

## COMPORTEMENT DES PIEUX ISOLEES SOUS SOLLICITATIONS DYNAMIQUES DANS UN SOL MULTICOUCHE

A. OUNIS <sup>1</sup>, R. CHEBILI <sup>2</sup>, B. ACHOUR <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Maître-assistant chargé de cours, Laboratoire LESIA, Université de Biskra, Algérie

<sup>2</sup> Maître de Conférence, Laboratoire LGC, Université de Biskra, Algérie

<sup>3</sup> Professeur, Laboratoire LARHYSS, Université de Biskra, Algérie

### RÉSUMÉ

La réponse dynamique d'un pieu isolé, pour une analyse non linéaire, utilisant une technique tridimensionnelle en éléments finis est analysée. Des éléments d'interface spécialement sélectionnés sont utilisés pour différentes conditions de sol et de pieu. Les deux cas de chargement périodique et transitoire sont utilisés dans cette analyse. Différentes géométries de pieu ainsi que différents types de sol sont considérés. Des résultats d'essais en laboratoire de deux modèles physiques sont utilisés en comparaison avec la solution en éléments finis. Un système masse-ressort-amortisseur, à un degré de liberté, est proposé pour être utilisé avec un bon choix des paramètres dynamiques du sol dans l'analyse du pieu. La vérification, le calibrage et la comparaison du modèle proposé montrent une excellente concordance avec les données publiées.

**MOTS CLÉS :** MEF, Pieux, sol, Interaction sol-structure, sollicitations dynamiques, masse-ressort-amortisseur.

### ABSTRACT

The dynamic response of a single pile using a nonlinear analysis, three-dimensional finite element technique is analyzed. Specially selected interface elements are used for different soil and pile conditions. Both periodic and transient types of loading are utilized in this analysis. Different pile geometries as well as different soil types are considered. Laboratory test results of two physical models are used in comparison with the finite element solution. One degree of freedom mass-spring-dashpot system is proposed to be used with a good choice of dynamic parameters of soil in the pile analysis. Verification, calibration and comparison of the proposed show an excellent agreement with the data published.

**KEYWORDS:** FEM, Piles, soil, Soil-Pile Interaction, dynamic stresses, mass-spring-dashpot system.

## 1 INTRODUCTION

Les fondations sur pieux sont intensivement utilisées pour la grande résistance verticale et latérale qu'ils présentent dans le domaine statique. Les fondations sur pieux offrent aussi une capacité élevée dans la résistance aux chargements dynamiques de séisme et de fondations sous machines. Dans le cas des pieux soumis à des efforts dynamiques, une étude profonde et détaillée est requise pour justifier le comportement des pieux et du sol avoisinant. Les méthodes existantes pour le calcul dynamique sont basées sur quelques recherches spéciales. Le pieu est spécialement conçu pour résister aux sollicitations statiques appuyées par des expérimentations dynamiques ou par des formules empiriques pour vérifier la résistance dynamique.

Contrairement à l'analyse statique, les modèles dynamiques doivent inclure l'effet de masse. La masse distribuée doit être précisée en incluant la densité massive et la spécification de propriétés du matériau constituant le pieu. Alternativement, les masses concentrées doivent être précisées à diverses localisations du modèle de pieu. Les masses réparties et concentrées peuvent être précisées dans un modèle de pieu isolé. A cet effet, les modèles en éléments finis doivent avoir une matrice masse en plus d'une matrice de rigidité.

Dans la programmation par éléments finis, deux méthodes numériques primaires sont employées pour rassembler et résoudre la matrice masse, résultant de deux types de matrices masse. Ce sont la matrice masse répartie et la matrice masse concentrée. Les matrices masse concentrée et répartie représentent différentes formulations numériques de la matrice de l'élément masse.

L'autre phénomène important qui existe seulement dans l'analyse dynamique est l'effet d'amortissement. L'amortissement ne concerne pas l'analyse modale puisque, par définition, l'analyse modale implique des vibrations libres non-amorties. Cependant, l'amortissement doit être considéré dans toutes autres formes d'analyse dynamique.

L'amortissement dans les structures, pieux, sol, etc., est généralement mesuré par un pourcentage d'amortissement critique avec des typiques qui varient de 0.1 à 10%. Dans cette approche un rapport d'amortissement de 3% est utilisé dans l'analyse pour représenter l'énergie de dissipation du sol.

## 2 CALCUL DES PARAMETRES CONCENTRES DU SYSTEME "MASSE-RESSORT-AMORTISSEUR"

Pour l'analyse et la comparaison, les formules suivantes de rigidité, dérivées de la théorie du milieu élastique, sont valides pour la rigidité verticale qui représente le sol sous fondations : la rigidité verticale est donnée par Timoshenko (1983)

$$K_{sv} = \frac{4G_s r}{(1-\nu_s)} \quad (1)$$

où  $K_{sv}$  représente la rigidité verticale du sol,  $G_s$  le module de cisaillement du sol,  $\nu_s$  le coefficient de Poisson pour le sol et  $r$  le rayon du pieu.

La rigidité horizontale du sol est telle que donnée par Bycroft (1956).

$$K_{sh} = \frac{32(1-\nu_s)G_s r}{(7-8\nu_s)} \quad (2)$$

où  $K_{sh}$  est la rigidité horizontale du sol

Dans cette analyse, les amortisseurs ont des coefficients d'amortissement verticaux équivalents à l'amortissement géométrique vertical comme celui donné par Richart (1970):

$$C = \frac{3.4r^2}{(1-\nu_s)} \sqrt{\rho_s G_s} \quad (3)$$

où  $C$  est le coefficient d'amortissement vertical.

Pour les pieux à pointe ouverte, l'amortissement géométrique est donné selon Richart (1970) :

$$C_v = \frac{3.4(r_{ext}^2 - r_{int}^2)}{(1-\nu_s)} \sqrt{\rho_s G_s} \quad (4)$$

L'amortissement du système est le produit du rapport d'amortissement ( $\xi$ ) par l'amortissement critique.

$$C_T = \xi C_{cr} = 4\xi \sqrt{\frac{G_s \rho_p L \pi r^3}{(1-\nu_s)}} \quad (5)$$

où  $\rho_p$  est la masse unitaire du pieu =  $\frac{\gamma_p}{g}$ ,  $L$  la longueur du pieu et  $V_s$  la vitesse de cisaillement (vitesse transversale de l'onde).

L'amortissement horizontal est calculé selon Poulos and Davis (1974) :

$$C_h = \frac{18.4(1-\nu_s)r^2}{(7-8\nu_s)} \sqrt{\rho_s G_s} \quad (6)$$

La masse concentrée est équivalente à :

$$m = \pi r^2 \rho_p l \quad (7)$$

où  $l$  est la longueur partielle du pieu (longueur entre deux masses consécutives).

### 3 FREQUENCES NORMALES ET AMORTIES

Dans le cadre de l'analyse, pour un pieu reposant sur un système concentré ressort-amortisseur, la fréquence naturelle du pieu est calculée par Richart (1970) :

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m_p}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{4G_s r}{(1-\nu_s)m_p}} \quad (8)$$

La fréquence amortie est calculée selon Richart (1970)

$$f_D = f_n \sqrt{1 - 2\xi^2} \quad (9)$$

### 4 ETUDE DYNAMIQUE DU SYSTEME "MASSE-RESSORT-AMORTISSEUR"

Le système sol-pieu connaît un bon contact entre l'un et l'autre dans la limite élastique du sol. Au-delà de la limite élasto-plastique un écartement est introduit. Néanmoins, cette situation exige une analyse spéciale et assez difficile des milieux continus. Dans notre analyse, une méthode simple de "masse-ressort-amortisseur" analogue au système pieu-sol est proposée. Le système proposé est utilisé dans l'analyse des forces dynamiques verticales et horizontales appliquées en tête du pieu comme illustré en figure.1 et figure.2 respectivement. Différentes valeurs du rapport de la longueur du pieu au diamètre  $L/d$  sont utilisées dans le calcul des paramètres concentrés du sol pour un milieu argileux aussi bien que pour un sol de sable dense. Les comparaisons numériques complètes ainsi que l'analyse complète du comportement du pieu sont faites et étudiées.

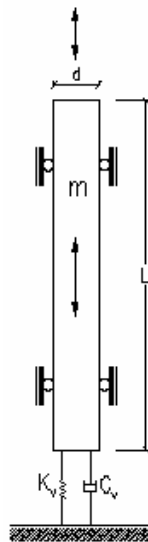


Figure 1 : Modèle proposé d'un pieu reposant sur ressort et amortisseur

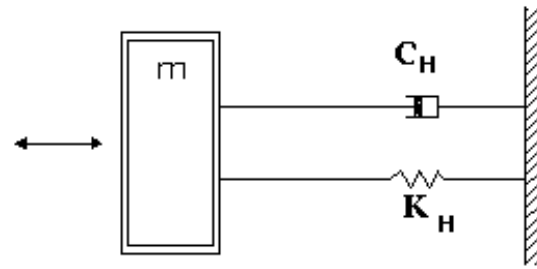


Figure 2 : Modèle proposé "masse-ressort-amortisseur" pour le déplacement horizontal du pieu

### 5 CALCULS DYNAMIQUES ET COMPARAISONS NUMERIQUES DES PARAMETRES CONCENTRES POUR DIFFERENTS RAPPORTS $L/d$

La rigidité relative entre le pieu et le sol dans un milieu argileux a été calculée comme suit :

$$\frac{E_p}{E_s} = 595,24 ;$$

et le rapport relatif de vitesse est de :  $\frac{V_s}{V_p} = 0,028$

Les propriétés géométriques des pieux sont calculées et présentées au tableau (1)

Il est montré en figure(3) que pour de petits rapports  $L/d$ , la rigidité verticale de Novak a donné la valeur maximum, pendant que le minimum est atteint en utilisant la solution de Richart qui actuellement est consacrée aux fondations superficielles flexibles à géométrie circulaire. Pour un rapport  $L/d = 10,00$  la solution de base de Novak est d'environ 300 fois la solution de Richart. Pour un rapport  $L/d$  plus élevé ces relations sont réduites à un rang variant entre 50 à 100 fois.

La figure (4) étudie la relation entre les rigidités horizontales calculées pour différents rapports  $L/d$ . La solution de Novak a donné la plus haute valeur et celle de Poulos a donné la valeur la plus basse. La fluctuation du rapport est de 5 à 12 fois. On notera la fluctuation rapide des valeurs de la rigidité horizontale en fonction de la valeur du rapport  $L/d$ .

La figure (5), trace la relation entre l'amortissement vertical et les rapports  $L/d$ . L'amortissement vertical de la base libre de Novak a enregistré la plus haute valeur, pendant que Richart enregistre la valeur la plus basse. Les graphes ont aussi démontré que la valeur du rapport  $L/d$  influe considérablement sur la valeur de l'amortissement vertical et que pour cette raison le plus grand soin doit être pris dans le calcul. Les courbes ont également montré que pour un rapport  $L/d = 40,00$ , la solution de la base libre de Novak est d'environ 800 fois celle Richart.

Tableau 1 : Propriétés géométriques des pieux

$\frac{L}{d}$	$d$ (m)	$r$ (m)	$\frac{L}{r}$	$m$ (T)	$I_{xx}$ (m <sup>4</sup> )
10,00	1,00	0,50	20,00	1,92	0,0490625
20,00	0,50	0,25	40,00	0,48	0,0030664
40,00	1,00	0,50	80,00	7,68	0,0490625
80,00	0,50	0,25	160,00	1,92	0,0030664

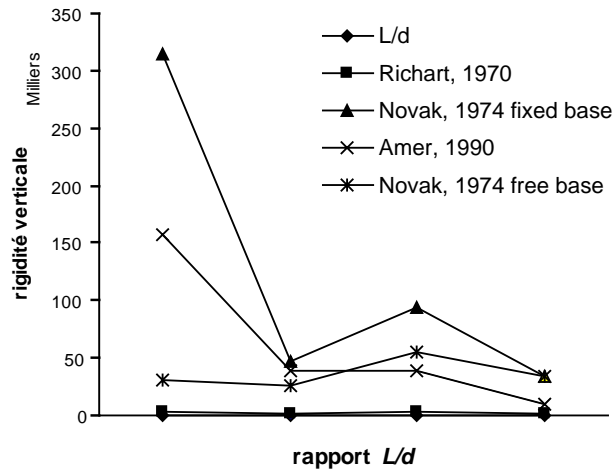


Figure 3 : Relation entre le rapport  $L/d$  et la raideur verticale  $K_v$ .

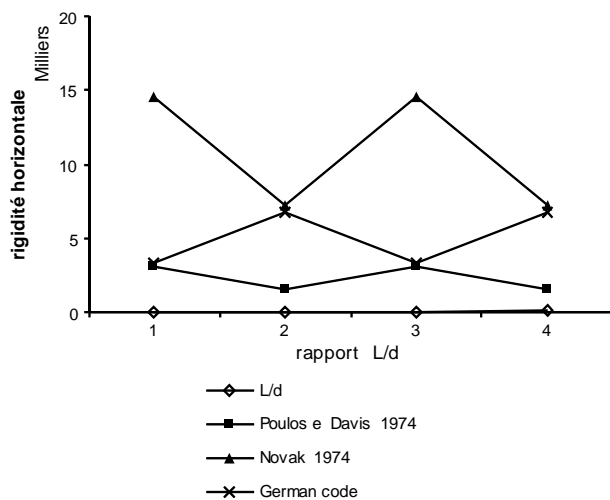


Figure 4 : Relation entre le rapport  $L/d$  et la raideur horizontale  $K_H$ .

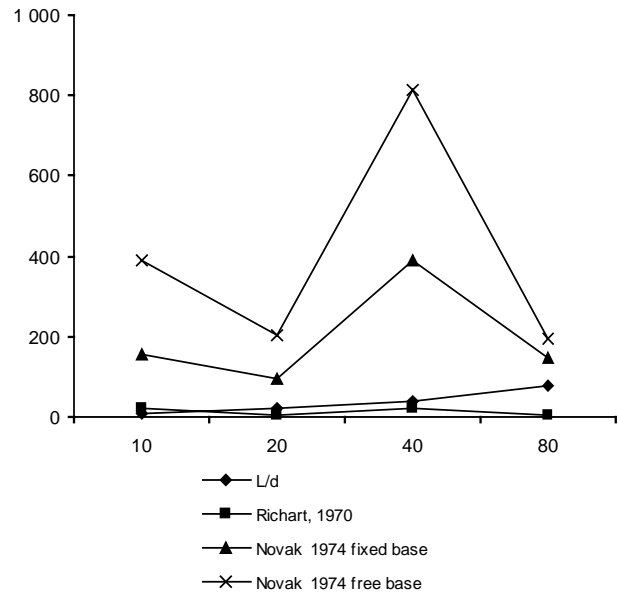


Figure 5 : Relation entre le rapport  $L/d$  et l'amortissement vertical  $C_v$ .

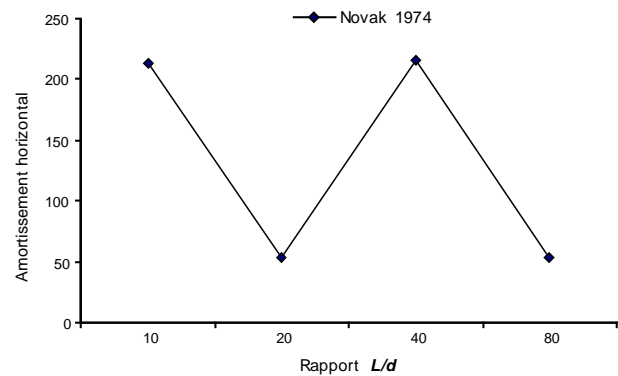


Figure 6 : Relation entre le rapport  $L/d$  et l'amortissement horizontal  $C_H$ .

La figure (6) démontre une variation de quatre valeurs de temps en changeant le rapport " $L/d$ " à l'amortissement horizontal quand la solution de Novak est utilisée.

Nous constatons que les différences numériques entre les résultats sont importantes. La solution de Novak est la seule où la longueur du pieu et les propriétés du sol sont prises en considération et par conséquent la plus en adéquation avec la solution en éléments finis utilisée dans le cadre de cette analyse.

## 6 COMPORTEMENT DU SYSTEME PROPOSE "MASSE - RESSORT - AMORTISSEUR".

L'analyse du système "masse-ressort-amortisseur" repose sur l'utilisation de la fréquence ainsi que les relations du domaine dynamique de temps. Le domaine de fréquence inclut la sinusoïde verticale et horizontale des forces avec les fréquences appliquées allant de 0 à 30 Hz.

La solution basée sur le système "masse-ressort-amortisseur" montre qu'il est essentiel d'évaluer proprement les paramètres des ressorts et des amortisseurs pour obtenir un tracé équivalent à celui produit par la méthode des éléments finis. Il est également montré que l'augmentation du diamètre du pieu implique la diminution du déplacement vertical du pieu. Ce qui prouve donc que la méthode proposée est une méthode qualitative liée à l'utilisation d'un système à 1 DDL qui peut estimer le comportement du système pieu-sol.

$$\begin{aligned} \text{Poids unitaire du pieu } \gamma_p &= 2,40 \text{ t/m}^3 \\ \text{Limites de Von-Mises } \sigma_y &= 300,00 \text{ t/m}^2 \end{aligned}$$

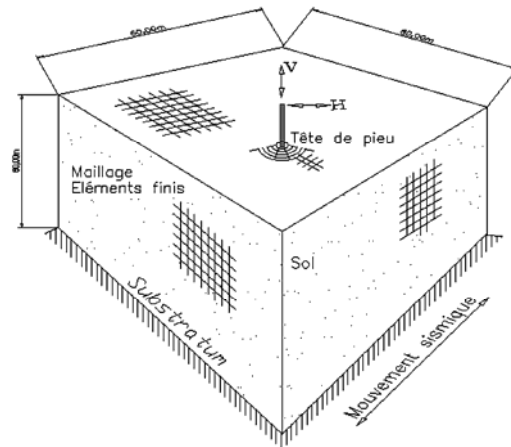


Figure 7 : Discretisation proposée du système Pieu-sol pour un élément fini

## 7 GEOMETRIE DU SOL POUR L'ANALYSE PAR ELEMENTS FINIS

La géométrie et profil du sol de l'analyse sont ceux d'un sol à profil tridimensionnel de dimensions (WxLxH) 60,00 m x 60,00 m x 60,00 m. Le choix de ces grandes dimensions est en accord avec la plus grande longueur d'onde des fréquences appliquées pour minimiser l'effet des frontières sur les ondes réfléchies et s'adapter à toute longueur du pieu utilisée dans cette analyse. Ce qui satisfait à l'impédance de l'onde en mécanique des sols pour une large zone et qui élimine l'existence de tout type d'onde réfléchie et/ou réfractée au voisinage du pieu. La figure (7) représente la discrétisation du sol proposé pour l'analyse dynamique par éléments finis du bloc solide. Le pieu est interconnecté à un élément fini de bloc solide à 9 nœuds représentant le sol au moyen d'éléments d'interface proposés; éléments à 8 nœuds, fig.8 et fig.9

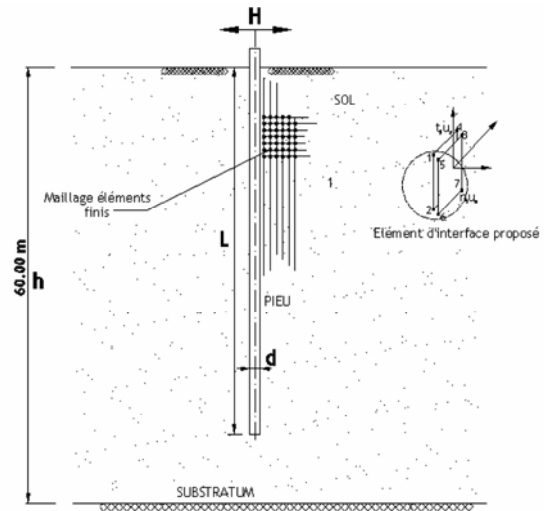


Figure 8 : Maillage en éléments finis du système pieu-sol proposé

## 8 PROPRIETES DU PIEU

Des pieux circulaires en béton armé à tête libre de longueur allant de 10,0 m à 40,0 m sont sélectionnés et utilisés. Le diamètre des pieux varie de 0,50 m à 1,00 m donnant des rapports longueur/diamètre " L/d " de 10, 20, 40 et 80. Les diamètres sélectionnés satisfont l'inertie latérale (raideur) et la grande capacité verticale de chargement. Le pieu en béton armé un poids unitaire égale à 2,40 t/m<sup>3</sup> et une vitesse de propagation d'onde ultrasonique égale à 4000 m/s.

Les propriétés élastiques du pieu sélectionné sont les suivantes :

$$\begin{aligned} \text{Module d'élasticité } E_p &= 2.000.000,00 \text{ t/m}^2 \\ \text{Coefficient de Poisson } \nu_p &= 0,15 \\ \text{Module de cisaillement } G_p &= E_p / (2(1 + \nu_p)) = 869.565,22 \text{ t/m}^2 \end{aligned}$$

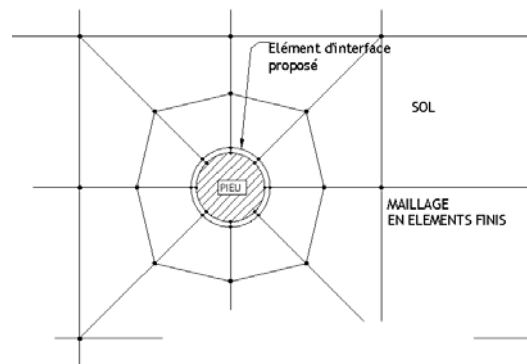


Figure 9 : Maillage en éléments finis du système pieu-sol proposé

## 9 PROPRIETES DU SOL

Les vibrations dynamiques transforment le sable lâche en un sol plus dense. Cette situation peut causer des problèmes dans la modélisation de l'analyse par éléments finis. Il est également très difficile de représenter les éléments entrecroisés dans sol granuleux. Pour ces raisons, un milieu argileux cohérent et un sable dense ont été choisis, lesquels représentent un milieu continu homogène autour du pieu avec les propriétés élastiques appropriées.

## 10 CONCLUSION

L'ensemble masse-ressort-amortisseur à 1 degré de liberté (1 DDL) a montré son efficacité bonne méthode pour des études qualitatives. Quantitativement, la méthode des éléments finis (MEF) a montré la bonne concordance avec les résultats des données expérimentales.

- Dans cette étude, le choix de grandes dimensions de sol de  $60m \times 60m \times 60m$  a réduit au minimum l'effet des ondes réfléchies aux frontières du pieu. L'analyse non linéaire par éléments finis de l'élément solide à 8 nœuds a donné les résultats semblables au comportement pieu-sol sous le chargement dynamique équivalent à ceux obtenus par l'analyse expérimentale quand la modélisation est bien définie. L'élément proposé d'interface de 8 nœuds entre le pieu et le sol environnant a représenté avec succès l'état réel de contact.
- Le choix adéquat et le calcul des paramètres concentrés tels que la rigidité et l'amortissement pour l'analyse du système proposé masse-ressort-amortisseur à 1 degré de liberté ont donné des résultats quantitatifs et ont estimé le comportement du pieu isolé sous charge dynamique verticale et horizontale.
- En appliquant une force sinusoïdale verticale à la tête du pieu, on a noté que lorsque le diamètre de pieu a augmenté, le déplacement vertical a diminué. En outre, la première fréquence de résonance a augmenté pour ce diamètre.
- On a noté que pour la même longueur de pieu de 10,00 m, l'augmentation du diamètre du pieu mène à la diminution de l'oscillation verticale en tête de pieu. La première fréquence de résonance était plus élevée pour un plus grand diamètre.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Banerjee, P.K. and Sen, R (1997), "DYNAMIC BEHAVIOUR OF AXIALLY LOADED AND LATERALLY LOADED PILES AND PILE GROUPS." Chapter 3 in Dynamic Behaviour of Foundations and Buried Structures (Developments in Soil Mech. Found. Eng.
- [2] Briard, M., (1990), "CONTROLE DES PIEUX PAR LA METHODE DES VIBRATIONS." Annl. Inst. Tech. Bâtim., N°270, juin, pp.105-107.
- [3] Cakmak, A.S., and Brebbia, C.A., (1993), "SOIL DYNAMICS AND EARTHQUAKE ENGINEERING VI" Elsevier Applied Science. London & NY.
- [4] CEBTP manuel, (1987), "REPOSE HARMONIQUE D'UN PIEU. PROGRAMME DE MODELISATION" Centre expérimental des Bâtiments et Travaux Publics, Fév, Paris, France.
- [5] Cichy, W., Dembici, E., and Odobinski, W., (1980), "ANALYSIS OF PILE-SOIL SYSTEM LOADED BY HORIZONTAL FORCE, DYNAMIC OF CYCLIC." International Symposium on Soil under Cyclic and Transient loading, Swansea.
- [6] Davies, T.G., (1995), "Dynamic Behaviour of pile groups in inhomogeneous soil." Geotech. Engrg.Div., ASCE.
- [7] Griffiths, D.V (1988), "NUMERICAL STUDIES OF SOIL-STRUCTURE INTERACTION USING A SIMPLE INTERFACE MODEL." Can. Geotech. J. 25, pp.158-162
- [8] Kagawa, T., (1991) "DYNAMIC SOIL REACTION TO AXIALLY LOADED PILES." J.Geotech. Engrg.Div., ASCE, Vol 117, N°7.
- [9] MSC-PAL and NASTRAN, "MSC-PAL, & NASTRAN DOCUMENTATION," Computer program software, MacNeal-Scwendler Corporation, LA, CA, USA
- [10] Richart, F.E.Jr., Hall, J.R. and Woods, R.D (1970) "VIBRATION OF SOILS AND FOUNDATIONS" Proceedings of the tenth I.S.S.M. & F.E., Stockholm.
- [11] Timoshenko, S.P., Goodier, J.N., (1983), "THEORY OF ELASTICITY", MacGraw-Hill International Book Company.
- [12] Wolf, J.P, and Von arx, G.A (1985), "DYNAMIC SOIL-STRUCTURE INTERACTION." Prentice-Hall Inc.