
Impédances dynamiques de fondations sur groupe de pieux

*S.Messioud*¹, *D.Dias*², *U.S.Okay*³, *B.Sbartai*⁴

¹ Département De Génie Civil Université de Jijel BP98 18000, Algérie
smessioud@yahoo.fr

² LGCIE INSA de Lyon 69621 Villeurbanne, France
d.dias69@gmail.com

³ Entreprise PINTO ; Fougères, 35300, Fougères, France
umurokyay@yahoo.com

⁴ Département de Génie Civil Université de Skikda 21000, Algérie

RESUME. Cet article présente un modèle tridimensionnel en élément finis pour l'analyse de la réponse dynamique de l'interaction sol-pieux-dalle. Des groupes de pieux intégrés dans un espace semi-infini élastique sont étudiés. Le sol et les pieux sont modélisés par des éléments volumiques et la dalle par des éléments coque, des frontières absorbantes sont implémentées aux extrémités du modèle afin d'éviter la réflexion des ondes. La formulation est basée sur la méthode de sous structuration, seul le champ libre, les pieux et la dalle sont pris en considération. La réponse en déplacement est obtenue en effectuant le produit de la fonction de la force excitatrice par la fonction de transfert en amplitude du déplacement. Les résultats obtenus sont présentés en termes de fonctions des impédances horizontales et verticales et sont validés par rapport aux résultats de référence.

ABSTRACT : This article presents a three-dimensional finite element model for the dynamic analysis of soil-pile-slab interaction. Different configurations of pile groups in a semi-infinite elastic space are studied. The soil and piles are represented by volumic elements and the slab by structural elements. Quiet boundaries are placed at the boundaries of the model to avoid wave reflection. The formulation is based on the method of substructuring. The dynamic response is obtained in terms of the amplitude displacement. The horizontal and vertical impedances of pile foundations are presented and the results are compared with previous studies.

MOTS-CLÉS : Groupe de pieux, Impédance Dynamique, Interaction Sol Structure, Modèle Numérique.

KEYWORDS : Pile Groups, Dynamic Impedance, Soil Structure Interaction, Numerical Model.

1. Introduction

Les fondations profondes avec des pieux sont couramment utilisées pour assurer la stabilité des structures situées dans des zones sismiques. Elles permettent d'assurer la stabilité des structures par rapport aux efforts ou basculement induits par les chargements sismiques. La conception et le calcul des fondations profondes dans les zones sismiques font intervenir de nombreux paramètres notamment le comportement du sol, des pieux et les différentes interactions entre ces deux constituants et les structures en surface.

Une étude approfondie du comportement sismique des fondations profondes est donc nécessaire pour assurer le bon fonctionnement de ces dernières. L'interaction sol-structure en dynamique caractérisée par les fonctions d'impédance qui doivent être étudiées dès la conception des ouvrages.

Pour les fondations superficielles, des expressions simples existant pour le calcul des fonctions d'impédance (Wolf, 1994). Par contre, très peu de solution existe sur le comportement dynamique des groupes de pieux (Mylonakis et Gazetas, 1998).

L'analyse numérique d'un pieu ou d'un groupe de pieux dans le domaine fréquentiel est présentée par plusieurs auteurs. Utilisant la méthode des éléments de frontières, des modèles numériques ont été développés et un groupe de pieux a été analysé par Kaynya et Kausel (1991) et Maeso et al (2005). Un couplage entre la méthode des éléments de frontières et la méthode des éléments finis est présenté par Padron et al (2007) pour déterminer les fonctions d'impédance d'un groupe de pieux. La méthode CIFEM (Consistent Infinitesimal Finite Element Method) est utilisée par Emanic et Maheshwari (2009) pour le calcul des impédances dynamiques d'un groupe de 4 pieux.

Dans ce travail, une modélisation tridimensionnelle par la méthode des éléments finis est présentée pour étudier la réponse dynamique des groupes de pieux. Le sol et les pieux sont représentés par des éléments volumiques. La dalle est modélisée par des éléments de type coque. Les impédances dynamiques sont calculées à partir des déplacements obtenus au point d'application de la force excitatrice.

2. Modélisation numérique d'un système sol-pieux-dalle

2.1. Méthode de sous structure

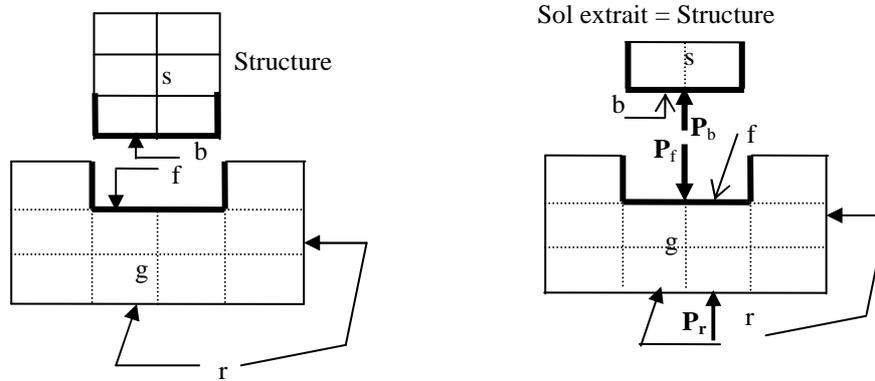
En géodynamique, les ingénieurs sont confrontés à des domaines de très grande taille dont l'influence sur les structures qu'ils cherchent à dimensionner est prise en compte via une matrice d'impédance dynamique aux interfaces. Les termes de la matrice d'impédance s'expriment sous la forme de fonctions à valeurs complexes de

la fréquence. La fonction d'impédance d'une fondation peut être exprimée sous la forme générale :

$$K(w) = K_s (k + ia_0 c) \text{ avec } a_0 = \frac{\omega \cdot Bf}{C_s} \quad [1]$$

Où a_0 est la fréquence adimensionnelle définie par une dimension caractéristique de la fondation Bf , par exemple le rayon pour une fondation circulaire, ou la demi-largeur pour une fondation rectangulaire et par le diamètre d pour un pieu ou un groupe de pieux. C_s est la vitesse des ondes de cisaillement dans le sol et ω est la pulsation de l'excitation harmonique. La majorité des méthodes utilisées pour la détermination des fonctions d'impédances sont les méthodes dites classiques (BEM, BEM-MEF, BEM-TLM) basées sur le formalisme des fonctions des Green. Dans ce travail, la méthode des éléments est utilisée pour déterminer les fonctions impédances dynamiques.

Considérons une discrétisation par éléments finis des systèmes sol-structure comme le montre la figure 1a. Le sol et la structure sont désolidarisés, et l'équilibre doit être établi par l'application des forces d'inertie P_b , P_f . Le modèle est soumis à une excitation arbitraire. La figure 1b représente la discrétisation du problème en champ libre. La structure représente dans ce cas la partie extraite du sol.



a. Problème interaction sol-structure

b. Problème en champ libre

Figure 1. Schématisation d'une méthode de sous structure

Pour obtenir une solution dans le domaine fréquentiel, les équations de la matrice relative aux forces et déplacements sont données par la relation $-(\omega^2 M + i \omega C + K)U = P$, où M la matrice de masse, C est la matrice d'amortissement, et K la matrice de rigidité. P et U sont les vecteurs de force et de

déplacement, où ω est la fréquence d'excitation (Kausel et al (1978) et A.Pecker (1984)).

L'équation de mouvement pour le problème de l'interaction sol-fondation est donnée par la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} K_{ff} & K_{fg} & K_{fr} \\ K_{gf} & K_{gg} & K_{gr} \\ K_{rf} & K_{rg} & K_{rr} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_f \\ U_g \\ U_r^* \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_f \\ 0 \\ P_r \end{Bmatrix} \quad [2]$$

La réponse en mouvement en champ libre est donnée par l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} K_{ff} & K_{fg} & K_{fr} \\ K_{gf} & K_{gg} & K_{gr} \\ K_{rf} & K_{rg} & K_{rr} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_f^* \\ U_g^* \\ U_r^* \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_f^* \\ 0 \\ P_r^* \end{Bmatrix} \quad [3]$$

Les termes : s représente les nœuds de la structure, f les nœuds de l'interface sol fondation, g les nœuds du sol, b les nœuds de la structure le long de l'interface et r les nœuds du frontière de modèle. L'astérisque représente la solution en champ libre.

En générale $P_r \neq P_r^*$ sauf si la frontière est loin de la structure, soustrayant l'équation 4 de l'équation 3 conduit à :

$$\begin{bmatrix} K_{ff} & K_{fg} & K_{fr} \\ K_{gf} & K_{gg} & K_{gr} \\ K_{rf} & K_{rg} & K_{rr} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_f - U_f^* \\ U_g - U_g^* \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_f - P_f^* \\ 0 \\ P_r - P_r^* \end{Bmatrix} \quad [4]$$

L'équation 4 peut être écrit par une forme plus compacte :

$$K(U_f - U_f^*) = P_f - P_f^* \quad [5]$$

Avec $K=K_{ij}(\omega)$ est la matrice des fonctions impédance la fondation qui peut être écrite sous la forme suivante :

$$K_{ij}(\omega) = \frac{(P_f - P_f^*)e^{i\omega t}}{(U_f - U_f^*)(\omega)} \quad [6]$$

Avec ; P_f le vecteur des forces (moments) qui provient de l'effet inertiel de la superstructure, P_f^* le vecteur des forces (moments) provoquées par le mouvement du champ libre, U_f est la réponse à l'interface sol-fondation et U_f^* la réponse de mouvement en champ libre à l'interface sol-fondation

Une caractéristique fondamentale du code de calcul utilisé est la représentation exacte de la frontière modèle figure 1 qui sépare la région des éléments finis du milieu semi-infini (le champ libre). Des frontières absorbantes sont placées aux extrémités du modèle par l'implémentation d'éléments paraxiaux élastiques. Ce qui correspond a des amortisseurs visqueux distribués le long des frontières des modèles pour éviter la réflexion des ondes.

2.2. Caractéristiques des modèles

La figure 2 présente le modèle 3D utilisé pour la simulation numérique à l'aide du code ASTER®. Les caractéristiques géométriques du modèle ont été déterminés avec une étude paramétrique afin d'assurer le bon fonctionnement des frontières absorbantes. Le volume de sol étudié a pour dimensions 40 x 40 x 15 m³. Des pieux circulaires en béton armé de longueur 9 m sont modélisés. Leur diamètre est de 0,60 m et conduit à un rapport longueur/diamètre de 15. La dalle n'est pas en contact avec le sol et à une épaisseur de 0.6m. Elle est représentée par des éléments de type coque. Les éléments coque sont liés aux éléments volumiques du modèle (pieux et sol). Les éléments des modèles en interaction sont considérés élastiques. Les propriétés mécaniques des couches de sol et de fondations sont présentées au tableau 1. Le choix de ces propriétés a été effectué à partir d'une recherche bibliographique : Emani et Maheshwari (2009) et Padron et al (2007).

	Module d'élasticité (MPa)	Coefficient de poisson	Masse volumique Kg/m ³	Coefficient d'amortissement
Sol mou	25	0.4	1800	0.05
Sol dur	250	0.3	2200	0.05
Pieux/dalle	25 000	0.25	2500	0.0

Tableau 1.Caractéristiques mécaniques des éléments en interaction

La taille des éléments de discrétisation doit être suffisamment petite pour que le maillage puisse transmettre les ondes sans distorsion numérique. (Courant et al (1928) et Kuhlemeyer et Lysmer (1973)) montrent que la taille des éléments doit être inférieure à un dixième de la longueur d'onde λ .

$$f = \frac{C_s}{10.\Delta l} \quad \text{avec} \quad f = \frac{\omega}{2\pi} \quad [7]$$

Avec C_s est la vitesse de l'onde, Δl la taille de l'élément de maillage, ω la fréquence d'excitation et λ la longueur d'onde.

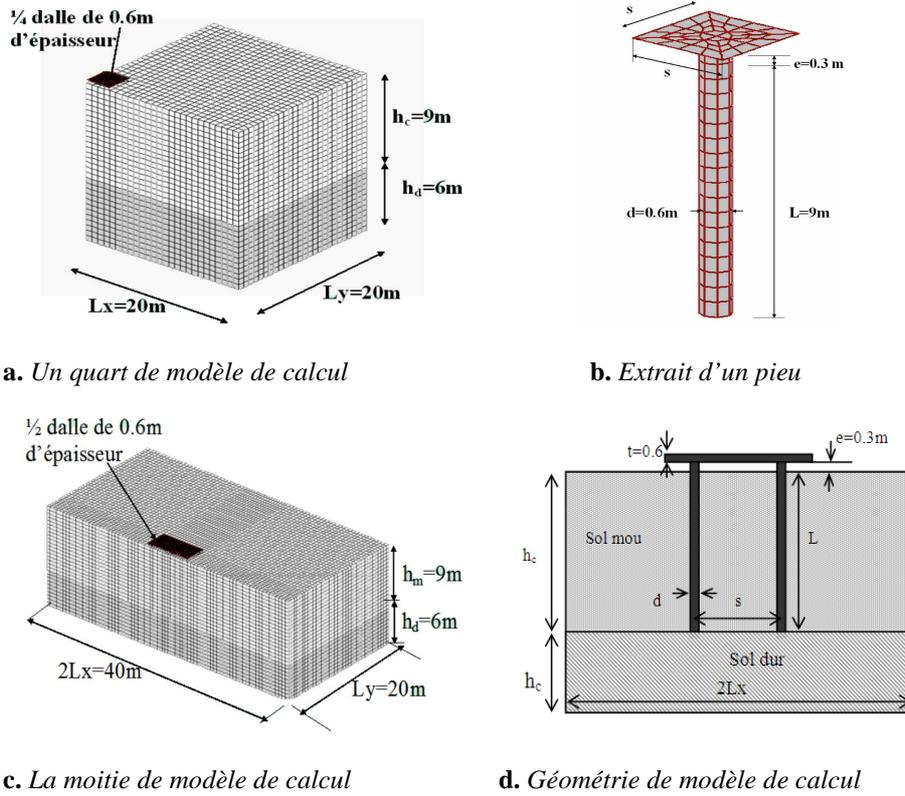


Figure 2. Caractéristiques géométriques de modèle de calcul

3. Validation du modèle numérique

3.1. Impédance verticale K_{zz} et horizontale K_{xx}

La matrice de rigidité dynamique K_{ij} d'un groupe de pieux, soumis à un vecteur force appliqué au centre de la dalle, est calculée en fonction du vecteur déplacement résultant au même point d'application. Les pieux sont supposés liaisonnés à une dalle infiniment rigide. Dans cette étude une charge verticale de 1MN est appliquée

sur un quart de modèle (figure 2a) pour déterminer l'impédance verticale et une charge horizontale de 1MN sur la moitié du modèle (figure 2c) pour déterminer l'impédance en mouvement de translation. Les fonctions d'impédance sont présentées avec des valeurs adimensionnelles.

La figure 3a présente la variation de l'impédance verticale d'un groupe de 9 pieux dont le rapport entre la distance entre axes des pieux et le diamètre est de 5 et 10, les résultats sont en bonnes concordances avec les résultats obtenus par Padron et al (2007). On note toutefois un écart de l'ordre de 13.2 % pour les deux dernières fréquences. Cet écart peut être induit par la différence entre les méthodes de calcul utilisées. Padron et al (2007) ont utilisé la méthode des éléments de frontières couplée avec la méthode des éléments finis. La présente étude est réalisée par la méthode des éléments finis avec les frontières absorbantes.

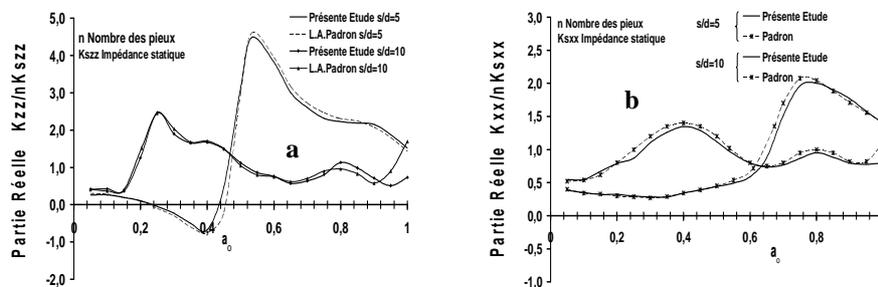


Figure 3. Impédances dynamiques d'un groupe de 3x3 pieux ($L/d=15$, $s/d=5$ et $s/d=10$)

De la manière, figure 3b présente la variation de l'impédance K_{xx} en fonction de la fréquence adimensionnelle. Les résultats obtenus par la modélisation numérique sont en bons accords avec les résultats obtenus par Padron et al. (2007). Ce qui permet de valider le processus de simulation développé au sein de cette étude.

4. Résultats et discussion

Cette section présente l'effet inertiel de la dalle, de l'influence de la position des pieux et de l'influence de couche support (plus rigide) sur les impédances dynamiques verticales et horizontales. Les groupes de pieux ont deux conditions d'ancrage en pied. Les pieux flottants et posés sont étudiés. Les pieux flottants sont implémentés dans le sol compressible et ont une longueur de 9m. Les pieux posés ont une longueur de 9 m et reposent directement sur l'horizon de sol dur.

La figure 4 présente la variation des impédances dynamiques verticales des pieux flottants. L'effet inertiel de la dalle de liaison sur les impédances dynamiques est important, les termes de rigidités sont fortement atténués pour des rapports s/d

relativement élevés et la fréquence devient de plus en plus basse. En ce qui concerne les termes d'amortissement, ceux-ci ne sont pas affectés par l'effet inertiel de la dalle.

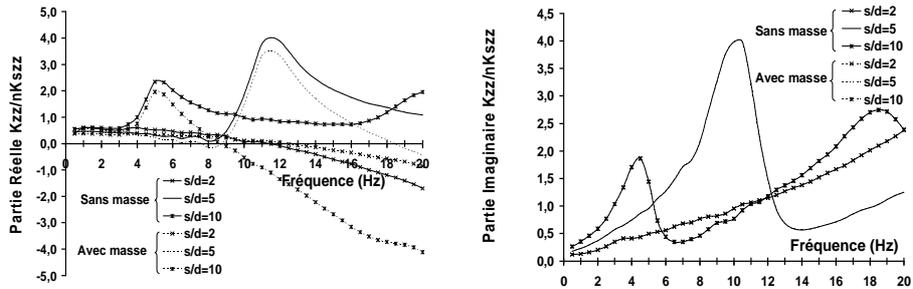


Figure 4. Impédance verticale K_{zz} d'un groupe de 4 pieux flottants dans sol mou

La figure 5 montre l'influence de la raideur de la couche de support sur la réponse verticale. La réponse dynamique des pieux posés diffère de celle des pieux flottants. La pose des pieux sur la couche de support permet d'avoir une raideur élevée. L'effet de la couche de support sur l'amortissement est non négligeable. La présence d'une couche rigide induit une réduction de l'effet de l'amortissement ce qui est visible sur la figure 5 qui représente la partie imaginaire de la réponse.

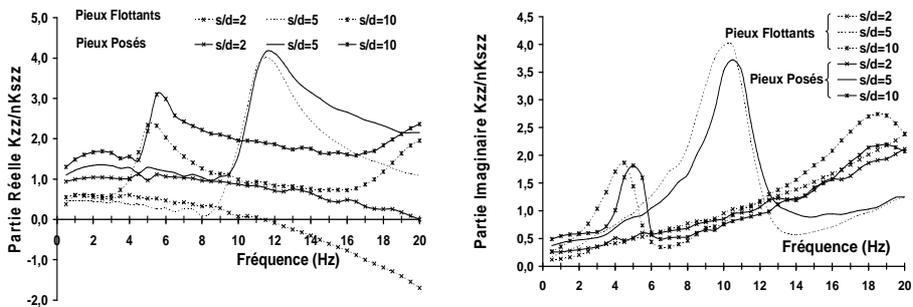


Figure 5. Impédances verticales K_{zz} d'un groupe de 4 pieux flottants et des pieux posés sur couche dure

La figure 6 montre que les impédances dynamiques horizontales sont fortement affectées par l'effet inertiel de la dalle. L'effet inertiel est marqué par une atténuation très remarquable pour des rapports relativement élevés $s/d=5$ et 10 . La

fréquence devient de plus en plus faible que celle des impédances verticales. Ceci serait du à l'augmentation de la masse vibrante de la dalle.

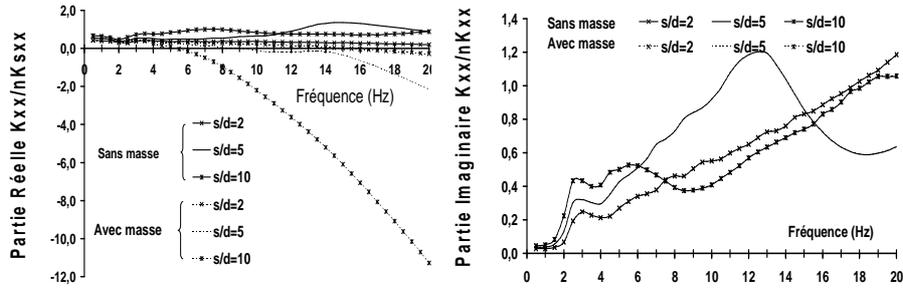


Figure 6. Impédance horizontale K_{xx} d'un groupe de 4 pieux flottants dans sol mou

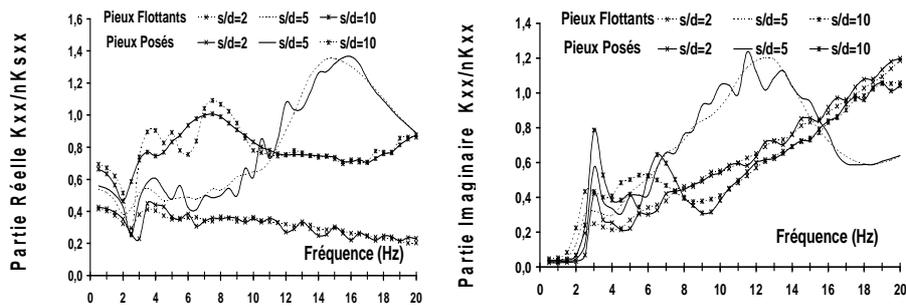


Figure 7. Impédances horizontales K_{xx} d'un groupe de 4 pieux flottants et des pieux posés

La figure 7 présente l'influence de la rigidité de la couche de support sur les impédances horizontales K_{xx} . Des pics de résonance apparaissent qui sont liés à la réflexion des ondes au niveau du substratum et à l'effet d'ancrage des pieux en pied.

5. Conclusion

Dans ce travail nous nous sommes intéressés à l'étude du comportement dynamique d'un groupe de pieux mis en place dans un massif de sol compressible. Une modélisation de l'ensemble sol-pieux-dalle a été mise en œuvre par la méthode des éléments finis.

Les résultats des impédances dynamiques d'une fondation rigide reposant sur un groupe de pieux sont présentés. L'évolution de l'impédance dynamique verticale et

horizontale en fonction de la fréquence a été présentée. L'influence du rapport s/d , l'effet inertiel de la dalle et l'influence de la couche de sol dur sur les impédances dynamiques ont été étudiées.

L'effet inertiel affecte les termes d'impédance d'une manière très significative. Les termes de rigidité (partie réelle des termes d'impédance) sont fortement atténués pour des rapports s/d relativement élevés, principalement dans les hautes fréquences. Ces termes deviennent négatifs à partir d'une certaine fréquence. Par contre les termes d'amortissement ne sont pas affectés par l'effet inertiel.

L'effet de la rigidité du substratum affecte les impédances dynamiques d'une façon importante. Les résultats ont montré que, les pieux posés ont un comportement plus raide que les pieux flottants. Les pics de résonance en translation sont plus marqués du fait de la réflexion des ondes au niveau du substratum.

6. Bibliographie

- Courant R., Friedrichs K. and Lewy H. « Über die partiellen Differenzgleichungen der mathematischen Physik ». *Mathematische Annalen*, Vol. 100, No. 1, 32–74, 1928.
- Emani P.K, Maheshwari B.K. « *Dynamic impedances of pile groups with embedded caps in homogeneous elastic soils using CIFECM* ». *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. (2009) 963–973.
- Kaynia AM, Kausel E. « *Dynamics of piles and pile groups in layered soils* ». *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 1991; 10 (8): 386–401.
- Kausel E, Whitman RV, Morray JP, Elsabee F (1978) « The spring method for embedded foundations ». *Nuclear Engineering and Design*, 48, pp. 377–392
- L.A. Padron, J.J. Aznarez, O. Maeso « *BEM–FEM coupling model for the dynamic analysis of piles and pile groups* ». *Engineering Analysis with Boundary Elements* 31 (2007) 473–484.
- Mylonakis G. and Gazetas G. (1999) « *Lateral Vibration and Internal Forces of Grouped Piles In Layered Soil* ». *Journal of Geotechnical & Earthquake Engineering*, Vol. 125 pp.16-25
- Mamoon SM, Kaynia AM, Banerjee PK. « *Frequency domain dynamic analysis of piles and pile groups* ». *J Eng Mech ASCE* 1990; 116 (10): 2237–57.
- Maeso O, Aznarez JJ, Garcia F. « *Dynamic impedances of piles and groups of piles in saturated soils* ». *Comput Struct* 2005; 83: 769–82.
- Pecker A (1984) « *Dynamique des sols* ». Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Wolf, J.P. (1994). « *Foundation vibration analysis using simple physical model* » PTR Prentice Hall