol d'essai est un sable siliceux dit de Fontainebleau, couramment utilisé lors des essais sur modèles. La courbe granulométrique du sable représentée sur la figure 1 montre que la taille des grains est comprise entre 0,1 et 0,3 mm. Les principales caractéristiques de ce sable sont résumées sur le tableau I.

$\gamma_s$	(KN/m <sup>3</sup> )	26,5
$\gamma_{dmin}^*$	(KN/m <sup>3</sup> )	13,9
$\gamma_{dmax}^*$	(KN/m <sup>3</sup> )	16,6
$\phi^{**}$	en degré	29,5° - 35,2°

\*: Déterminé au laboratoire

\*\* : Valeur indicative, obtenue pour  $I_D = 53$  et 97%

Tableau I : Caractéristiques du sable de Fontainebleau

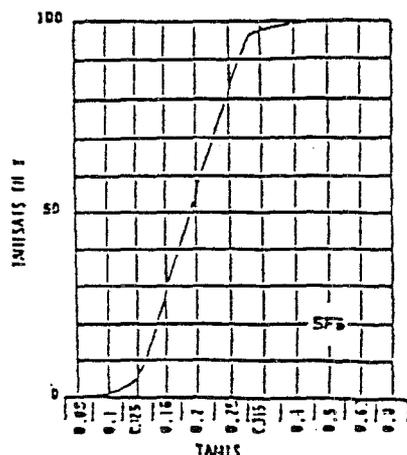


fig. 1: Sable de Fontainebleau blanc.

Le sable a été déposé dans le conteneur par pluviation à l'aide d'une tremie dont la vitesse de balayage, la hauteur et l'ouverture de la fente sont réglables. Ce système de remplissage permet de confectionner un massif de sable homogène mais surtout de densité choisie au préalable grâce à des courbes d'étalonnage. Le poids volumique des massifs reconstitués était voisin de  $16\text{KN/m}^3$  pour une hauteur de pluviation de 1m. La densité de mise en place est contrôlée à posteriori grâce aux boîtes calibrées placées au sein du massif lors du remplissage du conteneur.

Les pieux modèles sont des tubes d'acier, de diamètre externe 8 mm et d'épaisseur 1mm; ils sont considérés comme forés puisque le sol est déposé par pluviation autour de chaque couple. Les pieux sont fermés à la base et en tête. La fiche est constante égale à 200 mm ce qui représente  $2/3$  de la longueur totale "L". L'élancement de chaque pieu est égal à  $L/B = 37,5$ . Les pieux sont donc considérés comme souples. Le pieu modèle utilisé dans les essais en centrifugeuse à 40g, représente un pieu prototype en acier de 0,32m de diamètre externe et d'épaisseur 0,08m, enfoncé dans le sable à une profondeur de 8m au dessous de la surface libre.

Afin de déterminer les courbes de moments des pieux, un extensomètre mobile est utilisé pour l'étude des groupes sur modèles centrifugés; il n'est guère possible, en effet, d'équiper chaque pieu de jauges de déformation du fait du grand nombre de pieux nécessaires ( 20 à 25 par conteneur).

Cet extensomètre est constitué d'une lame amovible en aluminium, d'épaisseur 2mm , sur laquelle ont été collées de part et d'autre 5 jauges de déformations espacées de 40mm.

Lors des essais de chargement en centrifugeuse l'extensomètre est introduit dans le pieu. Après chaque essai ce dernier est récupéré pour être réutilisé sur le pieu suivant.

Outre l'équipement en jauges de déformations, trois capteurs sont placés en tête du pieu pour suivre les déplacements et la rotation. De plus, pour mesurer les charges latérales agissant sur le pieu, un capteur de force est installé dans le dispositif de chargement.

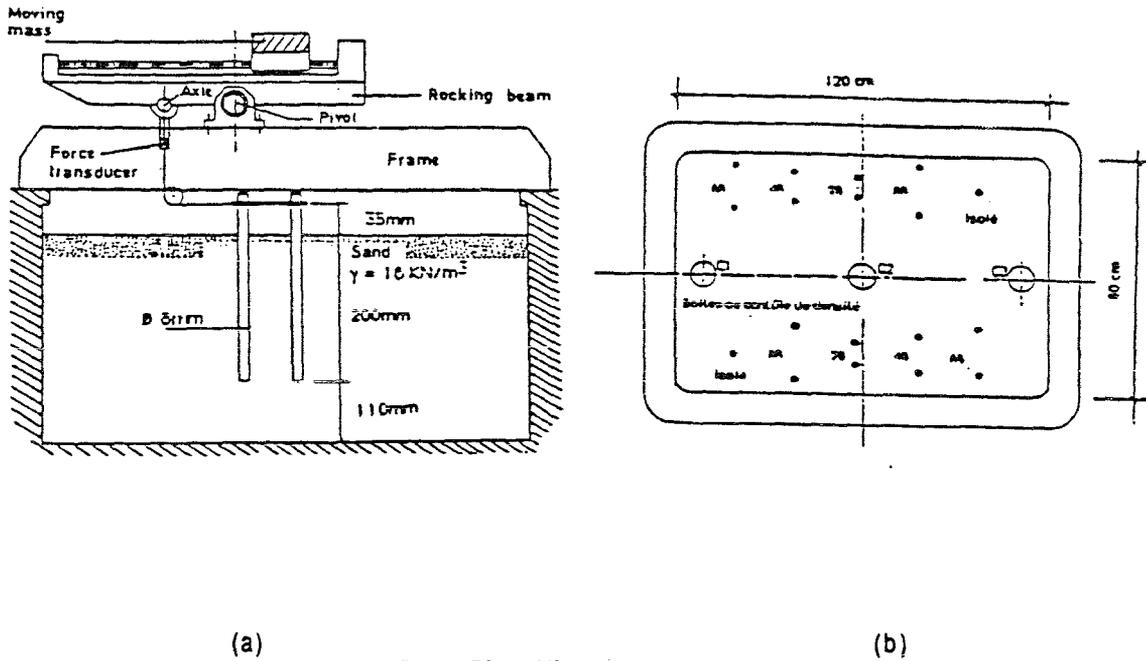
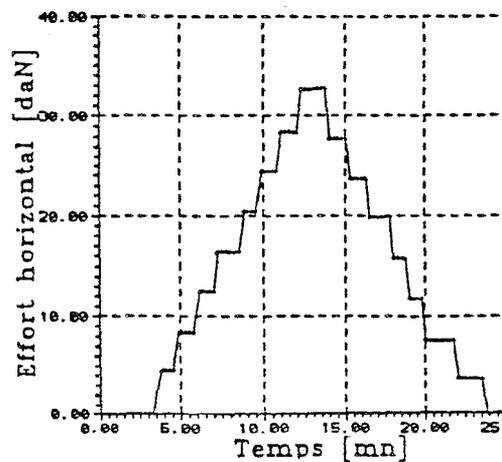


fig. 2 : Dispositif expérimental.  
 a- Instrumentation des pieux.  
 b- Implantation générale ( CONTENEUR 7 ).

L'effort latéral est appliqué dans une direction parallèle à la ligne joignant les centre des pieux, d'espacement "s" variable entre 2B et 8B. L'application de l'effort se fait par paliers de 2 daN pour un pieu isolé dit de " référence " ou 4 daN pour les couples de pieux . Ensuite un déchargement est operé de la même façon ce qui donne le cycle de chargement de la figure 3.

Fig.3: Chargement en fonction du temps (couple de pieu espacés de 6B).



#### 4-RESUTATS ET INTERPRETATION

##### 4.1 Déplacements :

Pour des charges latérales appliquées parallèlement à la ligne joignant les centres des pieux, l'effet de groupe apparait très important. Pour un même déplacement horizontal, les deux pieux du groupe supportent des charges plus faibles que dans le cas où ils sont chargés isolément (Figure4). Par exemple pour une déflexion de 2 mm, la charge agissant sur le pieu isolé et le couple de pieux pour divers espacements est donnée dans le tableau II. On constate que l'effet maximum est ressenti pour les espacements les plus faibles (2B,4B). A partir de 8B la charge moyenne sur chaque pieu du couple se rapproche de celle du pieu isolé.

	Pieu isolé	couples S/B				
		2	4	6	8	10
Effort horizontal	6	3,7	4,5	4,7	5,0	5,5

Tableau II : Charge moyenne sur chaque pieu du couple et sur le pieu isolé pour une déflexion de 2 mm

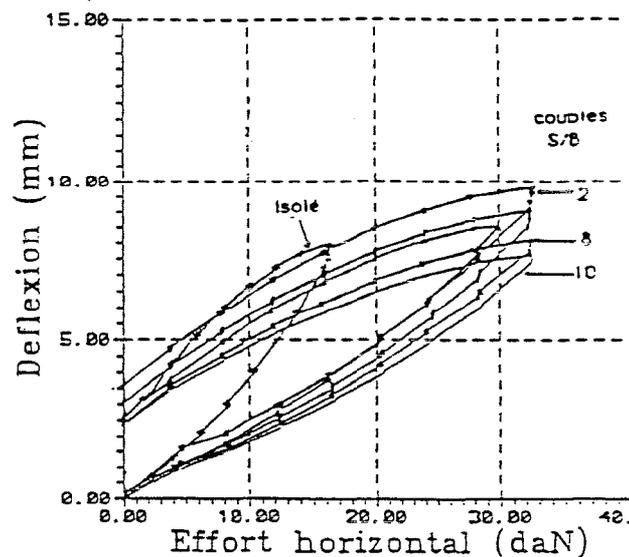


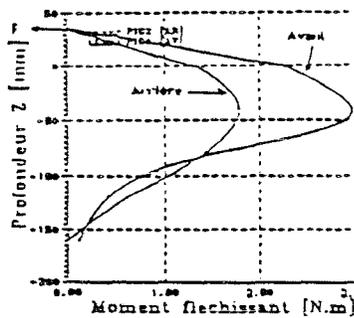
fig. 4 : Chargement de pieux isolés et en couples de différents espacements (Courbes Effort-Déplacement en tête)

#### 4.2 Courbes des moments

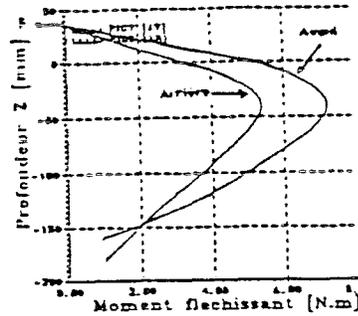
La distribution des moments fléchissants le long des pieux arrière et avant du couple est montrée sur la figure 5 pour divers espacements.

On note que le pieu avant supporte un moment nettement supérieur à celui du pieu arrière, cette différence reste vraie à tous les stades de chargement.

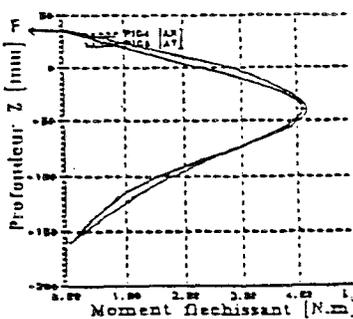
Par ailleurs la pente des courbes des moments au niveau de la surface du sol est plus forte pour le pieu avant. L'effort tranchant à la surface du sol est donc plus grand sur le pieu avant que sur le pieu arrière.



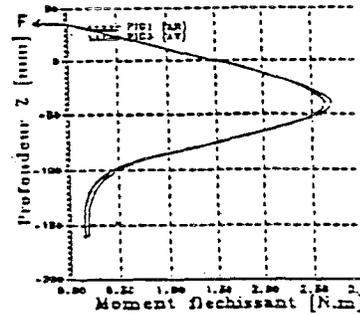
(a) S=2B



(b) S=4B



(c) S=6B



(d) S=8B

fig.5 : Courbes des moments sur pieu avant et arrière à divers espacements (2B-8B).

Afin de tester la réponse de l'extensomètre, une vérification a été faite sur la valeur du moment à la surface du sol. Les résultats de cette vérification ont montré que les mesures données par l'extensomètre sont satisfaisantes et que l'erreur relative reste inférieure à 9%.

A partir des valeurs des moments  $M_1$  et  $M_2$  mesurés à la surface du sol respectivement sur le pieu avant et le pieu arrière on peut évaluer la proportion de la charge reprise par chaque pieu dans le groupe; les résultats de cette analyse sont resumés dans le tableau III.

Espacement S	$M_1$	$M_2$	$M_1 + M_2$	$M_1/(M_1 + M_2)$	$M_2/(M_1 + M_2)$
2.d	2,24	1,31	3,55	63,1 %	36,9 %
4.d	5,20	3,10	8,30	62,7 %	37,3 %
6.d	2,80	2,21	5,01	55,9 %	44,1 %
8.d	1,52	1,52	3,04	50,0 %	50,0 %

Tableau III: Proportion de la charge reprise par chaque pieu ( $M_1$  et  $M_2$  sont les moments à la surface du sol supportés respectivement par le pieu avant et arrière).

On constate qu'à partir d'un espacement de  $8B$ , les pieux supportent chacun la moitié de la charge totale en tête. Par contre, pour les espacements les plus faibles ( $2B$ ), le pieu avant supporte environ 64% de l'effort total appliqué alors que le pieu arrière n'en supporte que 36%.

#### 4.3 Comparaison du comportement du groupe et du pieu isolé

Une méthode simple pour évaluer l'effet de groupe est de comparer la charge latérale moyenne par pieu dans le groupe avec la charge latérale pour un pieu isolé et ceci à une même déflexion horizontale. Le terme " efficacité du groupe " peut être définie comme:

$$\eta = \frac{\text{charge latérale sur le groupe pour une déflexion donnée}}{N \cdot \text{charge latérale sur le pieu isolé à une même déflexion}}$$

où  $N$  est le nombre de pieux dans le groupe.

La valeur 100% de l'efficacité du groupe, indique qu'il n'y a pas d'interaction entre les pieux et dans ce cas là, leur comportement n'est pas différent de celui d'un pieu isolé.

Pour les couples de pieux étudiés, l'efficacité du groupe a été déterminée pour une déflexion de 1mm ( 12,5% du diamètre du pieu ).

Les résultats des calculs de l'efficacité du groupe sont comparés sur la figure 6 avec la courbe obtenue par l'analyse de Randolph. On constate qu'à tous les espacements (de  $2B$  à  $8B$ ), les valeurs expérimentales sont voisines de celles obtenues par Randolph (Réf. 2).

## SESSION II

Pour les petits espacements (2B-3B), généralement utilisés en pratique, les pieux dans le groupe opèrent avec une efficacité d'environ 70% en terme de résistance à la charge latérale. Pour que les pieux travaillent à 100% d'efficacité, des espacements d'au moins 8 diamètres seraient nécessaires mais ces valeurs ne sont pas nécessairement compatibles avec les descentes de charges verticales.

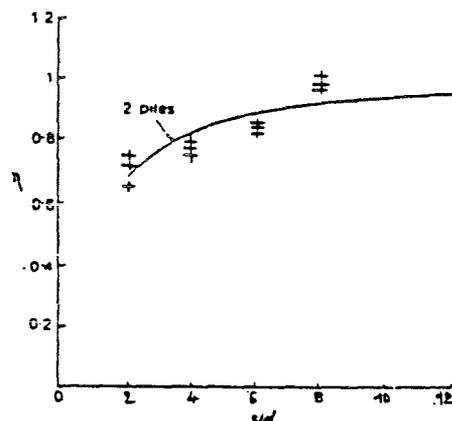


fig.6 :Efficacité du groupe.  
— Analyse de Randolph +++ Mesures experimentales

## 5 - CONCLUSION

L'objectif de cette série d'essais était double. D'une part elle devait fournir des indications sur l'effet de groupe dans le cas de couples de pieux sollicités latéralement en tête. D'autre part elle devait renseigner sur la faisabilité d'un extensomètre amovible. Les principales conclusions sont resumées ci-dessous.

- 1- Les résultats indiquent que la charge supportée par le couple à une déflexion donnée est plus faible que celle correspondant à deux pieux chargés isolément. La distance limite au delà de laquelle l'effet de groupe ne se fait plus sentir est voisine de 8B. Pour les espacements courants de 2 à 3B, l'efficacité est seulement 70% de celle de pieux isolés.
- 2- Pour ces faibles espacements ( 2B, 3B ), les efforts repris sur le pieu avant est beaucoup plus important que sur le pieu arrière (près du double pour l'effort en tête). Par contre pour les grands espacement (8B), les efforts en tête et les moments dans les deux pieux sont identiques et les deux pieux se comportent comme des pieux isolés.

- 3- La comparaison des valeurs de l'efficacité du groupe déterminées expérimentalement avec la courbe obtenue par l'analyse de Randolph montre que les résultats sont concordants.
- 4- Le comportement de l'extensomètre amovible est satisfaisant. Cependant en raison de l'insuffisance du nombre de jauges utilisées (5 jauges), il n'a pas été possible d'obtenir des courbes de réactions globales (PxB-Y) correctes et donc de déterminer l'effet des interactions entre pieux à différentes profondeurs. Un accroissement du nombre de jauges est nécessaire pour la prochaine version, si l'on souhaite aller jusqu'à la détermination des courbes P-Y.

## REFERENCES

- 1-H.G Poulos "*Behavior of laterally loaded piles: II pile groups*" ASCE, vol 97 N° SM5, May 1971.
- 2-M.F Randolph "*The response 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 Bouguenais.
- 4-D.LEVACHER "*Groupe de pieux sollicités latéralement analyse et réflexions en vue d'une étude paramétrique en centrifugeuse*" Rapport L.C.P.C, Dec.1988, pp30. Bouguenais.
- 5-S.MEZAZIGH "*Comportement d'un couple de pieux sollicité latéralement (Etude paramétrique)*" Rapport de mémoire du D.E.A, E.N.S.M 20 Sept.1990.