



PIEUX SOLLICITES EN TETE PAR UN IMPACT

(1)A. ALEM ; (2)J.G. SIEFFERT ;(2) L. KOTI

(1) I.U.T. "LE HEINLEX" - BP 420 - 44600 SAINT NAZAIRE

(2)Ecole Centrale de Nantes - 1 rue de la Noë - 44072 NANTES CEDEX

ABSTRACT

A simplified method to resolve the problem originated by horizontal dynamic loads on piles is described in this study. This method is used to predict the response of piles under an horizontal impact. Calculation results obtained by this method are discussed and compared with test data. A satisfactory agreement between the field and predicted responses was found.

1. INTRODUCTION

Les pieux sont couramment conçus pour résister à des chargements latéraux provenant des superstructures. Ces chargements peuvent être statiques, cycliques, ou dynamiques tels les chocs lors de l'accostage ou l'amarrage des navires sur un quai ou un duc d'Albe. Les pieux sont souvent installés en groupes de quelques pieux faiblement espacés. Au cours des dernières années, diverses méthodes ont été développées pour étudier le comportement de ces pieux. Ces méthodes reposent principalement sur deux approches : l'approche du module de réaction et l'approche du continuum élastique.

On trouve dans la littérature des méthodes simplifiées qui permettent d'analyser le comportement d'un pieu ou d'un groupe de pieux (2), (4), (7), (9), (10);

Dans cette étude nous présentons une méthode simplifiée de calcul de pieux soumis latéralement à des sollicitations dynamiques. Cette méthode est basée essentiellement sur la substitution du pieu par une poutre console équivalente. Les calculs sont ensuite conduits comme dans le cas d'une poutre-console de caractéristiques mécaniques identiques à celles du pieu et soumise aux mêmes sollicitations en tête.

2. IDEALISATION

1. Le pieu

Une méthode simple, utilisée dans l'analyse du comportement de pieux sollicités latéralement, consiste à substituer au pieu une poutre de caractéristiques mécaniques analogues et encastrée à sa base en un point fictif dans le sol (Fig. 1). La profondeur d'encastrement Z_f est déduite à partir des critères d'équivalence pieu-poutre concernant les déplacements en tête, les rotations en tête et la charge de flambement. Z_f est fonction de la longueur élastique du système sol-pieu.

$$Z_f = a L_e$$

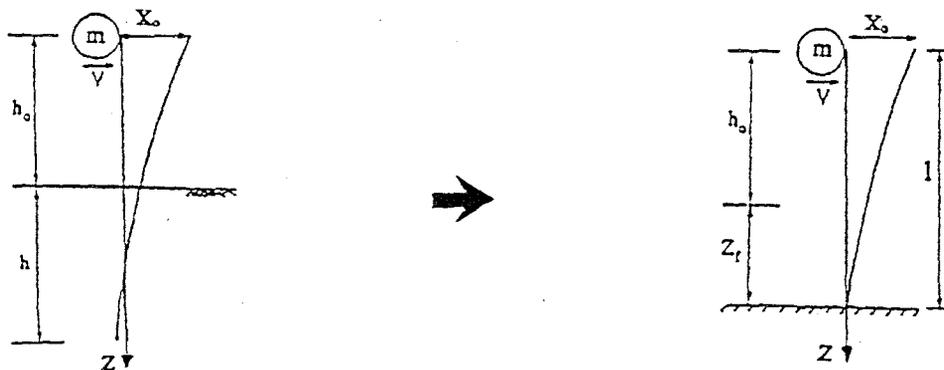
Dans le cas d'un sol avec un module de réaction latéral variant linéairement avec la profondeur, Z_f est donnée par la relation suivante, (4).

$$Z_f = 1.8 L_e = 1.8 \left[\frac{E_p I_p}{\eta} \right]^{0.2}$$

avec $k_h = \eta z$

η étant la pente du profil linéaire du module de réaction latéral.

On se propose d'utiliser une méthode similaire pour analyser le comportement d'un pieu soumis latéralement à l'impact d'une masse m .



a) pieu fiché dans le sol

b) poutre encastrée à sa base

Fig.1 : Représentation du pieu par une poutre console équivalente

Cette démarche revient à étudier le comportement d'une poutre console soumise aux mêmes sollicitations. Ce problème a fait l'objet de plusieurs études (8). Dans certains cas, où la masse d'impact est très grande vis-à-vis de celle du pieu, la réponse de celui-ci peut être obtenue de manière satisfaisante en ne prenant en compte que son premier mode de vibration. Si c'est le cas, le système pieu-sol peut être schématisé par un système ressort-masse attaché en tête (fig.2).

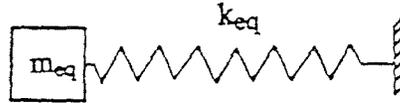


Fig.2 : Schéma simplifié d'un pieu

k_{eq} est la raideur équivalente en tête du système pieu-sol.

La masse équivalente m_{eq} est obtenue à partir des méthodes développées pour l'analyse du comportement de poutres soumises à des impacts. Globalement, m_{eq} est obtenue en égalant les énergies cinétiques de la poutre console et d'une masse concentrée équivalente. A cet effet, on considère habituellement une distribution de la vitesse égale, à un facteur près, à la déformée de la poutre sous une charge concentrée appliquée au point d'impact :

$$E_c = \frac{1}{2} \bar{m} \int_0^l (V(z))^2 dz = \frac{1}{2} m_{eq} V_0^2$$

avec
$$V(z) = V_0 \left[1 - \frac{3z}{2l} + \frac{z^3}{2l^3} \right]$$

ce qui donne

$$m_{eq} = \frac{33}{140} \bar{m} l$$

\bar{m} est la masse par unité de longueur du pieu

2. La masse d'impact

Des essais de chocs sur des maquettes représentant la proue de navires ont été réalisés à Hambourg (3). Dans ces essais les maquettes fixées sur un chariot descendent le long d'une pente pour venir percuter une barrière représentant un obstacle fixe. La figure 3a montre un enregistrement typique de

la force d'écrasement $F(t)$ en fonction du temps. Des essais similaires ont été réalisés au Laboratoire de génie civil de l'Ecole Centrale de Nantes (1). Des plaques fichées dans un modèle plan de Schneebeil sont soumises en tête à l'impact d'une masse m . La figure 3b donne un exemple de la force enregistrée au cours de ces essais. Les deux enregistrements des figures 3a et 3b ont des allures similaires. Ils font apparaître l'existence d'une phase initiale, où les efforts enregistrés sont très importants. Les efforts croissent rapidement jusqu'à un maximum puis diminuent aussi vite pour atteindre un minimum qui correspond à la fin de cette phase. Les efforts développés lors de cette phase sont dus à l'écrasement de l'élément d'impact. On appellera cette phase de la réponse, phase d'impact. Les essais réalisés à Nantes montrent que la deuxième phase correspond à un mouvement oscillant amorti du système "obstacle-masse d'impact collée en tête".

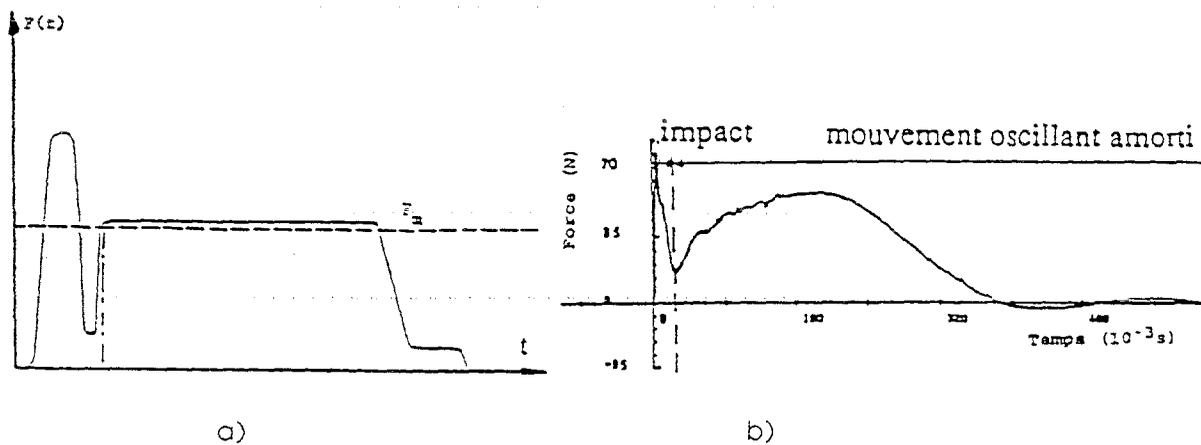


Fig.3 : Forces mesurées en fonction du temps

Partant de ces constatations, et pour tenir compte des efforts d'écrasement développés dans la première phase, nous avons modélisé la masse d'impact comme il est indiqué sur les figures 4.

4. MISE EN EQUATIONS

Pour obtenir la réponse d'un pieu soumis à un impact en tête, il suffit alors de déterminer la réponse des systèmes mécaniques simples de la figure 4.

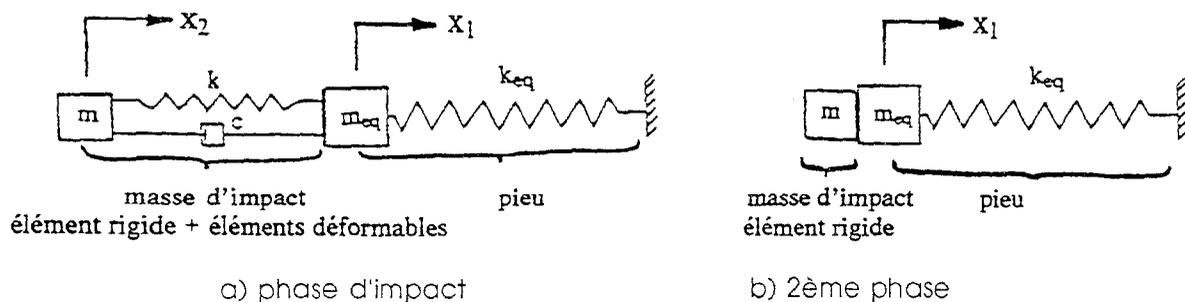


Fig.4 : Schéma de calcul

Pendant la première phase, la réponse est obtenue en résolvant le système suivant :

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = F_{ext}$$

avec

$$M = \begin{bmatrix} m_{eq} & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} c & -c \\ -c & c \end{bmatrix}; K = \begin{bmatrix} k_{eq} + k_k & \\ & k \end{bmatrix}; F_{ext} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$U = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix}; \dot{U} = \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix}; \ddot{U} = \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix}$$

Ce système d'équations peut être résolu par une méthode de calcul pas à pas.

En posant :

$$\dot{U}_t = \frac{U_t - U_{t-\Delta t}}{\Delta t}; \ddot{U}_t = \frac{\dot{U}_t - \dot{U}_{t-\Delta t}}{\Delta t}$$

Où Δt est le pas de temps.

Nous résolvons à chaque étape le système suivant :

$$[M + k\Delta t^2 + C \Delta t] U_t = [M + C \Delta t] U_{t-\Delta t} + M \dot{U}_{t-\Delta t}$$

Pendant la deuxième phase, la réponse du système pieu-masse d'impact est donnée par l'équation suivante :

$$x_1(t) = A \sin(\omega t + \varphi)$$

où ω est la pulsation propre du système pieu - masse d'impact.

$$\omega = \sqrt{\frac{k_{eq}}{M + m_{eq}}}$$

A et φ sont calculés à partir des déplacements et vitesses à la fin de la première phase.

Les résultats du calcul par cette méthode sont confrontés aux données expérimentales d'essais réalisés à Nantes (1), (fig.5). Une bonne équivalence entre résultats expérimentaux et calculs a été trouvée. D'une manière générale, les résultats deviennent meilleurs lorsque la fiche augmente.

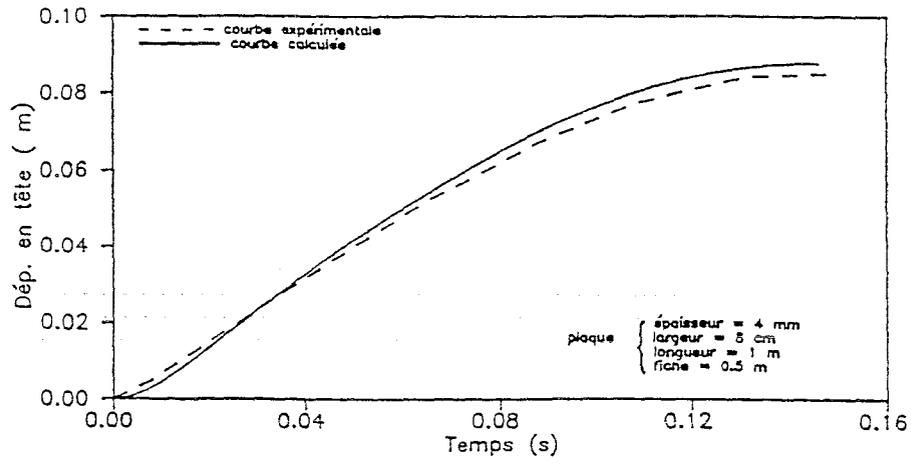


Fig.5.1 : Déplacement en tête en fonction du temps

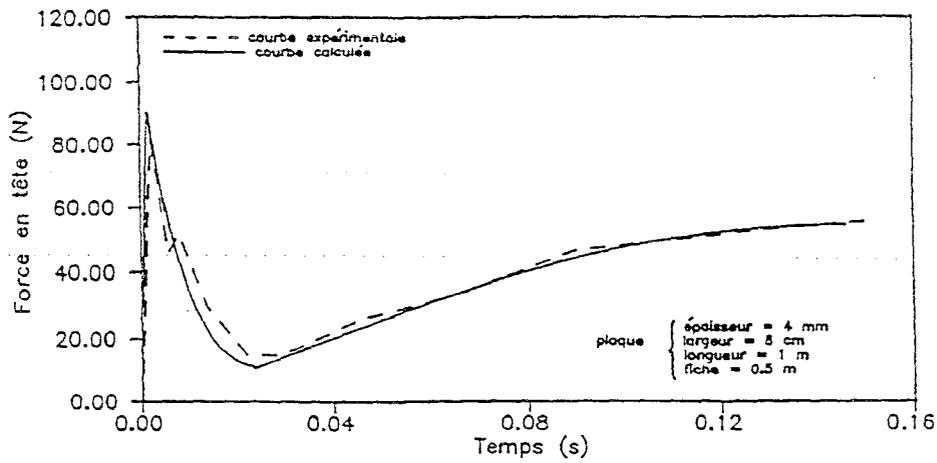


Fig.5.2 : force en tête en fonction du temps

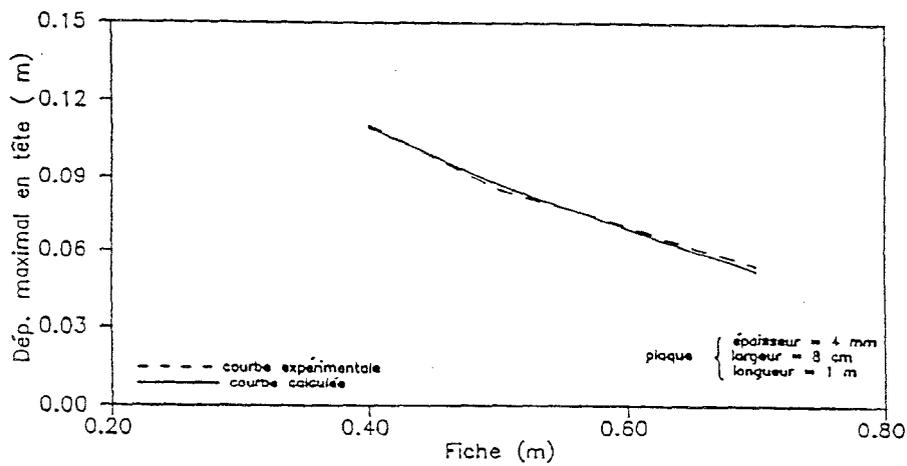


Fig.5.3 : Déplacement maximal en tête en fonction de la fiche

4. COMPORTEMENT D'UN GROUPE DE PIEUX

Le comportement d'un groupe de pieux a été étudié par plusieurs auteurs (6), (7), (9), (10). Différentes méthodes sont proposées pour tenir compte de l'effet de groupe. On se propose dans cette étude d'aborder le comportement d'un groupe de pieux par une méthode similaire à celle d'un pieu isolé. L'effet de groupe peut se traduire, dans ce cas, par la prise en compte d'une profondeur du point fictif d'encastrement du pieu dans le groupe plus importante que celle d'un pieu isolé.

$$Z_{fg} = Z_f \alpha$$

- où Z_f : profondeur du point fictif d'encastrement du pieu isolé,
 Z_{fg} : profondeur du point fictif d'encastrement du pieu dans le groupe,
 α : facteur traduisant l'effet de groupe

Pour les pieux considérés comme longs, α peut être obtenu à partir de la figure 6 (7). Ce paramètre dépend du type de groupe et de l'espacement relatif entre pieux (S/L_e).

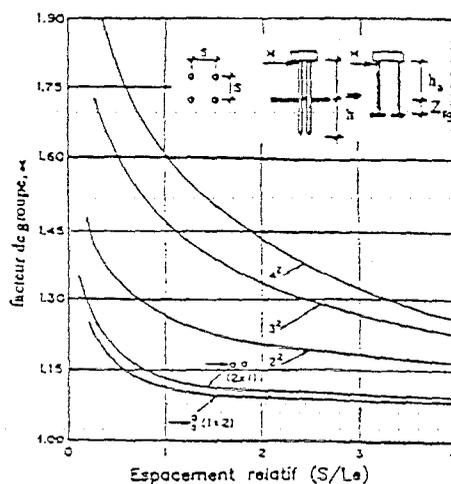


Fig.6 : Facteur de groupe (7)

L'effet de groupe peut être évalué simplement en comparant la charge latérale moyenne par pieu dans le groupe et la charge latérale pour un pieu isolé, et ceci pour une même déflexion horizontale. L'efficacité du groupe peut être définie par le rapport :

$$\beta = \frac{\text{charge latérale sur le groupe}}{n \cdot \text{charge latérale sur le pieu isolé}}$$

qui peut s'écrire aussi :

$$\beta = \frac{K_G}{n K_p}$$

où K_G est la raideur du groupe de pieu,
 K_p est la raideur d'un pieu isolé,
 n est le nombre de pieux dans le groupe.

β peut être déduit du coefficient α défini précédemment par la relation suivante :

$$\beta = \left(\frac{\frac{h_0}{Z_f} + 1}{\frac{h_0}{Z_f} + \alpha} \right)^3$$

h_0 étant la longueur de la partie hors-sol du pieu.

L'effet de groupe a fait l'objet d'une étude expérimentale réalisée au Laboratoire de génie civil de l'E.C. de Nantes (11). Deux plaques de mêmes dimensions et fichées à des espacements variables dans le modèle plan de Schneebeli sont soumises à un effort horizontal en tête. Cette étude a permis de définir un coefficient d'efficacité pour un groupe de deux plaques.

Une comparaison de ce coefficient expérimental avec le coefficient d'efficacité théorique défini précédemment pour un groupe de deux pieux est donné par la figure 7. La corrélation est jugée satisfaisante : l'erreur relative entre les deux coefficients n'excédant pas 5%.

Notons que la particularité de notre modèle d'essai (modèle plan) nous a amené à choisir une représentation du coefficient d'efficacité comme fonction de l'espacement relatif entre pieux (S/L_e) et non (S/D).

L'étude expérimentale a montré aussi que l'effet de groupe se traduit essentiellement par une perte de résistance de la plaque arrière, la plaque avant se comportant quasiment comme une plaque isolée. Ce résultat est très intéressant et rejoint les résultats obtenus par d'autres auteurs.

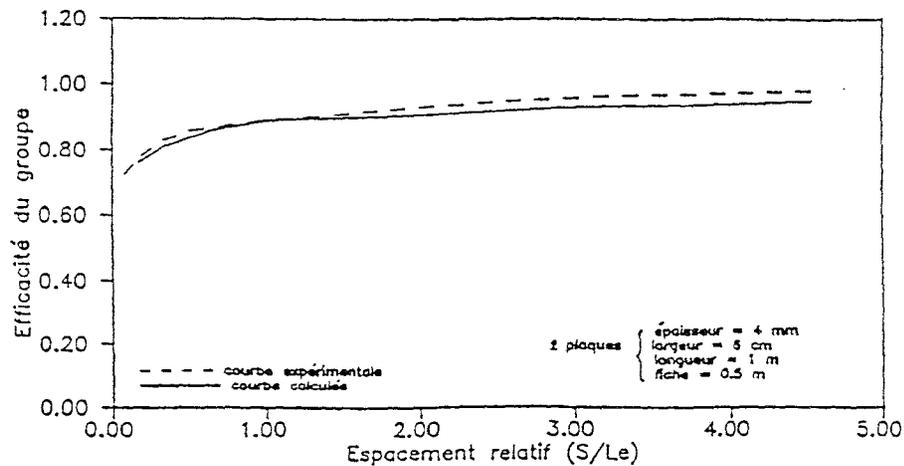


Fig.7 : Coefficient d'efficacité du groupe

Tenant compte de ces remarques, la raideur équivalente d'un groupe de deux pieux d'axe parallèle à la direction de l'effort s'écrit alors :

$$K_G = K_p + \lambda K_p$$

avec $\lambda = 2\beta - 1$: est un coefficient qui traduit la perte de résistance du pieu arrière.

Le groupe de deux pieux peut être représenté par un système ressort-masse attachée en tête. Les paramètres, masse équivalente M_{eq} et raideur équivalente K_G du groupe, sont donnés par les relations suivantes :

$$K_G = 2\beta K_p$$

et

$$M_{eq} = m_{1eq} + m_{2eq}$$

qui peut s'écrire :

$$M_{eq} = \frac{33}{140} \bar{m} \left[1 + \frac{1}{\lambda^{1/3}} \right] l$$

$K_p = \frac{3E_p I_p}{l^3}$ et λK_p sont respectivement les raideurs équivalentes des pieux avant et arrière, m_{1eq} et m_{2eq} sont respectivement les masses équivalentes des pieux avant et arrière.

Les résultats de calcul par cette méthode sont comparés à ceux des essais réalisés à Nantes sur un groupe de plaques fichées à des espacements variables dans le modèle plan de Schneebeli et soumises à un impact en tête (5).

D'une manière générale, une bonne équivalence entre les résultats expérimentaux et les réponses calculées est obtenue comme le montrent les figures 8 données à titre d'exemple.

5. CONCLUSION

On a établi une méthode simple pour prédire le comportement d'un pieu et d'un groupe de pieux soumis à l'impact d'une masse. Cette méthode donne de bons résultats comme le montre la bonne équivalence entre réponses calculées et expérimentales. Les bases théoriques de cette méthode peuvent être utilisées pour analyser le comportement de pieux sous chargements dynamiques quelconques.

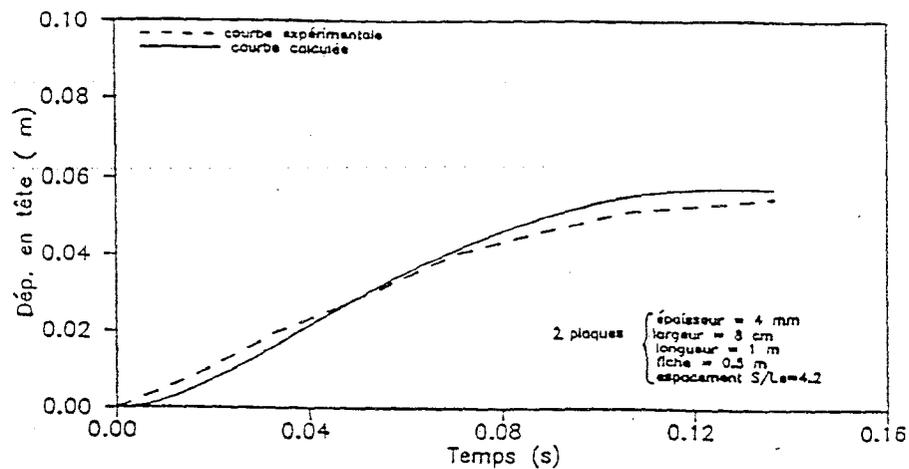


Fig.8.1 : Déplacement en tête du groupe en fonction du temps

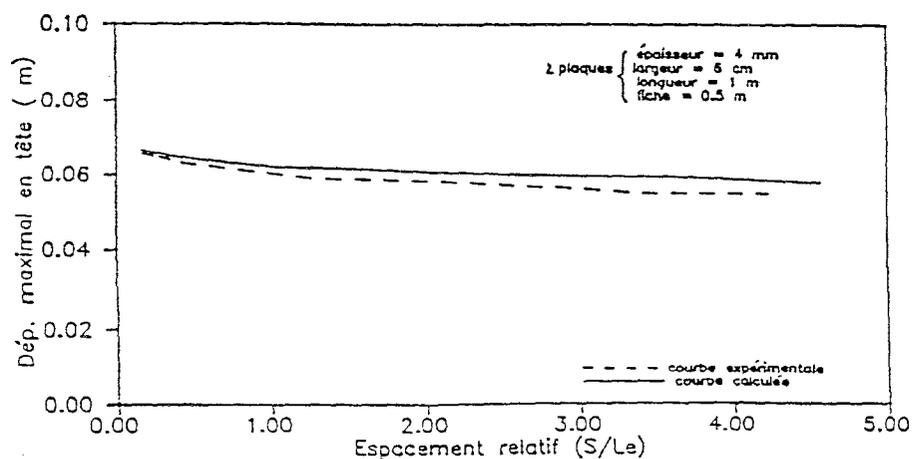


Fig.8.2 : Déplacement maximal en tête du groupe en fonction de l'espacement relatif

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) ALEM A., Etude sur modèle du comportement des ouvrages d'accostage soumis à des sollicitations dynamiques. Thèse de doctorat. Laboratoire de Génie Civil, E.C. Nantes, 1991.
- (2) BANERJEE P., DAVIES T., The behaviour of axially and laterally loaded single piles embedded in nonhomogeneous soils. *Geotechnique*, 28, N°3, pp.309-326.
- (3) CALGARO J.A., *Annales des Ponts et Chaussées*, Chocs de navires contre des obstacles fixes, N°59, 3ème trimestre 1991.
- (4) DAVISSON M. T., ROBINSON K. E., Bending and buckling of partially embedded piles. *Proceedings of the 6th I.C.S.M.F.E.*, Montreal, Vol. 2, 1965, pp.243-246
- (5) KOTI L., Comportement d'un ouvrage sous sollicitations latérales dynamiques. Rapport de DEA Génie Civil, à paraître, E.C. Nantes, 1992.
- (6) MEZAZIGH S., Comportement d'un couple de pieux sollicité latéralement. Rapport de DEA, E.C. Nantes, 1990.
- (7) OTEO C. S., VALERIO J., A simplified analysis of piles with lateral loads. *Proceedings of the 10th I.C.S.M.F.E.* Stockholm, 1981, Vol.2, pp. 795-798.
- (8) PANOVKO J. G. Introduction à la théorie du choc mécanique. Edition NANKA, Moscow, 1977.
- (9) POULOS H. G. , Behaviour of laterally loaded piles : II pile groupe, *ASCE*, Vol.97, N° SM5, May 1971, pp. 733-751.
- (10) RANDOLPH M. F., The response of flexible piles to lateral loading, *Geotechnique*, 31, N°2, 1981, pp.247-259.
- (11) SENICHAULT J.P., Comportement d'un ouvrage sous sollicitations latérales statiques. Rapport de D.E.A., Génie Civil, E.C. Nantes, 1991.