

# EFFET DES PROPRIÉTÉS STOCHASTIQUES DE SOL SUR LA RÉPONSE DES FONDATIONS FILANTES REPOSANT SUR DES SOLS NON-HOMOGÈNES

## STOCHASTIC SOIL PROPERTIES EFFECT ON THE STRIP FOUNDATION RESTING ON INHOMOGENEOUS SOILS RESPONSE

HADID MOHAMED & ZAHAFI AMNA

Laboratoire Travaux Publics Ingénierie de Transport et Environnement  
Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics  
Rue Sidi Garidi 1, BP 32 Alger 16051, Algérie  
hadid\_mohamed2003@yahoo.fr

### RÉSUMÉ

L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet de la variabilité verticale des propriétés de sol sur la réponse des fondations filantes rigides, reposant des sols visco-élastiques non-homogènes en utilisant une alternative robuste et originale pour la simulation des champs aléatoires non bornés et bornés, appelée méthode probabiliste de simulation indirecte de champs aléatoires non-gaussien. Ainsi, on associe à la variable aléatoire non bornée la loi de distribution log-normale (module de cisaillement) et à la variable aléatoire bornée la loi de distribution bêta (coefficient d'amortissement, coefficient de Poisson et masse volumique).

Dans cet article, la réponse des fondations filantes rigides, reposant sur des sols non-homogènes visco-élastiques est calculée par la méthode des couches minces (TLM). A ce titre, une étude paramétrique relative à l'influence de la variabilité verticale du module de cisaillement, de la masse volumique, du coefficient d'amortissement et du coefficient de Poisson sur la variabilité de la réponse des fondations filantes rigides a été faite. Les résultats de ce travail ont montré que les paramètres qui ont une influence prépondérante sur la réponse des fondations filantes rigides superficielles, surmontant un profil de sol non-homogène reposant sur un substratum rocheux, sont le module de cisaillement et à un degré moindre le coefficient de Poisson. En revanche, il ressort que la variabilité du coefficient d'amortissement et la masse volumique peuvent être négligées.

**MOTS-CLÉS:** réponse des fondations filantes, variabilité des propriétés de sol, méthode des couches minces, sol non-homogènes.

### ABSTRACT

The objective of this work is to study the effect of spatial variability of the soil properties on the rigid strip foundation resting on inhomogeneous soils response using probabilistic method of indirect simulation field random non-Gaussian for simulation of soil properties. Soil properties of interest are shear modulus, damping ratio, Poisson ratio and density, modeled as spatially random fields. The shear modulus is assumed to be lognormal distributed, this choice is motivated by the fact that this soil property is positive parameter, and lognormal distribution enables analyzing its large variability. Because damping ratio, density and soil Poisson ratio are bounded in practice between two extreme values, their random fields are obtained from the Beta distribution, where the Beta field is determined, by performing a mapping technique on the lognormal probability distribution function diagram. In this frame, the foundation response is carried out via Monte Carlo simulations combined with deterministic thin layer method (TLM). The soil profile is modeled as a set of superposed layers extending horizontally to infinity, and having random properties. Spatial variability of soil properties is considered in the vertical direction only. The analysis integrates the influence of coefficient of variation of the four soil properties on foundation response.

Obtained results indicate that shear modulus is of prime importance. So, mass density and damping ratio variability can be neglected in a dynamic analysis of a strip foundation. The Poisson ration has a small effect on foundation response closed resonance frequency.

**KEYWORDS:** Strip foundation response, spatial variability of the soil properties, thin layer method, inhomogeneous soil.



## 1. INTRODUCTION

L'étude de la réponse dynamique des fondations revêt une importance significative dans la conception des fondations supportant les machines vibrantes, ainsi que dans la conception d'ouvrages avec prise en compte de l'interaction sol-fondation. Les endommagements causés par les séismes indiquent que les propriétés locales du sol tels que le module de cisaillement, l'amortissement, le rapport d'impédance, la géométrie de la fondation, la profondeur de l'enterrement, la stratification du sol, etc. jouent un rôle déterminant dans le comportement dynamique du système sol-fondation.

Le présent travail propose d'utiliser une alternative robuste et originale [1, 2] pour la simulation des champs aléatoires non bornés et bornés, appelée méthode probabiliste de simulation indirecte de champs aléatoires non-gaussien. Ainsi, on associe à la variable aléatoire non bornée la loi de distribution log-normale (module de cisaillement) et à la variable aléatoire bornée, la loi de distribution bêta (coefficient d'amortissement, coefficient de Poisson et masse volumique).

Le but de ce travail est de calculer la réponse des fondations filantes rigides, reposant sur un profil de sol multicouche visco-élastique non-homogène et ce, par la méthode des couches minces. A ce titre, une étude paramétrique relative à l'influence de la variabilité du module de cisaillement, de la masse volumique, du coefficient d'amortissement et du coefficient de Poisson sur la variabilité de la réponse des fondations reposant sur un profil de sol non-homogène a été faite.

## 2. FORMULATION PAR LA MÉTHODE DES ÉLÉMENTS DE FRONTIÈRE

L'équation intégrale aux frontières de l'élasto-dynamique d'un solide élastique, homogène et isotrope occupant un domaine  $\Omega$ , limité par sa surface  $\Gamma$  est exprimée comme suit [3, 4]

$$c_{ij}(x_k)u_j(x_k) + \int_{\Gamma} H_{ij}(x_k, x_l, n_l)u_j(x_l) d\Gamma = \int_{\Gamma} G_{ij}(x_k, x_l)q_j(x_l) d\Gamma \quad (1)$$

$c_{ij}$  est une constante dépendant de la configuration géométrique du point d'application de la force volumique de Dirac;  $u_j$  et  $q_j$  sont les amplitudes de la  $j^{\text{ème}}$  composante des vecteurs déplacement et traction,  $u$  et  $q$ , respectivement;  $G_{ij}(x_k, x_l)$  et  $H_{ij}(x_k, x_l, n_l)$  expriment respectivement les composantes du tenseur de Green en terme de déplacement et de traction au point  $x_k$  dans la

direction  $i$  due à une force unitaire concentrée au point  $x_l$  dans la direction  $j$  et  $n_l$  est la normale extérieure à la  $l^{\text{ème}}$  élément de frontière  $\Gamma$ . Pour les fondations superficielles et dans le contexte des fonctions de Green d'un milieu stratifié semi-infini,  $H_{ij} = 0$  et  $c_{ij} = \delta_{ij}$  et l'équation [1] devient

$$u_j(x_k) = \int_{\Gamma} G_{ij}(x_k, x_l)q_j(x_l) d\Gamma \quad (2)$$

Procédons à présent à la discrétisation du contour en  $N$  éléments constants. L'équation intégrale aux frontières (2) se met alors sous la forme matricielle suivante :

$$U = Gq \quad (3)$$

Où  $G$  est la matrice d'influence dont les éléments sont évalués par intégration des fonctions de Green [5].

Lorsque la fondation est très rigide en comparaison avec le sol, les déplacements sur la frontière de la fondation peuvent être obtenus à partir des mouvements de corps rigides par l'intermédiaire d'une matrice de transformation  $T$ , d'où :

$$u = Tu^f \quad (4)$$

Où  $u^f$  est le vecteur déplacement de corps rigide de la fondation. En introduisant la relation forces-contraintes sur l'interface sol-fondation :

$$F = T^t Aq \quad (5)$$

Où  $A$  est la matrice aire. Combinant les équations (3), (4) et (5), il en découle que le vecteur des forces appliquées dans les directions des déplacements, peut être défini sous une forme matricielle comme :

$$F = Ku^f \quad (6)$$

où

$$K = T^t G^{-1} T \quad (7)$$

est la matrice d'impédance.

## 3. SIMULATION DES PROPRIÉTÉS DU SOL

La méthode probabiliste de simulation indirecte de champs aléatoires non-gaussien est basée sur la théorie des champs aléatoires. Cette approche utilise une hypothèse de base qui consiste à décomposer la variable aléatoire en une tendance déterministe et en une composante aléatoire décrivant la variabilité autour de cette tendance [1, 6]. Le module de cisaillement  $G$  est supposé être distribué d'une manière log-normale. Ce choix est motivé par le fait que cette propriété de sol est un paramètre positif et que la distribution log-normale permet d'analyser sa grande variabilité. L'expression du module de cisaillement est donnée par (Nour et al. 2002)

$$G(z) = \exp[G_{0,\ln G}(z) + \sigma_{\ln G} \Delta f_G(z)] \quad (8)$$



Avec

$$\begin{cases} \sigma^2_{lnG} = \ln\left(1 + \frac{\sigma^2_G}{G_{0,G}}\right) \\ G_{0,lnG} = \ln(G_{0,G}) - \frac{1}{2}\sigma^2_{lnG} \end{cases} \text{ où } \begin{cases} \sigma^2_{lnG} = \ln(1 + CV_G^2) \\ G_{0,lnG} = \ln(G_{0,G}) - \frac{1}{2}\sigma^2_{lnG} \end{cases} \quad (9)$$

Où  $G_{0,G}$  et  $\sigma_G$  désignent respectivement la moyenne et l'écart type du module de cisaillement et  $CV_G = \sigma_G/G_{0,G}$  désigne le coefficient de variation.

La variabilité spatiale du coefficient de Poisson, de la masse volumique et du coefficient d'amortissement suivent la distribution de probabilité bêta pour une variable aléatoire dont les valeurs sont bornées. Dans ce qui suit, la méthodologie est bien développée pour le coefficient de Poisson  $v \in [v_{min}, v_{max}]$ , la démarche étant la même pour les autres propriétés bornées du sol. La variabilité spatiale du coefficient de Poisson est donnée par :

$$v(z) = v_{min} + (v_{max} - v_{min})V(z) \quad (10)$$

Le champ  $V \in [0, 1]$  est la solution de l'équation intégrale de la fonction de distribution cumulative bêta avec les paramètres  $q$  et  $r$  et qui permet de déterminer la fonction appropriée de probabilité  $P_V$  :

$$B(V|q,r) = \frac{B_V(q,r)}{B(q,r)} = P_V \quad q,r > 0 \quad (11)$$

Le champ simulé  $\bar{V}(z)$  est transformé en un champ bêta  $v(z)$  en le cadrant sur le diagramme de la fonction de distribution de probabilité. L'opération de cadrage conserve la moyenne et l'écart type du coefficient de Poisson employés pour évaluer  $q, r$  et  $\bar{V}$ .

$B_V(q, r)$  est la fonction bêta incomplète, et  $V(z)$  est obtenu en supposant que la fonction de distribution cumulative bêta est égale à une fonction appropriée de probabilité  $P_V$ . Puisque le coefficient de Poisson du sol est un paramètre positif, on préfère cadrer la fcd bêta avec la fonction de distribution cumulative log-normale, exprimée au moyen de la fonction cumulative normale standard comme suit :

$$P_V = \Phi_0\left(\frac{\ln \bar{V} - \ln\left(v_{0,v} \exp\left(-\frac{1}{2}\sigma^2_{lnv}\right)\right)}{\sigma_{lnv}}\right) \quad (12)$$

Où  $\Phi_0$  est la fonction de distribution cumulative normale standard, pour laquelle  $\bar{V}$  représente le cadrage de  $\bar{V} \in (0, +\infty)$  dans  $P_V \in [0, 1]$ . L'expression de  $\bar{V}$  est donnée par :

$$\bar{V} = \exp\left[v_{0,lnv} + \sigma_{lnv}(\Delta f_v(z))\right] \quad (13)$$

Avec

$$\begin{cases} \sigma^2_{lnv} = \ln\left(1 + \frac{\sigma^2_v}{v^2_{0,v}}\right) \\ v_{0,lnv} = \ln(v_{0,v}) - \frac{1}{2}\sigma^2_{lnv} \end{cases} \quad (14)$$

Où  $v_{0,G}$  et  $\sigma_v$  désignent respectivement la moyenne et l'écart type du coefficient de Poisson.

#### 4. ANALYSE PROBABILISTE DE LA RÉPONSE DES FONDATIONS REPOSANT SUR UN PROFIL DE SOL NON HOMOGÈNE

Les caractéristiques mécaniques et, en particulier, le module de cisaillement du sol varient en fonction de la profondeur à partir de la surface libre. Les expériences ont montré que cette variation est en puissance de la profondeur [7]. Par exemple, pour un site uniforme d'argile molle normalement consolidée, le module de cisaillement du sol varie linéairement en fonction de la profondeur  $z$ . Pour un site uniforme de sol cohérent, il varie en racine carrée de  $z$  et pour un site d'argile raide surconsolidée, il est constant. Dans le cas général, on suppose que la variation du module de cisaillement de la couche de sol est de la forme suivante [8, 9, 10]

$$G_s(z_s) = G_0 \left(\frac{z_s}{H}\right)^p ; \quad 0 \leq p \leq 1 \quad (15)$$

Où  $G_0$  est le module de cisaillement à l'interface couche de sol-substratum et  $H$  est l'épaisseur de la couche supérieure (figure 3).

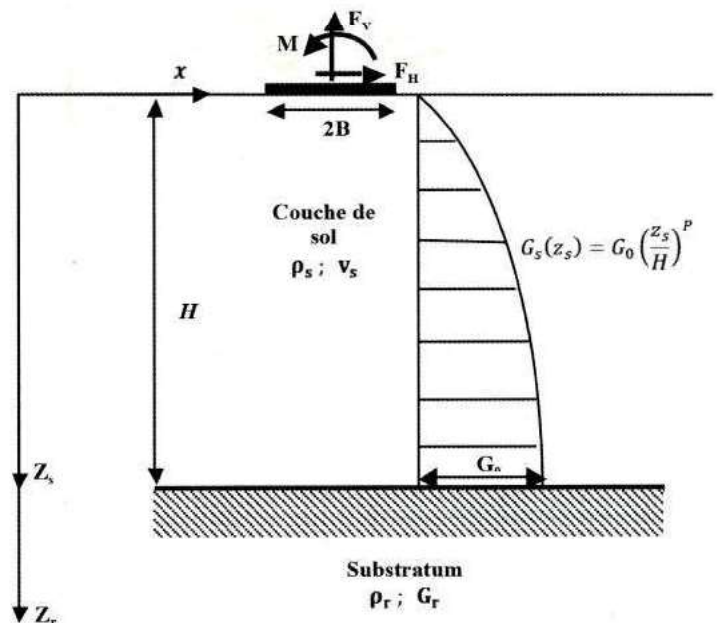


Figure 1: Profil de sol non-homogène et distribution du module de cisaillement en fonction de la profondeur

Figure1: inhomogeneous soil profile with shear modulus distribution



## 5. ÉTUDE PARAMÉTRIQUE SUR LA RÉPONSE DES FONDATIONS REPOSANT SUR UN PROFIL DE SOL NON-HOMOGÈNE

Dans cette partie, on va étudier l'influence de la variabilité du module de cisaillement, de la masse volumique, du coefficient d'amortissement et du coefficient de Poisson sur les statistiques de la réponse des fondations filantes superficielles reposant sur un profil de sol non homogène surmontant un substratum rocheux. A cet effet, on considère le cas de  $p = 0.5$  et  $p = 1$ .

### • Influence du module de cisaillement

La figure 2 présente les statistiques de la réponse de la fondation en fonction de la variabilité du module de cisaillement  $G$ . D'après les courbes, on remarque que :

- l'augmentation de  $CV_G$  fait glisser la fréquence fondamentale du système sol-fondation vers les basses fréquences, ce qui explique que l'hétérogénéité rend le profil de sol plus souple. Par ailleurs, on observe que l'augmentation de  $CV_G$  induit aussi une augmentation de l'amplitude de la réponse des fondations calculée et cela est plus marqué pour les grandes valeurs de  $CV_G$  ;
- les amplitudes des déplacements augmentent quand le degré de non-homogénéité ' $p$ ' augmente.

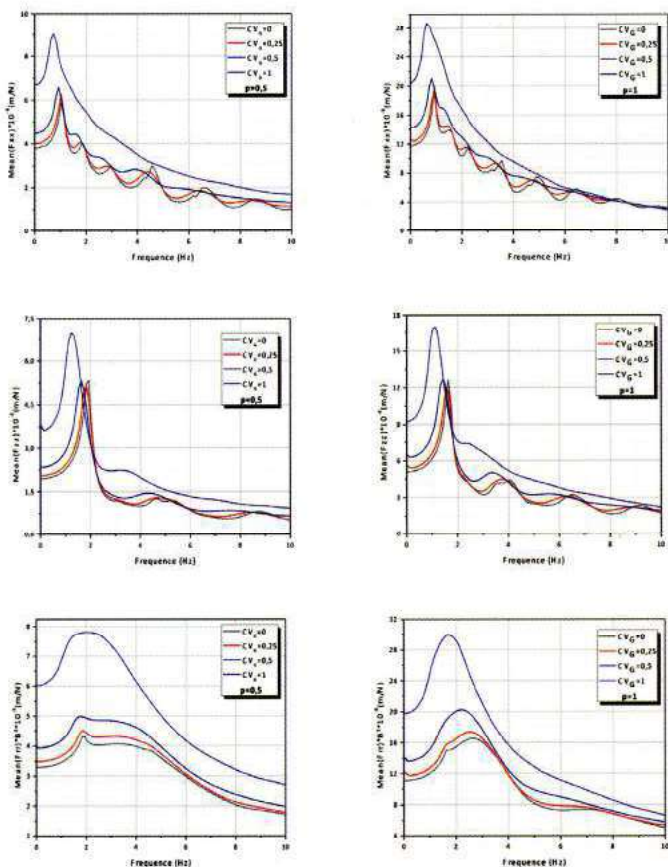


Figure 2 : Déplacement horizontal  $F_x$ , vertical  $F_z$  et de balancement  $F_r$  en fonction de la variabilité de  $G$

Figure 2 : Horizontal displacement  $F_x$ , vertical  $F_z$  and rocking  $F_r$  versus variation coefficient of  $G$

### • Influence de la masse volumique

La figure 3 présente les statistiques de la réponse de la fondation en fonction de la variabilité de la masse volumique  $\rho$ . On peut souligner ce qui suit :

- la variabilité de la masse volumique a un effet plus prononcé sur le déplacement vertical que sur le déplacement horizontal et le balancement. Le déplacement vertical diminue quand la variation de  $CV_\rho$  augmente. On peut observer aussi que lorsque le coefficient de variation  $CV_\rho$  augmente, les déplacements de la fondation diminuent particulièrement au niveau des fréquences de résonance. Pratiquement cette influence peut être négligée ;
- les amplitudes des déplacements augmentent quand le degré de non-homogénéité ' $p$ ' augmente.

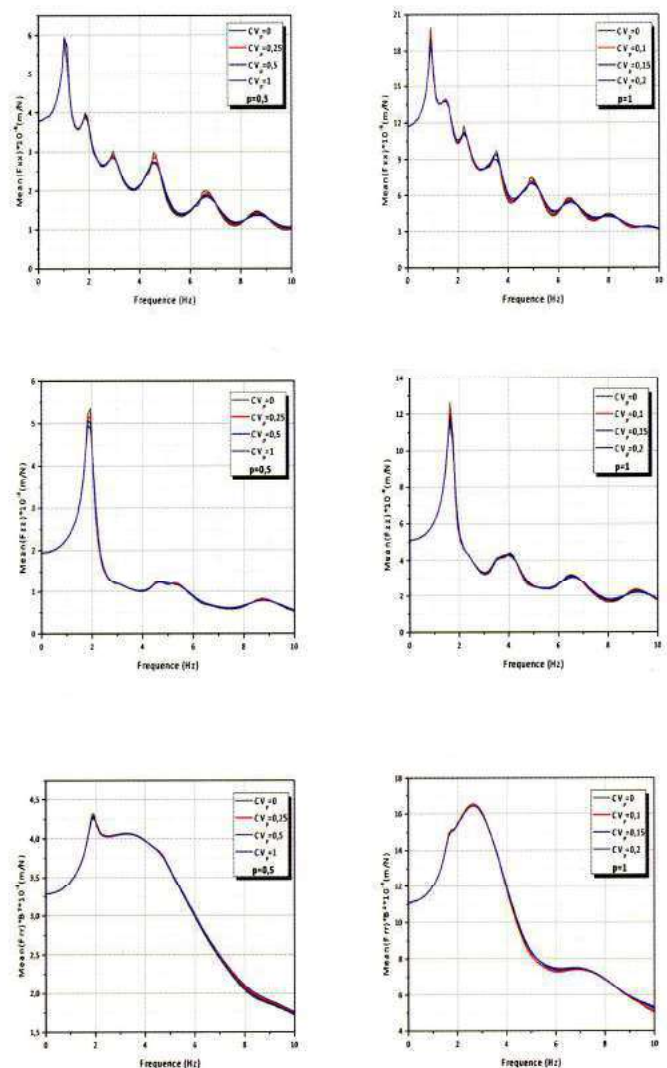


Figure 3 : Déplacement horizontal  $F_x$ , vertical  $F_z$  et de balancement  $F_r$  en fonction de la variabilité de  $p$

Figure 3: Horizontal displacement  $F_x$ , vertical  $F_z$  and rocking  $F_r$  versus variation coefficient of  $p$



**• Influence du coefficient d'amortissement**

La figure 4 présente les statistiques de la réponse de la fondation en fonction de la variabilité du coefficient d'amortissement  $\beta$ .

- il ressort que la variabilité du coefficient d'amortissement n'a pas d'influence sur la réponse des fondations calculée ;
- les amplitudes des déplacements augmentent quand 'p' augmente.

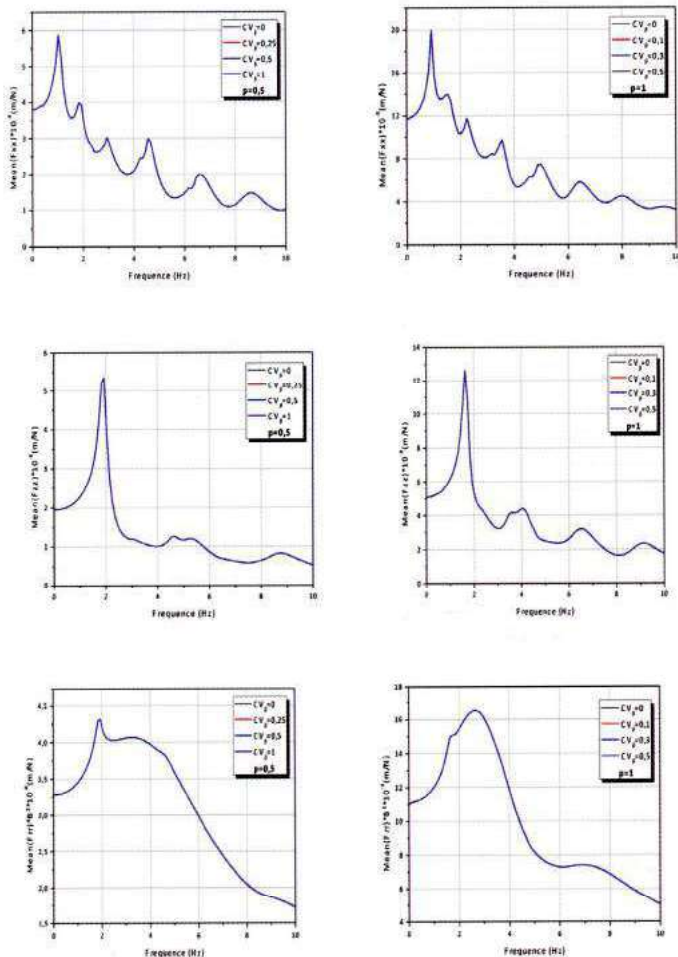


Figure 4 : Déplacement horizontal  $F_x$ , vertical  $F_z$  et de balancement  $F_r$  en fonction de la variabilité de  $\beta$

Figure 4 : Horizontal displacement  $F_x$ , vertical  $F_z$  and rocking  $F_r$  versus variation coefficient of  $\beta$

**• Influence du coefficient de Poisson**

La figure 5 présente les statistiques de la réponse de la fondation en fonction de la variabilité du coefficient de Poisson  $\nu$ .

- les résultats obtenus indiquent que lorsque  $CV_\nu$  augmente, les déplacements verticaux et de balancement diminuent, ce qui implique que la fondation devient plus rigide. Pratiquement, l'influence du coefficient de Poisson sur le déplacement horizontal peut être négligée ;
- les amplitudes des déplacements augmentent quand 'p' augmente.

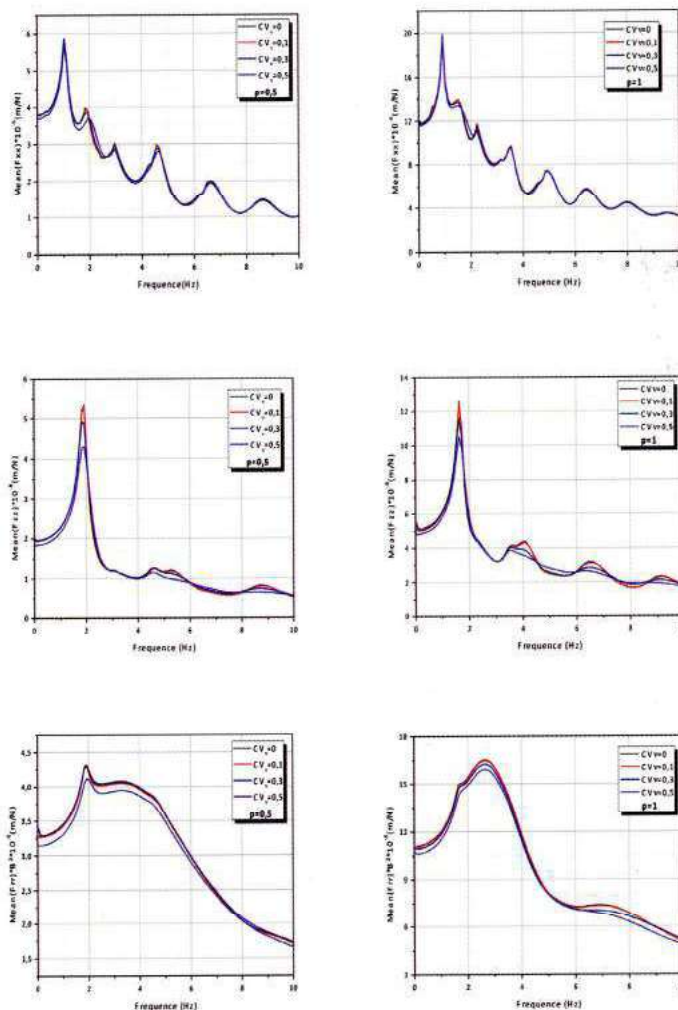


Figure 5 : Déplacement horizontal  $F_x$ , vertical  $F_z$  et de balancement  $F_r$  en fonction de la variabilité de  $\nu$

Figure 5: Horizontal displacement  $F_x$ , vertical  $F_z$  and rocking  $F_r$  versus variation coefficient of  $\nu$

**6. CONCLUSION**

Dans cet article, on s'est intéressé à la détermination de la réponse des fondations filantes rigides, reposant sur un profil de sol non-homogène, et ce, en tenant compte de la variabilité spatiale des propriétés du sol. La méthode probabiliste de simulation indirecte des champs aléatoires non-gaussiens a été utilisée pour la simulation de la variabilité spatiale des propriétés du sol. Ainsi, on associe à la variable aléatoire non bornée (module de cisaillement) la loi de distribution log-normale et à la variable aléatoire bornée (coefficient d'amortissement, masse volumique) la loi de distribution bêta. Pour le calcul de la réponse des fondations, on a utilisé la méthode des couches minces. Cette méthode, contrairement aux autres méthodes disponibles pour les sols multicouches, donne des fonctions de Green sous forme analytique qui sont moins approximatives et plus faciles à calculer et donc moins coûteuses.

Pour le cas des sols non-homogènes, on a constaté que les fonctions de souplesse montrent une augmentation dans



les amplitudes et la fréquence propre quand le système glisse vers les basses fréquences et quand le degré de non-homogénéité augmente.

De plus, une réduction dans l'amortissement est trouvée comme étant le résultat de la non-homogénéité. En d'autres termes, le déplacement est plus important pour les sols lâches (' $p$ ' grand) que pour les sols cohérents et rigides (' $p$ ' petit).

Comme synthèse, on peut dire que les paramètres qui ont une influence prépondérante sur la réponse des fondations superficielles surmontant un sol monocouche non-homogène reposant sur un substratum rocheux, sont le module de cisaillement et à un degré moindre le coefficient de Poisson. En revanche, il ressort que la variabilité de la masse volumique et du coefficient d'amortissement peut être négligée.

## 7. RÉFÉRENCES

- [1] Nour, A., Slimani, A., Laouami, N., (2002). Foundation settlement statistics via finite element analysis. *Journal Computers and Geotechnics*, 29(8): 641-672.
- [2] Nour, A., Slimani, A., Laouami, N., Afra, H., (2003). Finite element model for the probabilistic seismic response of heterogeneous soil profile. *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 23(5): 331-348.
- [3] Hadid, M. and Berrah, M.K., (1995). Boundary Element Method Applied to Elastodynamic Problems: Application to Soil-Foundation Interaction, *Algerian Journal of Technology, Ecole Nationale Polytechnique, SérieA, Vo.11, No.1, pp.1-12.*
- [4] Hadid, M. and Berrah, M. K., (2001). Structural Response for Stochastic Kinematic Interaction, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.30, No. 1, pp. 97-114.
- [5] Berrah, M. K., and Hadid, M., (2003). Foundation-Soil-foundation Interaction Through a Layered Soil Profile, *European Earthquake Engineering*, Vol. XVII, No. 2, pp. 14-19.
- [6] Fenton, GA. and Vanmarcke, EH., (1998). Spatial variation in liquefaction risk, *Géotechnique*. 48(6): 819-831.
- [7] Richart, F. E., Hall, J. R., and Woods, D., (1970). *Vibration of soils and foundations*, Prentice Hill, New Jersey.
- [8] Pecker, A. and Afra, H., (1995). Charts for Natural Frequencies and Transfer Functions of Inhomogeneous Soil Deposits, *Fifth International Conference on Seismic Zonation, Nice (France)*, pp. 17-19.
- [9] Hadid, M., et Afra, H., (1999). Influence des paramètres de sol non-homogène sur sa fonction d'amplification, *Conférence Internationale sur la Sismicité et le Génie Parasismique et la Gestion des Catastrophes Naturelles en Algérie, 24-26 Mai 1999, Alger, Algérie*, pp. 348-356.
- [10] Hadid, M. and Afra, H., (2000). Sensitivity analysis of site effects on response spectra of pipelines, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 20, No. 1-4, pp. 249-260, 2000.